

12. Podstawy fizyczne działania elementów półprzewodnikowych

Wstęp

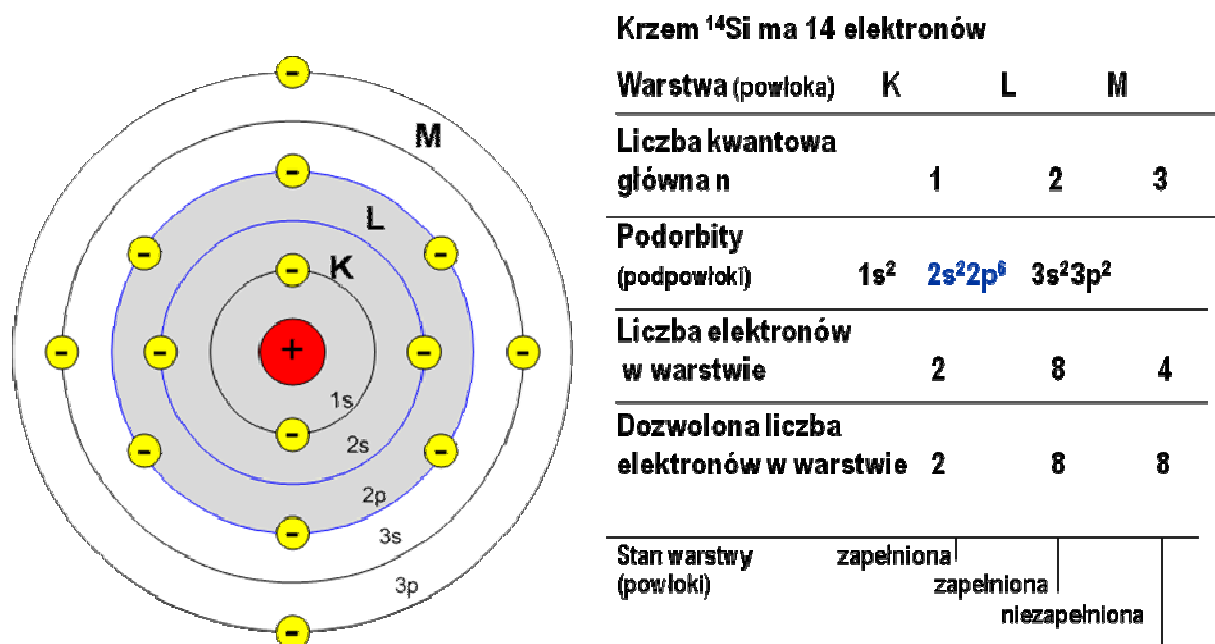
Większość materiałów stosowanych w elektronice to materiały krystaliczne, które ze względu na zdolność przewodzenia prądu elektrycznego można zakwalifikować do jednej z grup: **izolatory**, **półprzewodniki** i **przewodniki**. Izolatory praktycznie nie przewodzą prądu elektrycznego. Półprzewodniki i przewodniki przewodzą.

W przewodnikach zjawisko przewodzenia prądu jest wyłącznie wynikiem ruchu ładunku ujemnego. W półprzewodnikach przewodzenie prądu odbywa się wskutek działania dwóch różnych i niezależnych od siebie mechanizmów poruszania się elektronów. Jeden z tych mechanizmów może być opisany jako ruch ładunku ujemnego, a drugi należy rozpatrywać jako ruch ładunku dodatniego.

W kolejnych segmentach rozdziału omówiono **budowę ciał o strukturze krystalicznej**. Wyjaśniono pojęcia: **swobodny elektron** i **dziura**. Omówiono mechanizmy **jonizacji atomów** w oparciu o model atomu Bohra i teorię pasmową oraz podano kryteria podziału materiałów krystalicznych na izolatory, przewodniki i półprzewodniki. Omówiono zjawiska występujące w **półprzewodnikach samoistnych** i **niesamoistnych**. Szczególnie zwrócono uwagę na **oddziaływanie pól na nośniki ładunku swobodnego**, **transport nośników nadmiarowych** i **zjawiska powierzchniowe** w półprzewodnikach. W ostatnim segmencie rozdziału krótko omówiono niepożądane zjawiska występujące w materiałach półprzewodnikowych, powodujące powstawanie niezdefiniowanych, chaotycznych sygnałów elektrycznych, które nazywano **szumami**.

12.1. Budowa krystaliczna ciał, swobodne elektrony, dziury

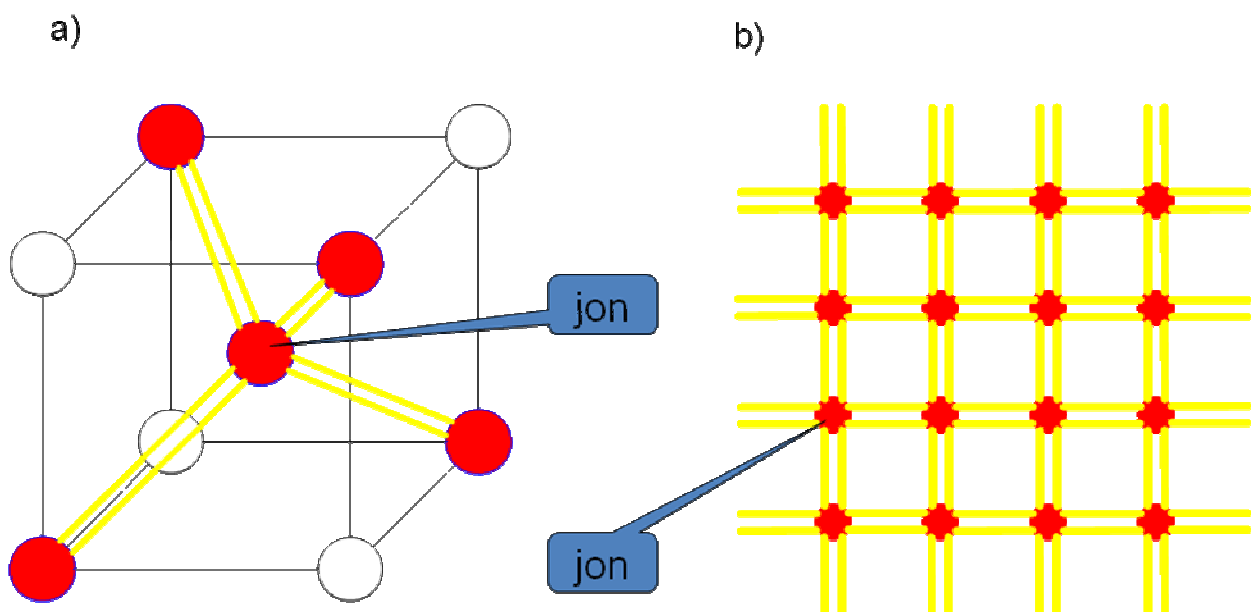
Podstawowym materiałem do produkcji współczesnych przyrządów półprzewodnikowych jest **krzem**.



Rys. 12.1. Model atomu krzemu wg teorii Bohra

Na rys.12.1 przedstawiono model atomu krzemu. Szarym kolorem zaznaczono obszar, w którym znajdują się elektrony silniej związane z jądrem atomu. Jądro i elektrony na orbitach K, L ze względu na trwałość tej struktury można traktować jak jon dodatni. Każdy atom krzemu ma 14 elektronów. Na pierwszej orbicie oznaczonej literą K są 2 elektrony, na drugiej, oznaczonej literą L, 8 elektronów. Orbita pierwsza i druga są w pełni obsadzone. Na orbicie trzeciej, oznaczonej literą M, są tylko 4 elektrony na 8 możliwych do obsadzenia miejsc. Te cztery elektrony nazywane są elektronami walencyjnymi. Decydują one o aktywności chemicznej i właściwościach elektrycznych krzemu. W tym stanie atom jest obojętny elektrycznie. Aby zmienić ten stan należy do atomu doprowadzić z zewnątrz energię, przy czym najłatwiej jest oderwać od atomu elektrony walencyjne, a najtrudniej te położone blisko jądra.

W elektronice stosuje się krzem o strukturze krystalicznej, w której wszystkie atomy w całej objętości materiału są uporządkowane i związane ze sobą siłami wiązań atomowych tzw. kowalencyjnych i tworzą tzw. siatkę krystaliczną. Strukturę krystaliczną krzemu, którą często nazywamy strukturą diamentu przedstawiono na rys.12.2.



Rys. 12.2. Elementarna struktura komórki sieci krystalicznej krzemu

a) model przestrzenny; b) model dwuwymiarowy

Dla temperatury zera bezwzględnego, kiedy siatka krystaliczna nie wykonuje żadnych ruchów w każdym narożniku sześcianu o boku około $5,4 \cdot \text{\AA}$ ($1 \text{\AA} = 10^{-10} \text{ m}$) są umieszczone nieruchome jądra atomów. Pomędzy sąsiadującymi ze sobą jądrami krążą pary elektronów tworząc bardzo trwałe wiązanie atomowe przy czym, ponieważ w każdej chwili czasowej z każdym jądrem są związane cztery elektrony walencyjne struktura ta jest elektrycznie obojętna. Aby rozerwać wiązanie atomowe utworzone przez cztery elektrony walencyjne należy dostarczyć do siatki krystalicznej znacznej energii tzw. energii jonizacji.

