

Wykłady z Fizyki 11



Zbigniew Osiak

Ciało Stałe

ORCID

Linki do moich publikacji naukowych i popularnonaukowych, e-booków oraz audycji telewizyjnych i radiowych są dostępne w bazie ORCID pod adresem internetowym:

<http://orcid.org/0000-0002-5007-306X>

OZNACZENIA

B – notka biograficzna

C – ciekawostka

D – propozycja wykonania doświadczenia

H – informacja dotycząca historii fizyki

I – adres strony internetowej

K – komentarz

P – przykład

U – uwaga

Zbigniew Osiak (Tekst)

WYKŁADY Z FIZYKI
Ciało Stałe

Małgorzata Osiak (Ilustracje)

© Copyright 2013 by
Zbigniew Osiak (text) and Małgorzata Osiak (illustrations)

Wszelkie prawa zastrzeżone.
Rozpowszechnianie i kopiowanie całości lub części publikacji
zabronione bez pisemnej zgody autora tekstu i autorki ilustracji.

Portret autora zamieszczony na okładkach przedniej i tylnej
Rafał Pudło

Wydawnictwo: Self Publishing

ISBN: 978-83-272-3941-9

e-mail: zbigniew.osiak@gmail.com

“*Wykłady z Fizyki – Ciało Stałe*” są jedenastym z piętnastu tomów pomocniczych materiałów do jednorocznego kursu fizyki prowadzonego przeze mnie na różnych kierunkach inżynierskich. Zainteresowani studiowaniem fizyki znajdą tu podstawowe pojęcia, prawa, jednostki, wzory, wykresy i przykłady.

Uzupełnieniem jedenastego tomu są eBooki:

Z. Osiak: *Encyklopedia Fizyki*. Self Publishing (2012).

Z. Osiak: *Zadania Problemowe z Fizyki*. Self Publishing (2011).

Z. Osiak: *Angielsko-polski i polsko-angielski słownik terminów fizycznych*. Self Publishing (2011).

Zapis wszystkich trzydziestu wykładów zgrupowanych w piętnastu tomach zostanie zamieszczony w internecie w postaci eBooków.

-
- Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Mechanika.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Akustyka.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Hydromechanika.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Grawitacja.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Termodynamika.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Elektryczność.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Magnetyzm.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Elektromagnetyzm.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Optyka.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Kwanty.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Ciało Stałe.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Jądra.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Cząstki Elementarne.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Teoria Względności.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Stałe Uniwersalne i Jednostki.*

Ciało stałe

dr Zbigniew Osiak

Rysunki wykonała

Małgorzata Osiak

-
- Ciało stałe 09
 - Kryształy 12
 - Ciekłe kryształy 25
 - Prawo Dulonga-Petita 27
 - Prawo Hooke'a 29
 - Pasmowy model ciała stałego 40
 - Diody półprzewodnikowe, tranzystory i układy scalone 56
 - Wybrane zjawiska i materiały 71

- Ciało stałe 10
- Fizyka ciała stałego 11

-
- Ciało stałe \Leftrightarrow ciało charakteryzujące się, przy danej temperaturze i ciśnieniu atmosferycznym, stabilnością objętości oraz kształtu podczas naprężeń zewnętrznych nieprzekraczających wartości granicznych.

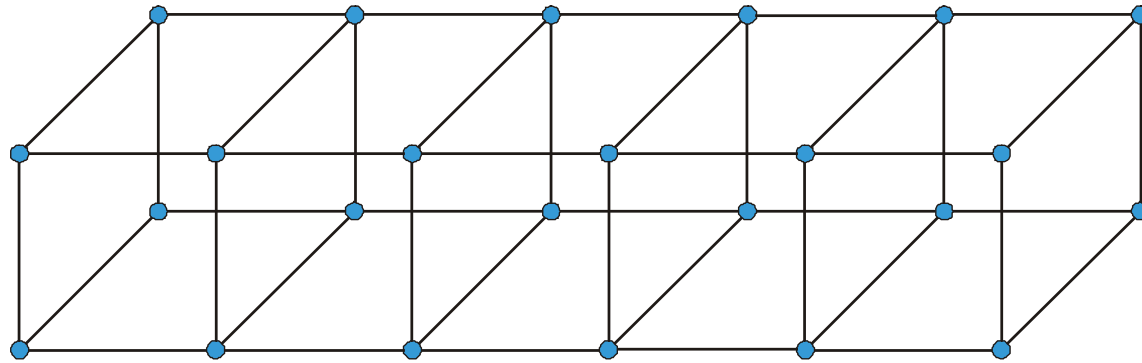
- Fizyka ciała stałego \Leftrightarrow dział fizyki zajmujący się badaniem właściwości ciał stałych.