Są trzy podstawowe **mechanizmy jonizacji**:

- **podgrzanie** (promieniowanie cieplne) – generacja termiczna,
- **naświetlenie** (promieniowanie świetlne w zakresie fal widzialnych i niewidzialne) – fotogeneracja,
- **przyspieszenie nośników ładunku w polu elektrycznym** i nadanie im takiej energii, że są one w stanie wybić z siatki krystalicznej kolejne elektrony, a te następne itd. tak, że proces ten rozwija się lawinowo – jonizacja zderzeniowa.

Elementy półprzewodnikowe na ogół pracują w temperaturze otoczenia około 300 K. Zatem do siatki krystalicznej w sposób naturalny jest dostarczana energia cieplna. Energia ta powoduje, że zarówno jądra atomów, jak i elektrony drgają wokół swoich położeń spoczynkowych ($T = 0$ K) co jest źródłem dodatkowych naprężeń mechanicznych w siatce krystalicznej. Jeżeli doprowadzona energia jonizacji (np. energia cieplna) jest dostatecznie duża to powstające siły zrywają wiązania atomowe i uwolnione w ten sposób elektrony mogą się swobodnie poruszać w kryształ. Te elektrony nazywamy **elektronami swobodnymi**. Po każdym uwolnionym elektronie pozostaje w siatce krystalicznej dodatnio naładowany jon związany z jądrem atomu. Nazywamy go **dziurą**. Dziura może przemieszczać się, podobnie jak elektrony swobodne w całej objętości kryształu. Ponieważ uzupełnienie brakującego na orbicie elektronu może odbywać się kosztem wolnych elektronów lub elektronów walencyjnych związanych z sąsiednimi atomami ruch ten jest niezależny od ruchu elektronów swobodnych. Można zatem w półprzewodniku wyróżnić prąd elektronowy związany z poruszającym się ładunkiem ujemnym wytworzony przez swobodne elektrony i prąd dziurowy związany z ładunkiem dodatnim wytworzonym przez poruszające się dziury.

Zgodnie z teorią Nielsa Bohra elektrony krążące po orbicie kołowej wokół jądra atomu o ściśle określonym promieniu mają określoną energię. Mówimy, że odpowiada im określony stan energetyczny. W przypadku atomu odosobnionego energia całkowita elektronu wyraża się zależnością:

$$W = \frac{Z \cdot e^4 \cdot m_e}{8n^2 \cdot h^2 \cdot \epsilon_0^2} \quad (12.1)$$

gdzie:

W – całkowita energia elektronu

Z – liczba atomowa pierwiastka (dla krzemu $Z = 14$)

e – ładunek elementarny ($1,602 \cdot 10^{-19}$ C)

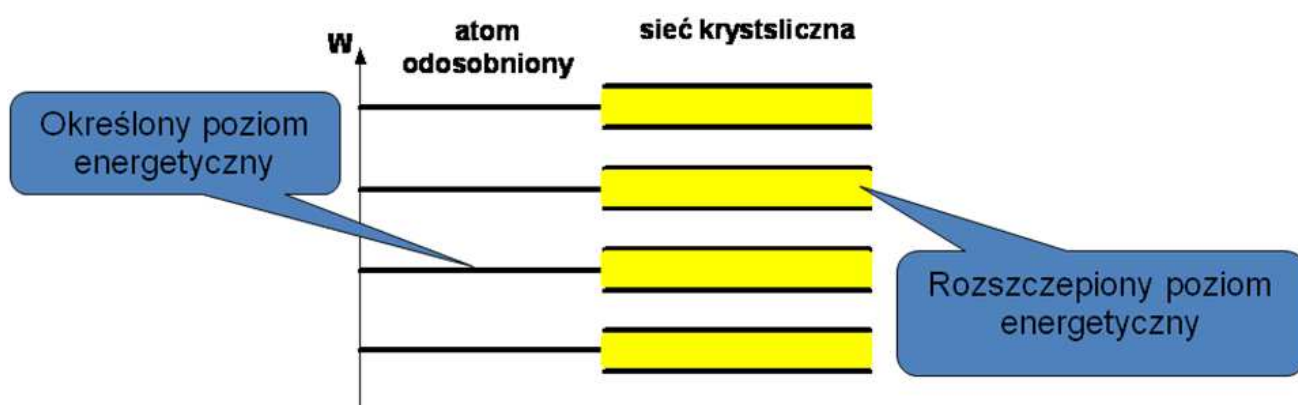
m_e – masa elektronu ($1,78 \cdot 10^{-31}$ kg)

n – numer orbity

h – stała Plancka ($6,625 \cdot 10^{-34}$ J·s)

ϵ_0 – przenikalność elektryczna próżni ($8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m)

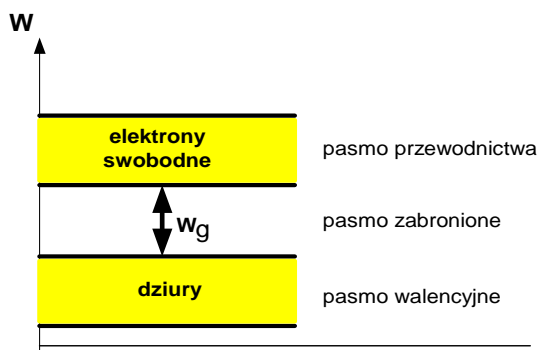
Przejście elektronu z orbity na orbitę jest związane ze zmianą energii i może odbywać się tylko w sposób skokowy. W tym wypadku mówimy, że występuje **zjawisko kwantowania orbit**.



Rys. 12.3. Poziomy energetyczne elektronów w atomie odosobnionym i w sieci krystalicznej

Z równania 12.1 wynika, że elektron poruszający się po n – tej orbicie ma określoną energię. Przejście z jednej orbity na inną związane jest ze zmianą energii i może odbywać się tylko w sposób skokowy.

Mówimy w tym wypadku o zjawisku kwantowania orbit (określony, tzn. **skwantowany poziom energetyczny** - rys. 12.3). Jeżeli atom nie jest odosobniony i wchodzi w skład siatki krystalicznej to ruch elektronów jest bardziej złożony i energia całkowita każdego z nich na poszczególnych orbitach nieznacznie różni się od energii podanej zależnością 12.1. Mówimy wtedy o rozszczepieniu dyskretnego poziomu energetycznego (**rozszczepiony poziom energetyczny** - rys. 12.3).



Rys. 12.4. Model pasmowy atomu

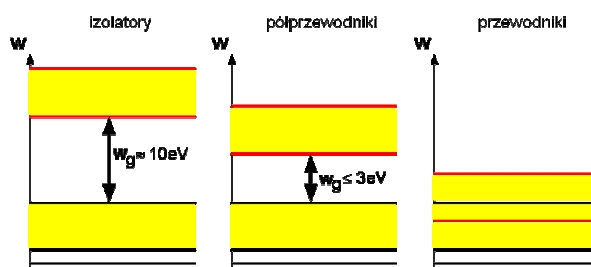
Rozszczepione poziomy energetyczne tworzą tzw. pasma energetyczne, a elektrony będące na określonej orbicie mogą przyjmować każdą wartość energii, która mieści się wewnątrz pasma. Takie pasma nazywamy dozwolonymi (**pasmo przewodnictwa i pasmo walencyjne** - rys. 12.4) w odróżnieniu od **pasz zabronionych**, które zawierają takie poziomy energetyczne, których żaden elektron nie może obsadzić.

W temperaturze zera bezwzględnego ($T = 0 \text{ K}$) wszystkie elektrony walencyjne są związane z jądrem atomu i zajmują w modelu pasmowym półprzewodnika tzw. pasmo walencyjne. Po dostarczeniu odpowiednio dużej energii jonizacji elektrony te są wyrwane z siatki krystalicznej, ich energia całkowita rośnie i przechodzą one do pasma przewodnictwa. Te swobodne elektrony są nośnikami ujemnego ładunku elektrycznego i tworzą w materiale półprzewodnika prąd elektronowy.

Różnica pomiędzy poziomem energii pasma walencyjnego i przewodnictwa W_g wyznacza szerokość pasma zabronionego. Wartość W_g określa minimalną energię, jaka musi być dostarczona do elektronu walencyjnego, aby został on wyrwany z wiązań siatki krystalicznej.

12.2. Rodzaje materiałów krystalicznych

Analizując wzajemne usytuowanie pasma walencyjnego i przewodnictwa w modelu pasmowym ciał można wyróżnić trzy podstawowe grupy materiałów krystalicznych: izolatory, półprzewodniki i przewodniki (rys. 12.5).



Rys.12.5. Usytuowanie pasma walencyjnego i przewodnictwa w trzech podstawowych rodzajach materiałów: izolatorach, półprzewodnikach i przewodnikach

W izolatorach szerokość pasma zabronionego jest bardzo duża rzędu 10 eV i więcej, a zatem przeskok elektronu z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa jest bardzo trudny w realizacji, ponieważ wymaga dostarczenia do elektronu dużej energii. W izolatorach tylko znikoma ilość elektronów przechodzi do pasma

przewodnictwa i tworzy prąd elektryczny, dlatego rezystywność izolatorów jest bardzo wielka rzędu $10^{10} - 10^{20} \Omega \cdot m$.

Półprzewodniki, które w temperaturze $T = 0 \text{ K}$ są izolatorami, w temperaturze otoczenia 300 K wykazują właściwości przewodzące, ponieważ w tej temperaturze, ze względu na niewielką szerokość pasma zabronionego ($\leq 3 \text{ eV}$), niektóre elektrony walencyjne przeskakują do pasma przewodzenia i tworzą prąd elektryczny. Ponieważ koncentracja atomów w ciałach stałych jest mniej więcej stała i porównywalna z liczbą Avogadra tzn. w 1 m^3 jest około $5 \cdot 10^{28}$ atomów, to w temperaturze 300 K , dla $n_i = 10^{13}$ tylko jeden na $5 \cdot 10^{15}$ atomów półprzewodnika jest zjonizowany. Oznacza to, że w paśmie przewodnictwa jest w 1 m^3 około 10^{13} elektronów swobodnych, które tworzą prąd elektryczny. Rezystywność ma wartość około $10 - 10^5 \Omega \cdot m$ i silnie zależy od temperatury. W tabeli 12.1 podano wartości energii pasma zabronionego dla różnych materiałów półprzewodnikowych stosowanych w elektronice: InSb – antymonek indu, PbS – siarczek ołowiu, Ge – german, Si – krzem, GaAs – arsenek galu, Se – selen, CdS – siarczek kadmu.

Tabela 12.1 Szerokość pasma zabronionego W_g wybranych półprzewodników

Półprzewodnik	InSb	PbS	Ge	Si	GaAs	Se	CdS
$W_g [\text{eV}]$	0,18	0,37	0,67	1,12	1,43	1,7	1,9

W przewodnikach (metalach) pasmo walencyjne i przewodnictwa nakładają się na siebie. Oznacza to, że w metalu nie występuje pasmo zabronione i nawet bez dostarczania energii z zewnątrz istnieją elektrony swobodne. Ponieważ koncentracja atomów w przewodnikach jest podobnie jak w półprzewodnikach rzędu $5 \cdot 10^{28}$, a z jednego atomu jeden lub dwa elektrony walencyjne znajdują się w paśmie przewodnictwa to ładunek swobodny tworzący prąd elektryczny w przewodniku jest związany z ruchem bardzo wielkiej (rzędu 10^{29} w 1 m^3) ilości elektronów. W tym wypadku rezystywność jest bardzo mała (rzędu $10^{-8} \Omega \cdot m$).

12.3. Półprzewodniki samoistne

Sieć krystaliczna półprzewodnika w temperaturze wyższej od temperatury zera bezwzględnego drga. Te drgania cieplne są źródłem **generacji** termicznej par nośników **elektron-dziura**. Szybkość generacji swobodnych nośników ładunku zależy od temperatury oraz rodzaju stosownego materiału półprzewodnikowego. Ilość nośników ładunku swobodnego zawarta w jednostce objętości nazywa się koncentracją odpowiednio: $n [\text{m}^{-3}]$ elektronów oraz $p [\text{m}^{-3}]$ dziur.

Zjawisku jonizacji lub inaczej generacji termicznej par elektron – dziura towarzyszy zawsze zjawisko przechwytywania elektronów przez dziury. To zjawisko nazywamy **rekombinacją** nośników. W stanie równowagi termicznej oba procesy zachodzą z jednakową szybkością tzn. w tym samym czasie taka sama ilość par nośników jest generowana co rekombinuje. Podczas rekombinacji powracający z pasma przewodzenia do pasma walencyjnego elektron oddaje do otoczenia energię. Przy rekombinacji pośredniej (typowej np. dla Si i Ge) nadwyżka energii w postaci **fononu** jest zamieniona na drgania siatki krystalicznej (energia cieplna), a przy rekombinacji bezpośredniej (typowa np. dla GaAs) zostaje wypromieniowana w postaci **fotonu** o odpowiedniej długości fali (energia świetlna).

W idealnym kryształce półprzewodnika samoistnego (ang. intrinsic), np. krzemu, każdy elektron swobodny pozostawia w siatce krystalicznej dziurę, dlatego w danej temperaturze ($T = \text{const}$) spełniony jest warunek $n_i = p_i$ co oznacza, że:

$$n_i \cdot p_i = p_i^2(T) = n_i^2(T) = \text{const} \quad (12.2)$$

W warunkach równowagi termicznej koncentrację nośników można obliczyć korzystając ze statystyki Boltzmana:

$$n_i = p_i = A \cdot e^{\frac{-W_g}{2k \cdot T}} \quad (12.3)$$

gdzie:

k – stała Boltzmana

T – temperatura bezwzględna

A – stała materiałowa,

W_g – energia pasma zabronionego.

Stałe A i W_g to parametry charakterystyczne dla danego materiału półprzewodnikowego.

Jeżeli jest znana koncentracja ładunku w temperaturze T_1 koncentrację nośników w żądanej temperaturze T można obliczyć korzystając ze statystyki Fermiego-Diraca:

$$n_i^2 = n_{i1}^2 \left(\frac{T}{T_1} \right)^3 \cdot e^{\frac{W_g(T-T_1)}{k \cdot T \cdot T_1}} \quad (12.4)$$

gdzie

n_{i1} oznacza koncentracja swobodnych elektronów n_i w temperaturze T_1 .

Mała w porównaniu z metalami i zależna silnie od temperatury koncentracja nośników w półprzewodnikach samoistnych powoduje, że są one stosowane w technice wyłącznie do budowy specjalnych elementów elektronicznych. Do budowy diod, tranzystorów i większości innych przyrządów półprzewodnikowych stosuje się powszechnie **półprzewodniki niesamoistne (domieszkowane)**.

Tabela 12.2. Podstawowe materiały stosowane do budowy elementów półprzewodnikowych

Grupa	Półprzewodnik	Zastosowania
IV	Si, Ge, SiC	diody, tranzystory, fotoogniwa, fotodiody, fototranzystory, warystory (VDR)
III - V	GaP, GaAs, GaAsP, InSb, InAs	diody elektroluminescencyjne (LED), hallotrony, gausotrony
II - VI	CdS, CdSe, MgO	fotorezystory, termistory (NTC)
IV - VI	PbS, PbSe, PbTe	fotorezystory

Niektóre materiały półprzewodnikowe stosowane w elektronice i ich zastosowania przedstawiono w tabeli 12.2. Wymienione w niej symbole pierwiastków i związków chemicznych oznaczają następujące materiały:

Si – krzem, Ge – german, SiC – węglik krzemu, GaP – fosforek galu, GaAs – arsenek galu, GaAsP – fosforoarsenek galu, InSb – antymonek indu, InAs – arsenek indu, CdS – siarczek kadmu,

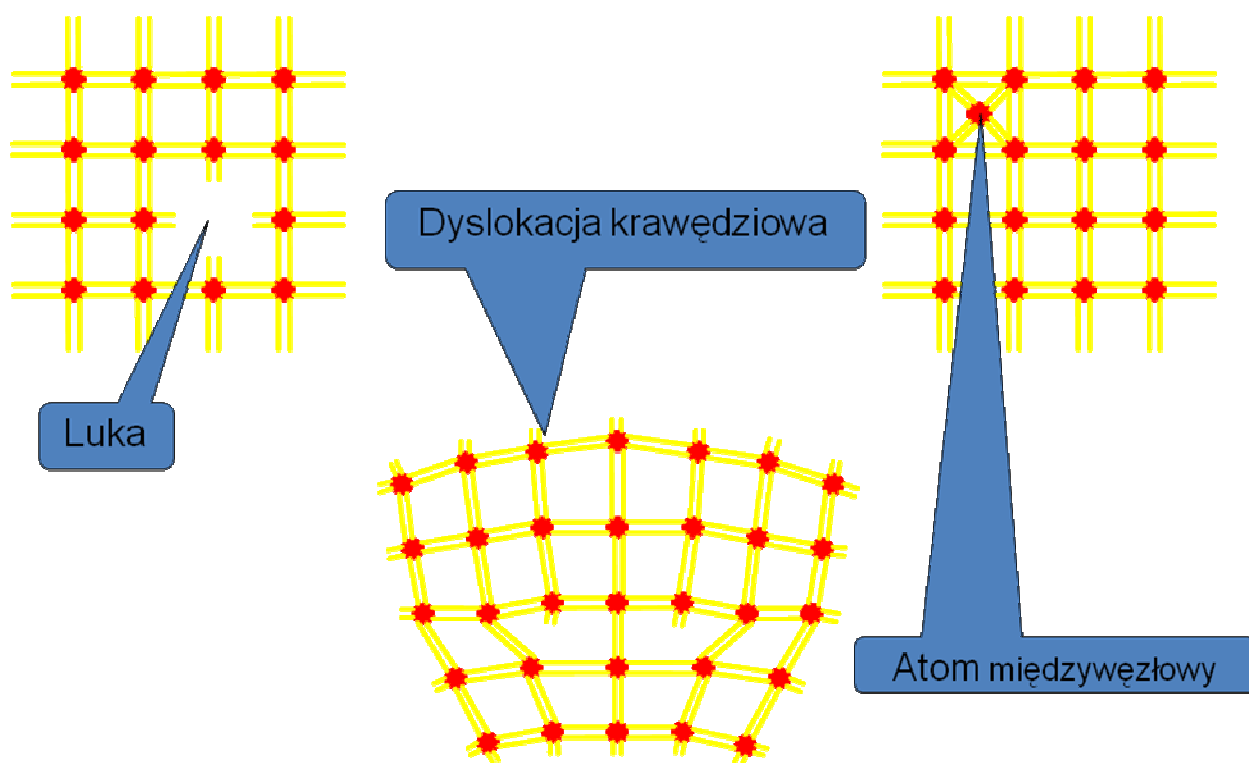
CdSe – selenek kadmu, MgO – tlenek magnezu, PbS – siarczek ołowiu, PbSe – selenek ołowiu, PbTe – telurek ołowiu.