C Fizyka ciała stałego nazywana jest także fizyką fazy skondensowanej.

- Kryształ 13
- Sieć krystaliczna 14
- Węzły sieci krystalicznej 15
- Stała sieci krystalicznej 16
- Płaszczyzna sieciowa 17
- Oś optyczna kryształu 18
- Kryształy jednoosiowe 19
- Kryształy dwuosiowe 20
- Monokryształ 21
- Polikryształ 22
- Defekty sieci krystalicznej 23
- Fonon 24

-
- Kryształ \Leftrightarrow ciało stałe o regularnej, aczkolwiek niepozbawionej defektów, strukturze wewnętrznej.

- Sieć krystaliczna \Leftrightarrow trójwymiarowa sieć utworzona z atomów, jonów lub cząsteczek w kryształach.



- Fragment przykładowej sieci krystalicznej

-
- Węzły sieci krystalicznej \Leftrightarrow punkty sieci krystalicznej będące położeniami równowagi (środkami drgań) atomów, jonów lub cząsteczek.

-
- Stała sieci krystalicznej \Leftrightarrow odległość między dwoma sąsiednimi płaszczyznami sieciowymi w kryształach, równoległymi względem siebie.

-
- Płaszczyzna sieciowa \Leftrightarrow płaszczyzna wyznaczona przez trzy węzły sieci krystalicznej.

-
- Oś optyczna kryształu \Leftrightarrow kierunek, wzdłuż którego światło rozchodzi się w kryształach optycznie anizotropowych bez podwójnego załamania.

-
- Kryształy jednoosiowe \Leftrightarrow kryształy optycznie anizotropowe posiadające jedną oś optyczną. Przykładami kryształów jednoosiowych są kalcyt, kwarc i turmalin.

-
- Kryształy dwuosiowe \Leftrightarrow kryształy optycznie anizotropowe posiadające dwie osie optyczne. Przykładami kryształów dwuosiowych są mika i selenit.

-
- Monokryształ \Leftrightarrow kryształ o idealnej, wolnej od wszelakich defektów, strukturze wewnętrznej.

-
- Polikryształ \Leftrightarrow ciało stałe składające się z połączonych ze sobą monokryształów.

-
- Defekty sieci krystalicznej \Leftrightarrow odstępstwa od regularnej (periodycznej) struktury sieci krystalicznej. Przykładem defektu jest pusty węzeł sieci.

- Fonon \Leftrightarrow kwant energii (E) drgań cieplnych atomów sieci krystalicznej wokół ich położeń równowagi (węzłów).

$$E = h\nu$$

- ν – częstotliwość drgań
- h – stała Plancka

- Ciekły kryształ 26

• Ciekły kryształ \Leftrightarrow substancja w stanie pośrednim między cieczą a kryształem. Podstawową cechą ciekłych kryształów jest anizotropia ich własności fizycznych. Dlatego nazywane są też cieczami anizotropowymi. Wpływ temperatury, pola elektrycznego i magnetycznego oraz innych czynników na barwę światła selektywnie odbitego od powierzchni ciekłego kryształu znalazł wiele zastosowań praktycznych.

H Ciekłe kryształy odkrył Reinitzer w 1888.

H Nazwę ciekły kryształ zaproponował Lehmann w 1889.

H Podział ciekłych kryształów na nematyczne, smektyczne i cholesterolowe wprowadził Friedel w 1922.

B Friedrich Richard Kornelius Reinitzer (1857-1927), austriacki botanik.

B Otto Lehmann (1855-1922), niemiecki fizyk.

B Georges Friedel (1865-1933), francuski krytalograf.

- Prawo Dulonga-Petita 27

- Prawo Dulonga-Petita \Leftrightarrow prawo głoszące, że ciepło molowe krystalicznych ciał stałych jest w przybliżeniu równe $3R$.

$$c^{\text{mol}} \cong 3R$$

- R – stała gazowa

H Prawo to zostało sformułowane przez Dulonga i Petita w 1819.