12.4. Defekty sieci krystalicznej

W warunkach rzeczywistych, na skutek defektów sieci krystalicznej półprzewodnika powstają lokalne zmiany koncentracji nośników powodujące, że jeden rodzaj nośników przeważa.

Do najczęściej występujących defektów sieci krystalicznej zaliczamy:

- **zanieczyszczenia** – wtrącenie w przestrzeń pomiędzy węzłami siatki krystalicznej atomów innych pierwiastków,
- **luki** – brak atomów w niektórych węzłach siatki
- **domieszki** – zastąpienie w niektórych węzłach siatki krystalicznej atomów półprzewodnika atomami innego pierwiastka
- **dyslokacje** – przesunięci płaszczyzny krystalograficznej całej grupy atomów względem siebie.

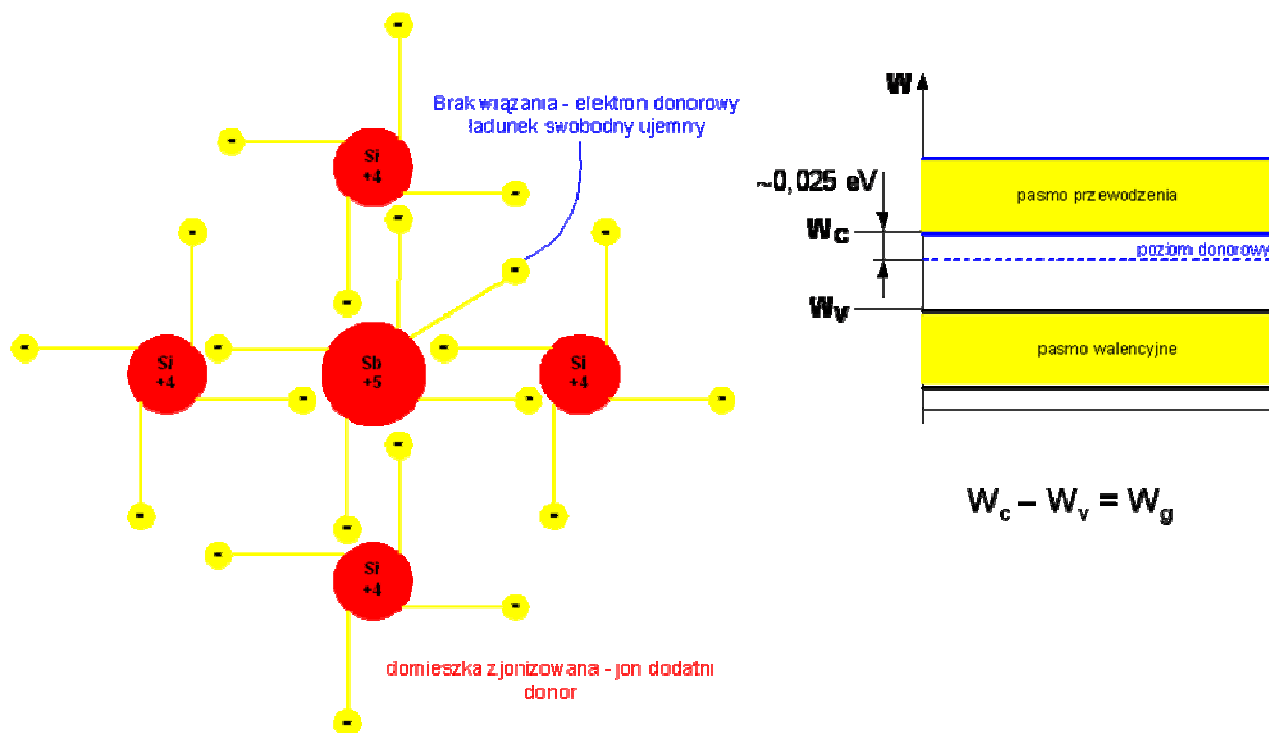


Rys. 12. 6. Przykłady defektów sieci krystalicznej

Wszystkie wymienione defekty siatki krystalicznej powodują, że w danym obszarze materiału półprzewodnikowego może przeważać ładunek dodatni i ten obszar półprzewodnika będziemy nazywać **półprzewodnikiem typu p** lub ładunek ujemny i wtedy powstanie **półprzewodnik typu n**. Wszystkie wymienione defekty powstają w trakcie wytwarzania monokryształów półprzewodnika lub podczas obróbki cieplnej, jakiej wymaga proces technologiczny przy produkcji elementów i przyrządów półprzewodnikowych. Wtrącenia obcych pierwiastków wprowadzane przypadkowo podczas procesu technologicznego w sposób nie kontrolowany i nie pożądany nazywamy **zanieczyszczeniami**. Wtrącenia wprowadzane celowo nazywamy **domieszkami**.

12.5. Półprzewodniki niesamoistne

Jeżeli do siatki krystalicznej półprzewodnika samoistnego (np. krzemu Si) wprowadzimy przez domieszkowanie małe ilości pierwiastka pięciowartościowego, np.: antymonu Sb (rys. 12.7.), arsenu As lub fosforu P, to w niektórych węzłach atomy półprzewodnika zostaną zamienione atomami domieszki. Te atomy nazywamy **donorami**, a koncentrację domieszki donorowej oznaczamy przez N_d . Piąty elektron walencyjny donorów nie bierze udziału w wiązaniach kowalentnych sieci i staje się elektronem swobodnym. Na wykresie pasmowym tego półprzewodnika pojawia się dodatkowy poziom energetyczny tzw. **poziom donorowy**. W temperaturze otoczenia około 300 K wszystkie atomy domieszki są zjonizowane tzn. elektrony z pasma donorowego znalazły się w paśmie przewodnictwa. Wytworzono **półprzewodnik typu n**.



Rys. 12.7. Ilustracja efektu wprowadzenia domieszki w postaci pierwiastka pięciowartościowego do struktury krzemu

Bilansując liczbę swobodnych elektronów w jednostce objętości domieszkowanego materiału półprzewodnikowego w określonej, stałej temperaturze otoczenia $T = \text{const}$ można napisać:

$$N_n = N_d + n \quad (12.5)$$

gdzie:

N_n – koncentracja swobodnych elektronów w półprzewodniku typu n, (tzn. niesamoistnym lub domieszkowanym),

N_d – koncentracja domieszki donorowej, która dostarcza do pasma przewodzenia po jednym swobodnym elektronie,

n – koncentracja elektronów swobodnych dostarczonych do pasma przewodzenia na skutek generacji termicznej, tzn. jonizacji termicznej atomów półprzewodnika i generacji par elektron – dziura.

W półprzewodniku typu n liczba swobodnych dziur w jednostce objętości domieszkowanego materiału półprzewodnikowego jest taka sama jak w materiale czystego, samoistnego półprzewodnika nie poddanego domieszkowaniu.

Zatem:

$$P_n = p \quad (12.6)$$

gdzie:

P_n – koncentracja dziur w półprzewodniku typu n

p – koncentracja dziur w półprzewodniku typu n na skutek generacji termicznej tzn. jonizacji termiczne atomów półprzewodnika i generacji par elektron – dziura, tworzących dodatni ładunek swobodny

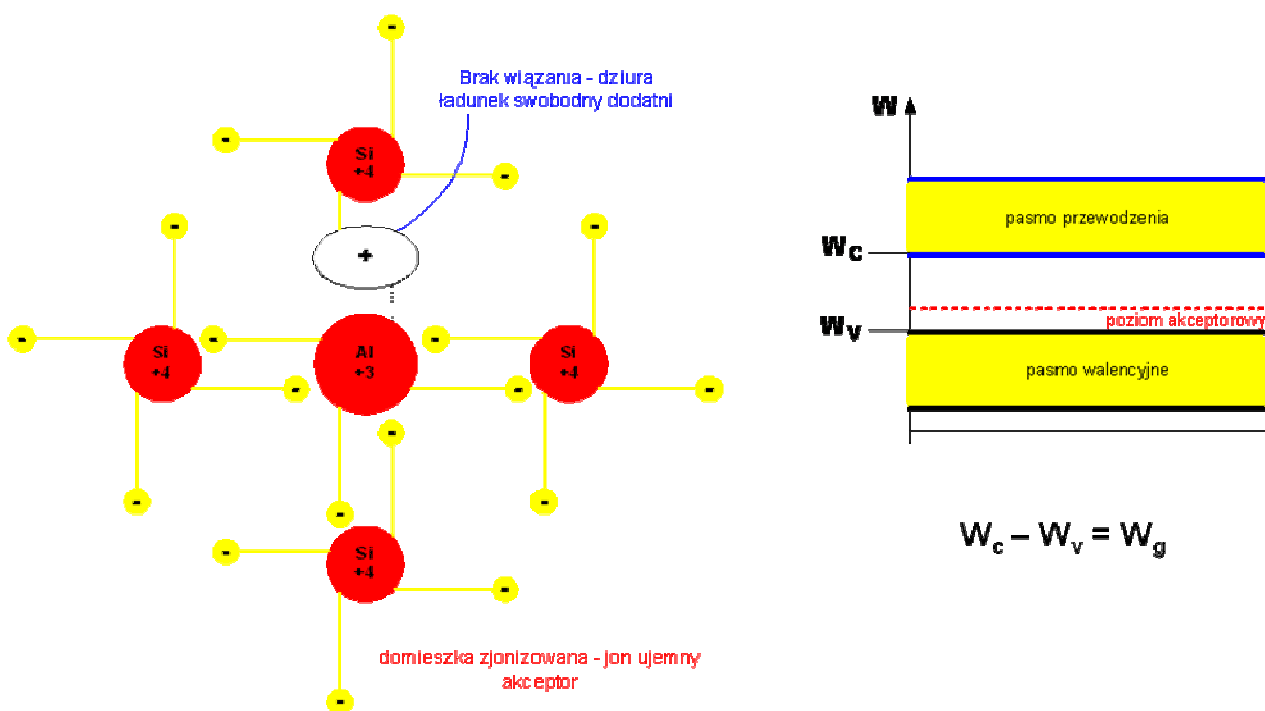
Jest oczywiste, że

$$p = n \quad (12.7)$$

Z zależności 12.5 –12.7 wynika, że w półprzewodniku typu n liczba elektronów swobodnych w paśmie przewodnictwa jest znacznie większa niż dziur w paśmie walencyjnym.

$$N_n \gg P_n \quad (12.8)$$

Wprowadzenie domieszki donorowej do półprzewodnika samoistnego spowodowało wielokrotny wzrost koncentracji elektronów swobodnych (donorowych) w paśmie przewodnictwa w stosunku do elektronów samoistnych powstających w procesie generacji termicznej par elektron-dziura.



Rys. 12.8 Ilustracja efektu wprowadzenia domieszki w postaci pierwiastka pięciowartościowego do struktury krzemu

Jeżeli do siatki krystalicznej półprzewodnika samoistnego (np. krzemu Si) wprowadzimy przez domieszkowanie małe ilości pierwiastka trójwartościowego, np.: glinu Al (rys. 12.8.), indu In lub galu Ga, to w niektórych węzłach atomy półprzewodnika zostaną zamienione atomami domieszki. Te atomy nazywamy **akceptorami**, a koncentrację domieszki akceptorowej oznaczmy przez N_a . Brak czwartego elektronu walencyjnego dekompletuje jedno z wiązań kowalencyjnych w siatce krystalicznej. Występujący tu brak elektronu może być uzupełniony elektronem z sąsiedniego wiązania. Powstaje w ten sposób dziura, która może przemieszczać się w kryształ podobnie jak elektron walencyjny, ale w zasadzie niezależnie od niego. W tym przypadku w pobliżu pasma walencyjnego powstaje poziom energetyczny zwany **poziomem**

akceptorowym. W temperaturze otoczenia około 300 K wszystkie atomy domieszki akceptorowej są zjonizowane. Wytworzono **półprzewodnik typu p.**

Teraz można napisać:

$$P_p = N_a + p \quad (12.9)$$

$$N_p = n \quad (12.10)$$

gdzie:

P_p – koncentracja swobodnych dziur w półprzewodniku typu p,

N_p – koncentracja swobodnych elektronów w półprzewodniku typu p,

N_a – koncentracja domieszki akceptorowej, która wytwarza w paśmie walencyjnym po jednej swobodnej dziurze,

n, p – koncentracja swobodnych elektronów (n) i dziur (p) na skutek generacji termicznej, przy czym $n = p$.

Zatem w półprzewodniku typu p liczba swobodnych dziur w paśmie walencyjnym jest znacznie większa od liczby swobodnych elektronów w paśmie przewodnictwa.

$$P_p \gg N_p \quad (12.11)$$

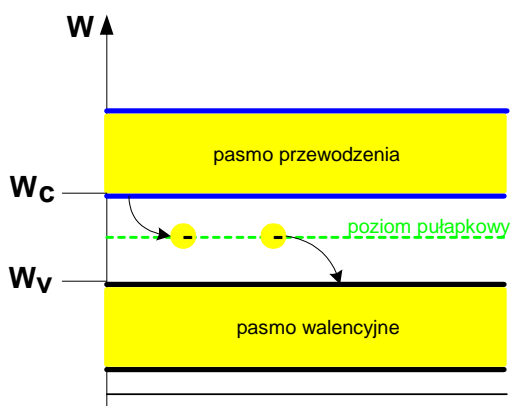
Wprowadzenie domieszki akceptorowej do półprzewodnika samoistnego spowodowało wielokrotny wzrost koncentracji swobodnych dziur (akceptorowych) w paśmie walencyjnym w stosunku do dziur samoistnych powstających w procesie generacji termicznej par elektron-dziura.

Obszar, w którym zachodzi bardzo silna (o kilka rzędów wielkości) zmiana koncentracji ładunku swobodnego nazywa się złączem. Szerokość złącza ma na ogół wymiar rzędu $10^{-7} - 10^{-6}$ m.

12.6. Generacja i rekombinacja

W stanie równowagi termicznej niezależnie od koncentracji domieszek w półprzewodniku spełniony jest tzw. warunek neutralności, który mówi, że w każdym punkcie obszaru półprzewodnika wypadkowy ładunek elektryczny jest równy zeru, a wszelkie zaburzenia warunku neutralności powodują powstanie pola elektrycznego przywracającego stan równowagi.

Odpowiedni poziom koncentracji nośników zapewnia **proces rekombinacji**. W półprzewodniku samoistnym polega on na bezpośrednim przejściu elektronu z pasma przewodnictwa do pasma walencyjnego. W półprzewodniku niesamoistnym proces ten jest bardziej złożony i odbywa się etapowo.



Rys. 12.9. Centra rekombinacji

Podczas przeskoku elektronu z pasma przewodnictwa do pasma walencyjnego przyjmuje on dodatkowe położenia, którym w modelu pasmowym odpowiadają poziomy energetyczne wewnątrz pasma zabronionego. Są to tzw. centra rekombinacji lub inaczej centra pułpkowe, które w czystych półprzewodnikach samoistnych stanowią defekty sieci krystalicznej, a w półprzewodnikach niesamoistnych dodatkowo także atomy

międzywęzłowe szczególnych domieszek np. złota lub miedzi. Ilustrację tego procesu przedstawiono na rys.12.9.

Proces rekombinacji jest opóźniony względem procesu generacji o krótki (rzędu mikrosekund), czas τ nazywany **czasem życia nośników**. Wartość tego czasu mówi o jakości struktury krystalicznej półprzewodnika oraz o stopniu jej uporządkowania. Obróbka termiczna w wysokich temperaturach skraca o rząd wielkości czas życia nośników. W czasie τ nośniki ładunku przebywają pewien odcinek drogi L nazywany **drogą dyfuzji**. Droga dyfuzji jest związana z czasem życia nośników równaniem:

$$L = \sqrt{D \cdot \tau} \quad (12.12)$$

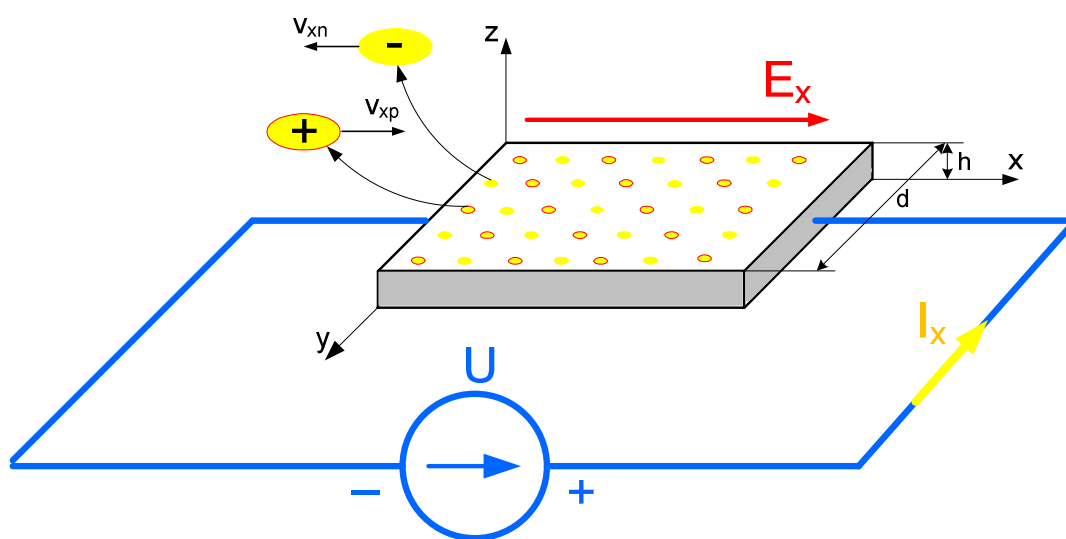
gdzie:

D – stała dyfuzji, oznaczana odpowiednio dla elektronów D_n , dla dziur D_p .