U Odstępstwa od prawa Dulonga-Petita pojawiają się w niskich temperaturach.

B Pierre-Louis Dulong (1785-1838), francuski fizyk i chemik.

B Alexis-Thérèse Petit (1791-1820), francuski fizyk.

- Prawo Hooke'a 30
- Sprężystość 32
- Naprężenie 33
- Moduł Younga 34
- Granica proporcjonalności 36
- Granica sprężystości 37
- Granica plastyczności 38
- Granica wytrzymałości na rozciąganie 39

- Prawo Hooke'a \Leftrightarrow prawo głośzące, że względny przyrost długości ($\Delta l/l_0$) rozciąganego pręta o przekroju kołowym jest wprost proporcjonalny do powodującego go naprężenia (F/S).

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \frac{1}{E} \cdot \frac{F}{S}$$

- Δl – przyrost długości rozciąganego pręta
- l_0 – początkowa długość pręta
- E – moduł Younga
- F – wartość siły rozciągającej równoległej do osi pręta
- S – pole poprzecznego przekroju pręta
- Prawo Hooke'a jest słuszne dla naprężeń nieprzekraczających granicy proporcjonalności.

H Prawo to odkrył Hooke w 1660, a następnie uogólnił dla dowolnych odkształceń Cauchy w 1822.

B Robert Hooke (1635-1703), angielski fizyk.

B Baron Augustin Louis Cauchy (1789-1857), francuski matematyk i fizyk.

-
- Sprężystość \Leftrightarrow właściwość ciała polegająca na tym, że po ustąpieniu sił zewnętrznych, powodujących deformację tego ciała, powraca ono do postaci wyjściowej.

- Napężenie (σ) \Leftrightarrow wielkość skalarna będąca stosunkiem wartości (F) siły działającej wzdłuż osi rozciąganego pręta do pola powierzchni (S) poprzecznego przekroju pręta.

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

- Moduł Younga (E) \Leftrightarrow odwrotność współczynnika proporcjonalności w prawie Hooke'a.

$$E = \frac{\left(\frac{F}{S}\right)}{\left(\frac{\Delta l}{l_0}\right)}, \quad [E] = \text{Pa}$$

- F/S – naprężenie
- $\Delta l/l_0$ – względny przyrost długości
- F – wartość siły rozciągającej, równoległej do osi pręta
- S – pole poprzecznego przekroju pręta
- Δl – przyrost długości rozciąganego pręta
- l_0 – początkowa długość pręta

-
- Moduł Younga jest równy naprężeniu, przy którym długość rozciąganego pręta zwiększa się dwukrotnie.

B Thomas Young (1773-1829), brytyjski fizyk i lekarz.

-
- Granica proporcjonalności \Leftrightarrow naprężenie, powyżej którego przestaje obowiązywać prawo Hooke'a.

-
- Granica sprężystości \Leftrightarrow naprężenie, powyżej którego pojawia się trwałe odkształcenie rozciąganego pręta.

-
- Granica plastyczności \Leftrightarrow naprężenie, powyżej którego wydłużenie pręta zwiększa się bez dalszego wzrostu naprężenia.

- Granica wytrzymałości na rozciąganie \Leftrightarrow naprężenie, powyżej którego rozciągany pręt ulega przerwaniu.

- Pasma energetyczne 41
- Szerokość pasma energetycznego 42
- Pasma przewodnictwa 43
- Pasma walencyjne 44
- Pasma wzbronione 45
- Metale 46
- Półmetale 47
- Dielektryki (izolatory) 48
- Półprzewodniki 49
- Półprzewodniki samoistne 50
- Półprzewodniki domieszkowane 51
- Pasmowy model ciała stałego 52
- Poziom akceptorowy 54
- Poziom donorowy 55

-
- Pasmo energetyczne \Leftrightarrow przedział wartości energii jaką mogą lub nie mogą posiadać elektrony w ciele stałym.

-
- Szerokość pasma energetycznego \Leftrightarrow różnica skrajnych wartości energii w danym paśmie energetycznym.

-
- Pasmo przewodnictwa \Leftrightarrow przedział wartości energii jaką posiadają elektrony będące nośnikami prądu elektrycznego w ciałach stałych.