Dla krzemu w temperaturze pokojowej 300 K: $D_n = 35 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, $D_p = 12,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

12.7. Oddziaływanie pola elektrycznego na nośniki ładunku – konduktywność półprzewodnika

W warunkach równowagi termicznej ładunki swobodne w półprzewodniku jak w każdym ciele stałym poruszają się w sposób nie uporządkowany, chaotycznie we wszystkich kierunkach. W tym wypadku trudno jest wyróżnić jeden uprzywilejowany kierunek, w którym poruszałyby się przynajmniej większość ładunków, a zatem nie ma przepływu prądu.



Rys. 12.10. Płytką półprzewodnikowa

Jeżeli jednak w półprzewodniku zostanie wytworzone pole elektryczne np. wzdłuż osi x o natężeniu E_x to będzie ono oddziaływało na elektrony i dziury z siłą odpowiednio dla elektronów $F_x = -e \cdot E_x$, dla dziur $F_x = e \cdot E_x$. Pod wpływem tych sił wszystkie elektrony i dziury zaczną dryfować w kierunku pola przeciwnie do siebie, tzn. na chaotyczny ruch termiczny nałoży się ruch uporządkowany w kierunku osi x . W płytce popłynie prąd elektryczny I_x , którego kierunek określa ruch elektronów i który jest przeciwny do kierunku wytworzonego pola elektrycznego E_x . Pomimo działania stałej siły powodującej przyspieszanie elektronów i dziur ich ruch jest ciągle hamowany przez siły oddziaływania atomów siatki krystalicznej (mówimy w tym przypadku o zderzeniach z atomami półprzewodnika i domieszki, które tkwią w węzłach siatki krystalicznej).

Z tego powodu przyjmuje się, że prędkości unoszenia v_{xn} i v_{xp} są stałe i równe średniej wartości prędkości elektronu i dziury pomiędzy kolejnymi zderzeniami. Warto zauważyć, że wartości prędkości v_{xn} i v_{xp} są bardzo małe rzędu $10^{-4} - 10^{-3}$ m/s w porównaniu z prędkościami ruchu termicznego 10^5 m/s.

Zgodnie z definicją prądu mamy

$$i = \frac{dQ}{dt} \quad (12.13)$$

gdzie:

dQ – ładunek przepływający w czasie dt przez przekrój $S = d \cdot h$ półprzewodnika

$$dQ = n \cdot e \cdot v_{xn} \cdot dt \cdot S + p \cdot e \cdot v_{xp} \cdot dt \cdot S \quad (12.14)$$

Zatem gęstość prądu w przekroju S odpowiadająca czasowi dt wyrazi się wzorem

$$j_x = \frac{i}{S} = n \cdot e \cdot v_{xn} + p \cdot e \cdot v_{xp} \quad (12.15)$$

Ponieważ prawo Ohma w postaci różniczkowej ma postać

$$j_x = \gamma \cdot E_x \quad (12.16)$$

to przyrównując do siebie i przekształcając prawe strony równań otrzymujemy zależność na konduktywność półprzewodnika:

$$\gamma = e \cdot \left(n \frac{v_{xn}}{E_x} + p \frac{v_{xp}}{E_x} \right) \quad (12.17)$$

Parametry $\frac{v_{xn}}{E_x} = \mu_n$ oraz $\frac{v_{xp}}{E_x} = \mu_p$ nazywamy **ruchliwością nośników**, odpowiednio elektronów i dziur.

Dla elektronów ich wartości są w zakresie:

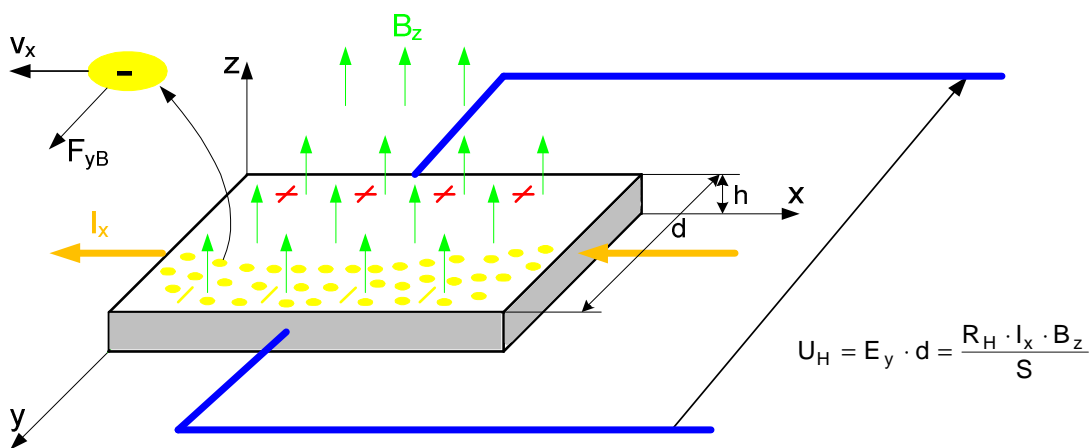
- dla metali $10^{-3} \div 10^{-2}$ m²/Vs,
- dla krzemu i germanu $4 \cdot 10^{-2} \div 4 \cdot 10^{-1}$ m²/Vs,
- dla półprzewodników z III – V grupy około 7 m²/Vs

i zmieniają się w funkcji temperatury.

Dla krzemu obowiązuje zależność $\mu_n = 3\mu_p$. W temperaturze 300 K: $\mu_n = 1350 \cdot 10^{-4}$ m²/Vs, $\mu_p = 450 \cdot 10^{-4}$ m²/Vs.

12.8. Oddziaływanie pola magnetycznego na nośniki ładunku w półprzewodniku-efekt Halla

Jeżeli płytka prostopadłościenna przedstawiona na rys. 12.11. jest wykonana z półprzewodnika typu n, to w kierunku osi x poruszają się z prędkością $-v_x$ ładunki swobodne ujemne (elektrony) tworząc prąd I_x . W kierunku prostopadłym do osi x, wzdłuż osi z, wytworzone zostało stałe pole magnetyczne o indukcji B_z . Pod wpływem tego pola tor ruchu poruszających się elektronów zostaje zakrzywiony w kierunku osi y.



Rys. 12.11. Przesunięcie się swobodnych elektronów w płytce półprzewodnikowej typu n umieszczonej w polu magnetycznym i elektrycznym, tzw. efekt Halla

Żeby zrównoważyć siłę $F_{yB} = v_x \cdot B_z$ powodującą dryfowanie elektronów w kierunku działania tej siły, wewnątrz płytki półprzewodnikowej powstaje pole elektryczne E_y o zwrocie przeciwnym do kierunku osi y. Pod wpływem tego pola na elektrony działa siła $F_{yE} = e \cdot E_y$ skierowana przeciwnie do siły F_{yB} . Kiedy siła F_{yE} jest równa co do wartości sile F_{yB} ustala się stan równowagi i elektrony mogą nadal przemieszczać się w płytce wzdłuż osi x. Powstawanie w tym doświadczeniu pola elektrycznego E_y nosi nazwę **efektu Halla**, a napięcie $U_H = E_y \cdot d$ nazywa się napięciem Halla. Jeżeli płytka półprzewodnikowa będzie typu p zmieniają się zwroty sił F_{yB} , F_{yE} oraz natężenia pola elektrycznego E_y i napięcia Halla U_H .

Zjawisko Halla znalazło praktyczne zastosowanie do badania przewodnictwa materiałów (w tym również metali) oraz do konstrukcji półprzewodnikowych czujników pola magnetycznego.

12.9. Transport nośników nadmiarowych w półprzewodniku niesamoistnym- Dyfuzja

W półprzewodniku typu n nośnikami nadmiarowymi są elektrony, a w półprzewodniku typu p dziury. Jeżeli w pewnej objętości półprzewodnika znajdzie się więcej nośników nadmiarowych niż w innym oznacza to, że ich koncentracje w różnych obszarach materiału są różne. W tym przypadku nośniki z obszaru o większej koncentracji będą się przesuwwały do obszaru o koncentracji mniejszej. Ten proces nazywamy **dyfuzją**. Dyfuzja jest naturalnym efektem przypadkowych ruchów poszczególnych nośników i występuje bez działania żadnej konwencjonalnej siły. Dyfuzja i unoszenie w polu elektrycznym to dwa podstawowe procesy transportu nośników w półprzewodnikach. W wyniku nierównomiernego rozkładu nośników w materiale półprzewodnika płynie prąd, który składa się z dwóch składników: prądu unoszenia pochodzącego od pola elektrycznego powstającego w wyniku rozsunienia się ładunków w przestrzeni oraz prądu dyfuzji.