-
- Pasmo walencyjne \Leftrightarrow przedział wartości energii jaką posiadają zewnętrzne (walencyjne) elektrony atomów ciała stałego.

-
- Pasmo wzbronione \Leftrightarrow przedział wartości energii jakiej nie mogą posiadać elektrony w monokryształach. Pasmo wzbronione, nazywane też przerwą energetyczną, oddziela pasmo walencyjne od pasma przewodnictwa.

- Metale \Leftrightarrow substancje o małym oporze elektrycznym właściwym (ρ).

$$10^{-8} \Omega\text{m} < \rho < 10^{-3} \Omega\text{m}$$

- W pasmowym modelu ciała stałego w przypadku metali pasma przewodnictwa i walencyjne częściowo pokrywają się.

- Półmetale \Leftrightarrow substancje, dla których w pasmowym modelu ciała stałego dno pasma przewodnictwa i szczyt pasma walencyjnego zachodzą na siebie w niewielkim stopniu.

P Klasycznymi półmetalicznymi pierwiastkami są arsen (As), antymon (Sb), bizmut (Bi), α -cyna (Sn) oraz grafit (odmiana alotropowa węgla).

-
- Dielektryki (izolatory) \Leftrightarrow materiały praktycznie nieprzewodzące prądu elektrycznego, o oporze elektrycznym właściwym większym od $10^8 \Omega\text{m}$. Wielkością charakteryzującą dany dielektryk jest jego stała dielektryczna.
 - W pasmowym modelu ciała stałego dielektrykom odpowiada szerokość pasma wzbronionego większa od 5 eV.

- Półprzewodniki \Leftrightarrow substancje o oporze elektrycznym właściwym (ρ) większym niż przewodników a mniejszym niż dielektryków.

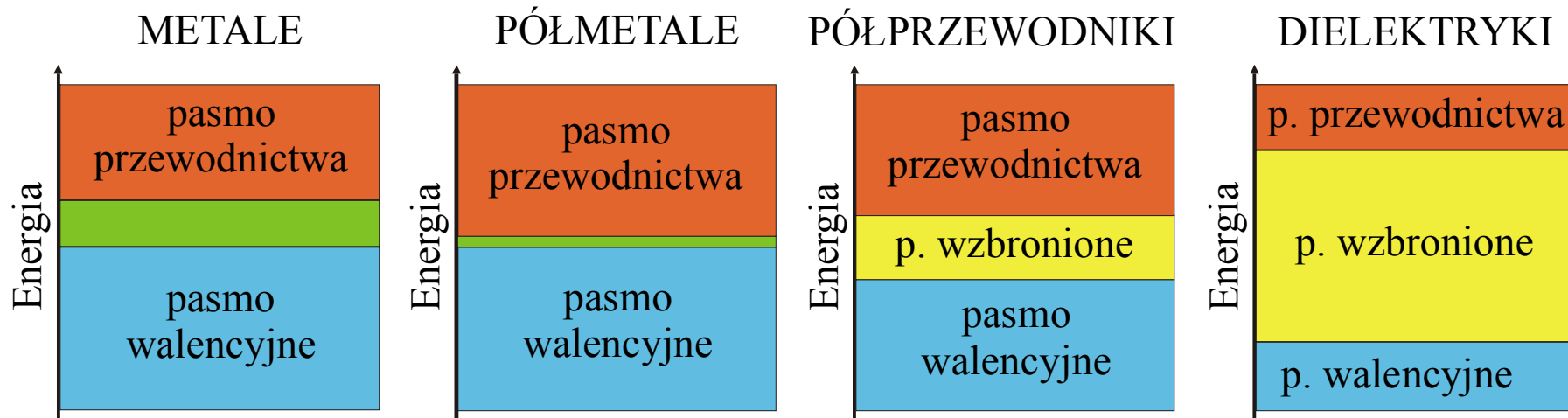
$$10^{-6} \Omega\text{m} < \rho < 10^8 \Omega\text{m}$$

- W pasmowym modelu ciała stałego półprzewodnikom odpowiada szerokość pasma wzbronionego mniejsza od 5 eV.

-
- Półprzewodniki samoistne \Leftrightarrow półprzewodniki, w których liczba elektronów w paśmie przewodnictwa jest taka sama jak dziur elektronowych w paśmie walencyjnym.

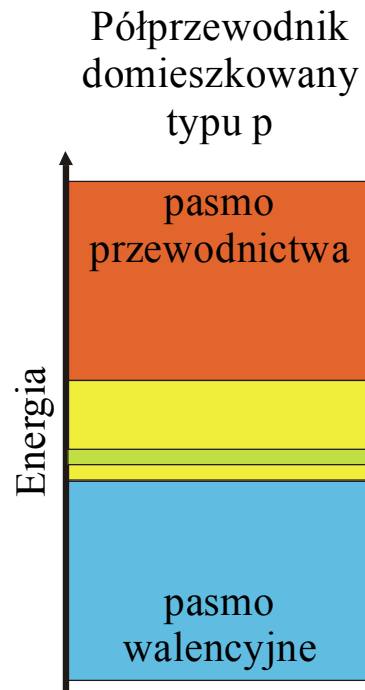
- Półprzewodniki domieszkowane \Leftrightarrow półprzewodniki, do których zostały wprowadzone małe liczby atomów innych pierwiastków. Półprzewodniki domieszkowane dzielą się na dwa rodzaje.
- W półprzewodnikach typu n liczba elektronów w paśmie przewodnictwa i poziomie donorowym (dodatkowym paśmie energetycznym położonym w przerwie energetycznej w pobliżu dna pasma przewodnictwa) jest większa niż liczba dziur w paśmie walencyjnym.
- W półprzewodnikach typu p liczba elektronów w paśmie przewodnictwa jest mniejsza niż liczba dziur w paśmie walencyjnym i poziomie akceptorowym (dodatkowym paśmie energetycznym położonym w przerwie energetycznej w pobliżu górnej krawędzi pasma walencyjnego).

- Pasmowy model ciała stałego \Leftrightarrow model wyjaśniający właściwości elektryczne metali, półmetali, półprzewodników i dielektryków na podstawie pojęcia pasm energetycznych. Przepływ prądu elektrycznego w ciele stałym jest możliwy tylko wtedy, gdy w odpowiednich pasmach energetycznych istnieją puste stany kwantowe. Nośnikami prądu w metalach i półmetalach są elektrony z pasma przewodnictwa, które częściowo pokrywa się z pasmem walencyjnym. Nośnikami prądu elektrycznego w półprzewodnikach i dielektrykach są elektrony z pasma przewodnictwa i poziomu donorowego oraz dziury elektronowe z pasma walencyjnego i poziomu akceptorowego. Szerokość przerwy energetycznej w półprzewodnikach jest mniejsza niż w dielektrykach.



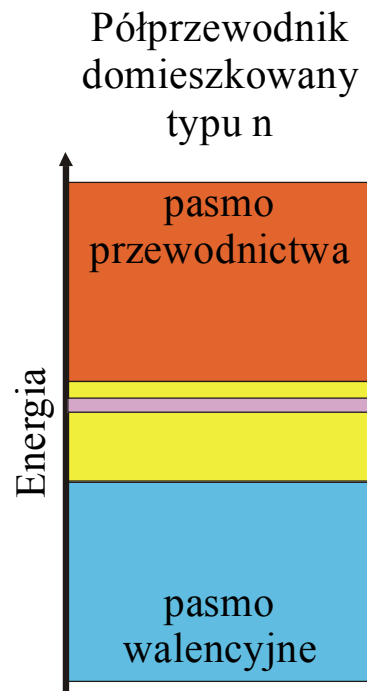
- Pasmowy model ciała stałego; kolorem zielonym zaznaczono wspólną część pasm przewodnictwa i walencyjnego

- Poziom akceptorowy \Leftrightarrow dodatkowe pasmo energetyczne w domieszkowanym półprzewodniku, położone w przerwie energetycznej w pobliżu górnej krawędzi pasma walencyjnego. Poziomy akceptorowe występują w półprzewodnikach typu p.



- Pasmowy model półprzewodnika domieszkowanego typu p; poziom akceptorowy zaznaczono kolorem zielonym

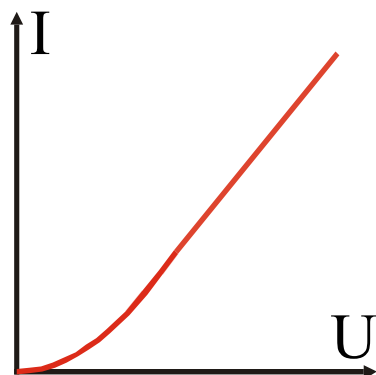
- Poziom donorowy \Leftrightarrow dodatkowe pasmo energetyczne w domieszkowanym półprzewodniku położone w przerwie energetycznej w pobliżu dna pasma przewodnictwa. Poziomy donorowe występują w półprzewodnikach typu n.