W stanie równowagi termicznej suma prądu unoszenia i dyfuzji jest równa zero. Dokładniejsze badanie warunków równowagi pozwala wyznaczyć tzw. **zależność Einsteina** wiążącą ruchliwość ładunku ze współczynnikiem dyfuzji:

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{k \cdot T}{e} = U_T \quad (12.18)$$

Napięcie U_T jest nazywane **potencjałem elektrokinetycznym** i jak wynika z zależności (12.18) zależy wyłącznie od temperatury materiału. W temperaturze pokojowej około 300 K napięcie U_T jest równe około 25 mV.

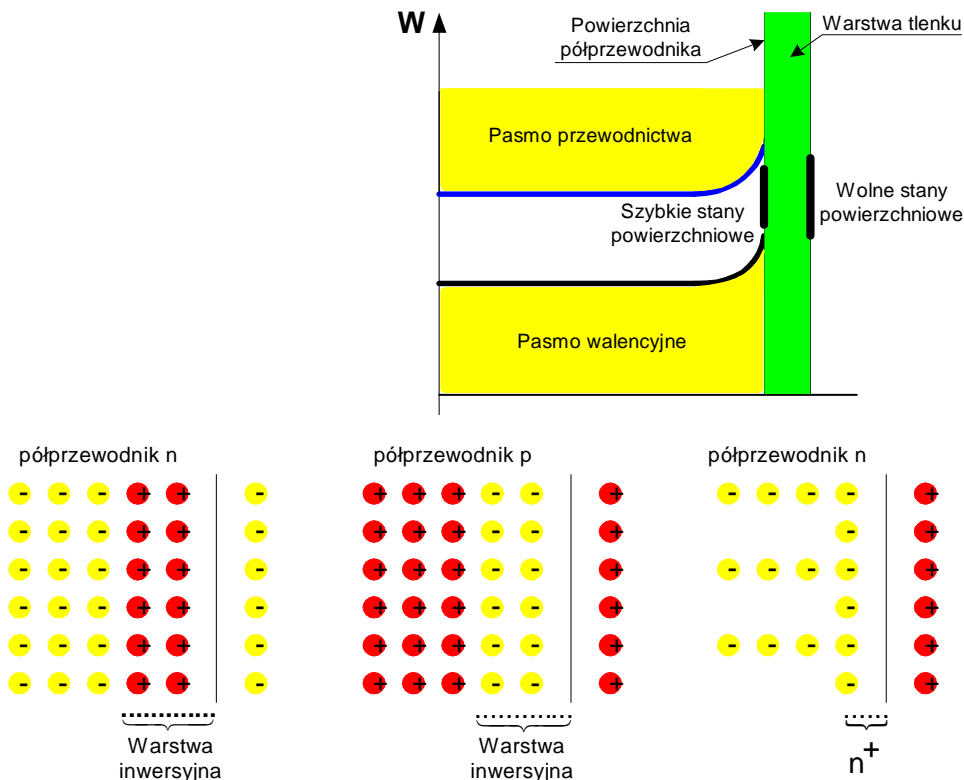
Kiedy występują niewielkie odchylenia koncentracji nośników od stanu równowagi, wypadkowe gęstości prądu elektronowego i dziurowego są określone wzorami:

$$J_n(x) = J_{un} + J_{dn} = e \cdot \mu_n \cdot n(x) \cdot E_x + e \cdot D_n \cdot \frac{dn(x)}{dx} \quad (12.19)$$

$$J_p(x) = J_{up} + J_{dp} = e \cdot \mu_p \cdot p(x) \cdot E_x - e \cdot D_p \cdot \frac{dp(x)}{dx} \quad (12.20)$$

12.10. Zjawiska powierzchniowe

Na powierzchni półprzewodnika występuje w sposób naturalny nieciągłość sieci krystalicznej. W modelu pasmowym oznacza to, że na granicy materiału pojawiają się tzw. **energetyczne stany powierzchniowe**, które mogą być obsadzone przez elektrony z pasma walencyjnego. Stany te są usytuowane w pobliżu środka pasma zabronionego.



Rys. 12.11. Zjawiska powierzchniowe na styku półprzewodnik – izolator

Wyróżnia się tzw. stany szybkie, powstające na powierzchni czystego półprzewodnika i stany wolne, w przypadku, gdy powierzchnia półprzewodnika pokryta jest warstwą tlenku. Stany powierzchniowe mogą być donorowe lub akceptorowe. Powodują one, że na powierzchni półprzewodnika w cienkiej warstwie o grubości od kilku do kilkudziesięciu angstrémów ($1 \text{ \AA} = 10^{-9} \text{ m}$) gromadzi się ładunek ujemny (elektrony) lub dodatni (dziury). W wyniku oddziaływania tej warstwy na ładunki znajdujące się wewnątrz półprzewodnika w pobliżu jego powierzchni powstaje tzw. warstwa inwersyjna ładunku przeciwnego znaku.

Grubość warstwy inwersyjnej jest funkcją wnikania pola elektrycznego w półprzewodnik, a ta jest określona wzorem Debeya

$$L_D = \sqrt{\frac{2 \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot k \cdot T}{N \cdot e^2}} \quad (12.21)$$

gdzie

ϵ – względna przenikalność elektryczna krzemu,

ϵ_0 – przenikalność elektryczna próżni,

N – koncentracja domieszki: donorowej N_d lub akceptorowej N_a .

Wartość L_D zawiera się w przedziale $10^{-10} - 10^{-8}$ m.

12.11. Szumy w półprzewodnikach

Trzy zjawiska fizyczne są źródłem niezdeterminowanych, chaotycznych i niepożądanych sygnałów występujących w materiałach, a w szczególności w półprzewodnikach stosowanych w elektronice, do budowy elementów elektronicz

nich: Są to

1. Szumy cieplne.
2. Szumy śrutowe.
3. Szumy strukturalne.

Szumy cieplne są spowodowane ciągłym, bezładnym ruchem swobodnych elektronów i dziur w materiale półprzewodnikowym. Wartość skuteczna napięcia, jakie w związku z tym ruchem powstaje, w zakresie częstotliwości Δf jest równa:

$$U_{sz} = 2\sqrt{k \cdot T \cdot R \cdot \Delta f} \quad (12.22)$$

gdzie R – rezystancja próbki materiału półprzewodnikowego.

Szumy śrutowe spowodowane są występowaniem statystycznych fluktuacji procesów związanych z generacją, rekombinacją i dyfuzją nośników ładunków w półprzewodniku podczas przepływu prądu. Wartość skuteczna zastępczego źródła prądu reprezentującego te szumy w zakresie częstotliwości Δf jest równa:

$$I_{sz} = \sqrt{2 \cdot e \cdot \Delta f \cdot I_0} \quad (12.23)$$

gdzie I_0 – składowa stała prądu przepływającego przez próbkę.

Szumy strukturalne, (czasem nazywane modulacyjnymi) wywołane są zjawiskami powierzchniowymi. Wartość skuteczna zastępczego źródła prądu reprezentującego te szumy w zakresie częstotliwości Δf maleje ze wzrostem częstotliwości i jest równa:

$$I_{sz} = A \cdot I_0 \frac{\Delta f}{f} \quad (12.24)$$

gdzie A – stała zależna od wymiarów i parametrów materiału półprzewodnikowego.

Ćwiczenia

Ćwiczenie 12.1

Przyjmując, że liczba atomów krzemu w 1 m^3 jest rzędu $4,99 \cdot 10^{28}$, szerokość pasma zabronionego $W_g = 1,12 \text{ eV}$, koncentracja elektronów w paśmie przewodnictwa w temperaturze $T_1 = 300 \text{ K}$ jest równa $n_{i1} = 1,5 \cdot 10^{16}$, oszacować temperaturę T , w której koncentracja swobodnych elektronów w 1 m^3 osiągnie wartość $n_i = 10^{20}$. Stała Boltzmanna $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$.

Rozwiązanie:

Zależność określająca związek pomiędzy koncentracją elektronów w danej temperaturze T względem temperatury odniesienia T_1 opisana wzorem (12.1):

$$n_i^2 = n_{i1}^2 \left(\frac{T}{T_1}\right)^3 \cdot e^{-\frac{W_g(T-T_1)}{k \cdot T \cdot T_1}}$$

ma postać uwikłaną i nie można z niej wyznaczyć prostymi metodami temperatury T . Jeżeli jednak, przyjmując np., że temperatura T zmienia się w zakresie 300-1000 K, zauważymy, że dla temperatur $T > T_1$ dominującym czynnikiem w równaniu (1) jest czynnik wykładniczy, to pomijając w tej zależności czynnik $(\frac{T}{T_1})^3$ otrzymujemy:

$$n_i^2 \approx n_{i1}^2 \cdot e^{\frac{W_g(T-T_1)}{kTT_1}},$$

a po przekształceniu

$$T \approx \frac{T_1}{1 - \frac{kT_1}{W_g} \ln \frac{n_i^2}{n_{i1}^2}} = 506 \text{ K}$$

Odp. Poszukiwana temperatura $T = 506 \text{ K}$ (233°C).