- Pasmowy model półprzewodnika domieszkowanego typu n; poziom donorowy zaznaczono kolorem fioletowym

- Dioda półprzewodnikowa 57
- Dziura elektronowa 58
- Ekscyton 59
- Złącze p-n 60
- Dioda Schottky'ego 61
- Dioda tunelowa 62
- Zjawisko Zenera 63
- Dioda Zenera 64
- Tranzystor bipolarny pnp 66
- Układ scalony 70

- Dioda półprzewodnikowa \Leftrightarrow dwukońcówkowy półprzewodnikowy element elektroniczny służący głównie do prostowania prądu elektrycznego. Zasada działania diody półprzewodnikowej oparta jest na wykorzystaniu właściwości złącza p-n.



- Symbol diody półprzewodnikowej

- Charakterystyka prądowo-napięciowa diody półprzewodnikowej spolaryzowanej w kierunku przewodzenia

-
- Dziura elektronowa \Leftrightarrow pusty stan w paśmie walencyjnym powstający po przejściu elektronu do pasma przewodnictwa. Dziura zachowuje się tak, jakby była elektronem o dodatnim ładunku elektrycznym.

- Ekscyton \Leftrightarrow elektron związany z dziurą siłą kulombowską. Układ ten jest formalnie podobny do atomu wodoru. Ekscytony pojawiają się w półprzewodnikach i dielektrykach w wyniku absorpcji fotonów o odpowiedniej energii przez elektrony z pasma walencyjnego. Energia ta musi być mniejsza od szerokości przerwy energetycznej.

- Złącze p-n \Leftrightarrow złącze dwóch półprzewodników domieszkowanych typu p oraz typu n. Przez złącze spolaryzowane w kierunku przewodzenia (półprzewodnik typu p jest wtedy połączony z dodatnim biegunem źródła napięcia) przepływa prąd elektryczny. Przez złącze spolaryzowane w kierunku zaporowym (półprzewodnik typu p jest wtedy połączony z ujemnym biegunem źródła napięcia) praktycznie nie przepływa prąd elektryczny. Jeżeli jednak napięcie w kierunku zaporowym przekroczy wartość graniczną, to nastąpi gwałtowny wzrost natężenia prądu (przebicie) i uszkodzenie złącza.

- Dioda Schottky'ego \Leftrightarrow dioda, którą stanowi złącze metalu z półprzewodnikiem.

B Walter Hermann Schottky (1886-1976), niemiecki fizyk.

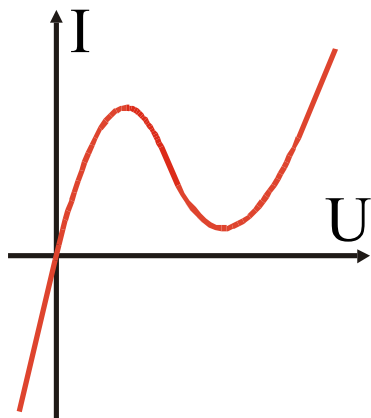


- Symbol diody Schottky'ego

• Dioda tunelowa \Leftrightarrow dioda półprzewodnikowa z silnie domieszkowanym złączem (p-n), wyróżniająca się tym, że jej charakterystyka prądowo-napięciowa w kierunku przewodzenia posiada maksimum i minimum. Dioda tunelowa nazywana jest też diodą Esakiego.

H Diodę tunelową wynalazł Esaki w 1958.

B Leo Esaki (ur. 1925), japoński fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1973.



• Charakterystyka prądowo-napięciowa diody tunelowej



• Symbol diody tunelowej

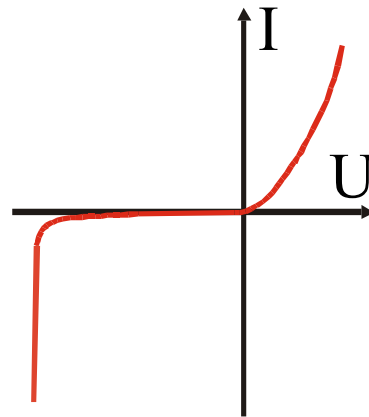
• Zjawisko Zenera \Leftrightarrow zjawisko polegające na gwałtownym wzroście natężenia prądu przepływającego przez silnie domieszkowane złącze p-n spolaryzowane w kierunku zaporowym, gdy napięcie przekroczy progową wartość nazywaną napięciem Zenera. Przy czym złącze nie ulega uszkodzeniu. Po przekroczeniu napięcia Zenera elektrony w wyniku efektu tunelowego przechodzą bez zmiany energii z pasma walencyjnego półprzewodnika typu p do pasma przewodnictwa półprzewodnika typu n.

H Teorię tego zjawiska podał Zener w 1934.

B Clarence Melvin Zener (1905-1993), amerykański fizyk teoretyk.

• Dioda Zenera \Leftrightarrow dioda półprzewodnikowa z silnie domieszkowanym złączem (p-n), przez którą prąd przepływa w kierunku przewodzenia, tak jak w normalnej diodzie. Natomiast w kierunku zaporowym przepływ prądu następuje po przekroczeniu napięcia nazywanego napięciem Zenera lub napięciem przebicia. Podczas tego przebicia, będącego skutkiem efektu tunelowego, nie następuje uszkodzenie diody. Dioda Zenera, nazywana też diodą stabilizacyjną lub stabilistorem, spolaryzowana w kierunku zaporowym służy do stabilizowania napięcia stałego.

B Clarence Melvin Zener (1905-1993), amerykański fizyk teoretyk.



- Charakterystyka prądowo-napięciowa diody Zenera



- Symbol diody Zenera

- Tranzystor bipolarny pnp \Leftrightarrow trójkońcówkowy półprzewodnikowy element elektroniczny służący do prostowania i wzmacniania prądu elektrycznego.
- Tranzystor bipolarny pnp składa się z trzech warstw, są nimi:
 - kolektor – półprzewodnik typu p,
 - baza – półprzewodnik typu n,
 - emiter – półprzewodnik typu p.
- Złącza kolektor-baza oraz emiter-baza mogą być wykorzystywane jako diody półprzewodnikowe.

- W tranzystorze bipolarnym pnp, pracującym w układzie wzmacniacza,
- złącze emiter-baza musi być spolaryzowane w kierunku przewodzenia,
- złącze kolektor-baza musi być spolaryzowane w kierunku zaporowym,
- ujemny potencjał kolektora musi być co do bezwzględnej wartości większy od dodatniego potencjału emitera, przy czym potencjałem odniesienia jest potencjał ziemi.

C Emiter, baza i kolektor spełniają w tranzystorze analogiczną rolę, jak katoda, siatka i anoda w triodzie.

C Nazwa tranzystor pochodzi od angielskich słów **transfer resistor**.

C Tranzystory bipolarne, nazywane też tranzystorami warstwowymi, są konstruowane również w wersji npn.

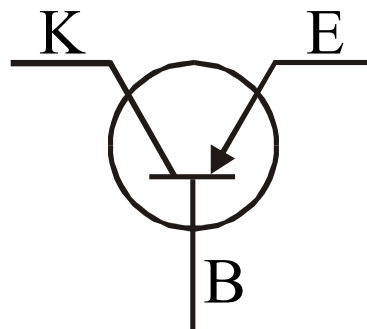
H Pierwszy tranzystor (ostrzowy) wynaleźli Bardeen i Brattain w 1947.

H Tranzystor warstwowy npn skonstruował Shockley w 1948.

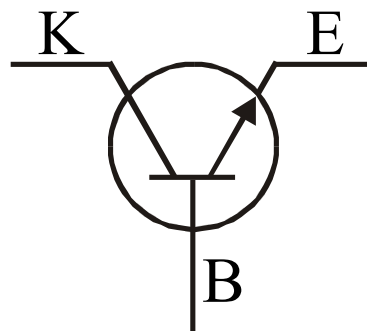
B John Bardeen (1908-1991), amerykański fizyk, dwukrotny laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1956 oraz 1972.

B Walter Houser Brattain (1902-1987), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1956.

B William Bradford Shockley (1910-1989), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1956.



- Symbol tranzystora bipolarnego pnp



- Symbol tranzystora bipolarnego npn

-
- Układ scalony \Leftrightarrow wielokońcówkowy element elektroniczny będący zminiaturyzowanym układem składającym się z olbrzymiej liczby tranzystorów, diod, oporników i kondensatorów.

- Zjawisko piezoelektryczne 72
- Odwrotne zjawisko piezoelektryczne 73
- Zjawisko piezomagnetyczne 74
- Zjawisko (efekt) Mössbauera 75
- Nanorurki węglowe 76
- Fullereny 77
- Grafen 78

• Zjawisko piezoelektryczne \Leftrightarrow zjawisko polegające na tym, że ściskanie lub rozciąganie niektórych kryształów wzdłuż określonych kierunków powoduje powstawanie różnicy potencjałów między przeciwległymi ścianami prostopadłymi do kierunku deformacji. Polaryzacja napięcia zależy od rodzaju deformacji. Zjawisko piezoelektryczne występuje między innymi w kwarcu, turmalinie i soli Seignette'a.

H Zjawisko piezoelektryczne odkryli bracia Curie w 1880.

B Paul Jacques Curie (1855-1941), francuski fizyk.

B Pierre Curie (1859-1906), francuski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1903.

•Odwrotne zjawisko piezoelektryczne \Leftrightarrow zjawisko polegające na zmianie liniowych rozmiarów niektórych kryształów pod wpływem zewnętrznego pola elektrycznego. Przy czym rodzaj odkształcenia (ściskanie, rozciąganie) zależy od kierunku natężenia pola elektrycznego.

H Odwrotne zjawisko piezoelektryczne teoretycznie przewidział Lippmann w 1881, a następnie potwierdzili je doświadczalnie bracia Curie.

B Gabriel Lippmann (1845-1921), francuski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1908.

B Paul Jacques Curie (1855-1941), francuski fizyk.

B Pierre Curie (1859-1906), francuski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1903.

- Zjawisko piezomagnetyczne \Leftrightarrow zjawisko polegające na pojawieniu się namagnesowania w kryształach antyferromagnetycznych pod wpływem naprężenia.

H Zjawisko piezomagnetyczne w kryształach fluorku manganu (MnF_2) i fluorku kobaltu (CoF_2) odkryto w 1959.

- Zjawisko (efekt) Mössbauera \Leftrightarrow zjawisko odkryte przez Mössbauera w 1957, polegające na bezdrzutowej emisji i absorpcji promieniowania gamma przez jądra atomowe w sieci krystalicznej.

B Rudolf Ludwig Mössbauer (ur. 1929), niemiecki fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1961.

• Nanorurki węglowe \Leftrightarrow cząsteczki utworzone z atomów węgla rozmieszczonych w regularny sposób na bocznej powierzchni wirtualnego walca.

C Nanorurki węglowe mogą mieć średnicę rzędu jednego nanometra.

H Nanorurki węglowe odkrył Iijima w 1991.

B Sumio Iijima (ur. 1939), japoński fizyk.

• Fullereny (fulereny) \Leftrightarrow cząsteczki zawierające od 28 do 1500 atomów węgla rozmieszczonych w regularny sposób na zamkniętej wirtualnej powierzchni.

H Fullereny odkryli w 1985 Kroto oraz Curl i Smalley z zespołem.

C Nazwa fullereny pochodzi od nazwiska Fuller.

B Richard Buckminster Fuller (1895-1983), amerykański architekt.

B Robert Floyd Curl Jr. (ur. 1933), amerykański chemik, laureat Nagrody Nobla z chemii w 1996.

B Sir Harold Walter Kroto (ur. 1939), angielski chemik, laureat Nagrody Nobla z chemii w 1996.

B Richard Errett Smalley (1943-2005), amerykański chemik, laureat Nagrody Nobla z chemii w 1996.

- Grafen \Leftrightarrow dwuwymiarowa struktura utworzona z atomów węgla.

H Za badania grafenu Gejm i Nowosiołow otrzymali w 2010 Nagrodę Nobla z fizyki.

B Andriej Konstantinowicz Gejm (ur. 1958), rosyjsko-holenderski fizyk pochodzenia niemieckiego, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 2010.

B Konstantin Siergiejewicz Nowosiołow (ur. 1973), rosyjski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 2010.

Wykłady z Fizyki 11



Zbigniew Osiak

Ciało Stałe