Ćwiczenie 12.2

Płytkę krzemu jest domieszkowana atomami akceptorowymi. Koncentracja domieszki $N_a = 3 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-3}$. Oszacować koncentrację dziur i elektronów swobodnych w temperaturze pokojowej 27°C , jeżeli koncentracja nośników samoistnych jest równa $n_i = 1,5 \cdot 10^{16} \text{ m}^{-3}$.

Rozwiązanie:

$$P_p = N_a + p \approx N_a = 3 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-3}$$

$$N_p = \frac{n_i^2}{N_a} = 7,5 \cdot 10^9 \text{ m}^{-3}$$

Odp. Koncentracja swobodnych dziur jest w przybliżeniu taka, jak koncentracja domieszki akceptorowej $P_p = 3 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-3}$. Ponieważ wprowadzenie do krzemu domieszki akceptorowej zwiększyło koncentrację swobodnych dziur to tym samym zmniejszyła się koncentracja swobodnych elektronów $N_p = 7,5 \cdot 10^9 \text{ m}^{-3}$.

Ćwiczenie 12.3

Obliczyć, ile razy zmieni się grubość warstwy inwersyjnej w płytce krzemowej pracującej w temperaturze $t_1 = 27^\circ \text{C}$, domieszkowanej atomami donorowymi o koncentracji $N_d = 5 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$, jeżeli temperatura pracy wzrośnie do $t_2 = 47^\circ \text{C}$.

Rozwiązanie:

$$T_1 = t_1 + 273^\circ \text{C} = 300 \text{ K}$$

$$T_2 = t_2 + 273^\circ \text{C} = 320 \text{ K}$$

Grubość warstwy inwersyjnej L_D w płytce krzemowej domieszkowanej atomami donorowymi można obliczyć ze wzoru:

$$L_D = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0 kT}{N_d e^2}}$$

gdzie $\epsilon = 11,5$ względna przenikalność elektryczna krzemu, $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m przenikalność elektryczna próżni, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K stała Boltzmanna, T temperatura bezwzględna, N_d koncentracja domieszki donorowej, $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C ładunek elementarny. Korzystając zatem z tej zależności możemy napisać:

$$\frac{L_{D1}}{L_{D2}} = \sqrt{\frac{T_1}{T_2}}$$

Po wstawieniu danych otrzymujemy:

$$\frac{L_{D1}}{L_{D2}} = \sqrt{\frac{300}{320}} = 0,968$$

Odp. Grubość warstwy inwersyjnej zmniejszy się

Zadania sprawdzające

Zadanie 12.1.

Obliczyć całkowitą energię elektronu znajdującego się na trzeciej orbicie w atomie krzemu. Liczba atomowa krzemu $Z = 14$. Pozostałe stałe fizyczne: ładunek elementarny $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C, masa elektronu $m_e = 1,78 \cdot 10^{-31}$ kg, stała Plancka $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ J·s, przenikalność elektryczna próżni $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m.

Odp. $662,544 \cdot 10^{-18}$ J (około 414 eV)

Zadanie 12.2.

Przyjmując, że liczba atomów krzemu w 1 m^3 jest rzędu $4,99 \cdot 10^{28}$, szerokość pasma zabronionego $W_g = 1,12$ eV, koncentracja elektronów w paśmie przewodnictwa w temperaturze $T_1 = 300$ K jest równa $n_{i1} = 1,5 \cdot 10^{16}$ oszacować koncentracja swobodnych elektronów w 1 m^3 w temperaturze 250 K i 350 K. Stała Boltzmanna $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K.

Odp. Około $0,9997n_{i1}$ (dla 250 K) oraz $1,00039n_{i1}$ (dla 350 K).

Zadanie 12.3.

Jaka konduktywność ma próbka z czystego krzemu i domieszkowana atomami akceptorowymi, jeżeli koncentracja domieszki $N_a = 10^{24} \text{ m}^{-3}$. Temperatura otoczenia 300 K, $\mu_n = 1350 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\mu_p = 450 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{Vs}$

Odp.

Zadanie 12.4.

Płytką krzemu jest domieszkowana atomami donorowymi. Koncentracja domieszki $N_d = 2 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-3}$. Oszacować koncentrację dziur i elektronów swobodnych w temperaturze pokojowej 27°C , jeżeli koncentracja nośników samoistnych w tej temperaturze jest równa $n_i = 1,5 \cdot 10^{16} \text{ m}^{-3}$.

Odp. $N_n \approx N_d = 2 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-3}$, $P_n = 4,5 \cdot 10^{10} \text{ m}^{-3}$

Zadanie 12.5.

Narysować wykres zależności potencjału termokinetycznego U_T od temperatury w zakresie $\pm 40^\circ\text{C}$. Ładunek elementarny $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, stała Boltzmanna $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$.

Odp.

t	$^\circ\text{C}$	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40
U_T	mV	20,07	20,93	21,80	22,66	23,52	24,38	25,24	26,10	26,96

Zadanie 12.6.

Wiedząc, że w temperaturze 300 K ruchliwość elektronów jest równa $\mu_n = 1350 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{Vs}$ obliczyć dla tej temperatury stałą dyfuzji. Ładunek elementarny $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, stała Boltzmanna $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$.

Odp. $D_n = 3,488 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$

Zadanie 12.7.

Obliczyć drogę dyfuzji elektronu i dziury w krzemie w temperaturze 300 K, jeżeli średni czas życia nośników jest równy 200 ns. W temperaturze 300 K $\mu_n = 1350 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\mu_p = 450 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{Vs}$.

Odp. Dla elektronu $L_n = 26,4 \text{ }\mu\text{m}$, dla dziur $L_p = 15,3 \text{ }\mu\text{m}$

Zadanie 12.8.

Jaką częstotliwość i długość fali powinno mieć padające na płytkę krzemową światło, aby wystąpiło zjawisko fotojonizacji?

Odp. $f = 270 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$, $\lambda = 1 \text{ nm}$

Zadanie 12.9.

Próbkę krzemu domieszkowanego atomami boru ($N_a = 10^{15} \text{ m}^{-3}$) domieszkowano dodatkowo atomami fosforu ($N_d = 10^{23} \text{ m}^{-3}$). Obliczyć koncentrację swobodnych elektronów i dziur przed i po domieszkowaniu fosforem.

Odp.

Zadanie 12.10.

Jaka grubość ma warstwa inwersyjna, jeżeli płytka krzemowa pracuje w temperaturze 300 K i jest domieszkowana atomami aluminium ($N_a = 3 \cdot 10^{22}$). Względna przenikalność elektryczna krzemu

$\epsilon = 11,7$ oraz ładunek elementarny $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C, przenikalność elektryczna próżni $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m, stała Boltzmann $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K.

Odp. 33 nm

Test do wykładu 12

12.1. Materiały krystaliczne dzielimy na izolatory, przewodniki i półprzewodniki ze względu na:

- xa) zdolność przewodzenia prądu elektrycznego
- b) moc
- c) wytrzymałość napięciową

12.2. Model atomu krzemu zawiera w warstwie trzeciej:

- a) 2 elektrony
- xb) 4 elektrony
- c) 8 elektronów

12.3. Energia jonizacji atomu może pochodzić:

- a) od naświetlenia
- xb) od podgrzania, naświetlenia i przyspieszenia nośników ładunku w polu elektrycznym
- c) od działania siły grawitacji

12.4. Prąd elektronowy jest związany:

- a) z poruszającym się ładunkiem dodatnim wytworzonym przez dziury
- b) z ruchem swobodnych elektronów i dziur jednocześnie
- xc) z poruszającym się ładunkiem ujemnym wytworzony przez swobodne elektrony

12.5. Całkowita energia elektronu odosobnionego jest proporcjonalna:

- xa) do liczby atomowej pierwiastka
- b) do numeru orbity na której znajduje się elektron
- c) do temperatury otoczenia

12.6. Najszersze pasmo zabronione występuje w materiałach:

- a) przewodnikowych
- b) półprzewodnikowych
- xc) izolacyjnych

12.7. Rekombinacja nośników polega:

- a) na zwiększaniu się liczby elektronów swobodnych w wyniku drgań siatki krystalicznej
- xb) na przechwytywaniu elektronów przez dziury
- c) tworzeniu par dziura - elektron

12.8. Defekt sieci krystalicznej zwany zanieczyszczeniem jest spowodowany:

- xa) wtrąceniem w przestrzeń między węzłami siatki krystalicznej atomów innych pierwiastków
- b) brakiem atomów w niektórych węzłach siatki
- c) zastąpieniem, w niektórych węzłach siatki krystalicznej, atomów półprzewodnika atomami innego pierwiastka

12.9. Konduktywność półprzewodnika zależy:

- a) tylko od ruchliwości elektronów
- b) tylko od ruchliwości dziur
- xc) zarówno od ruchliwości elektronów jak i dziur

12.10. Efekt Halla polega na:

- xa) na wytworzeniu napięcia elektrycznego na skutek przyłożonego pola magnetycznego
- b) powstaniem pola magnetycznego na skutek przyłożonego napięcia
- c) generacją światła na skutek przyłożonego pola magnetycznego

12.11. Potencjał elektrokinetyczny zależy:

- a) od temperatury względnej materiału
- b) od wielkości pola magnetycznego w którym umieszczono materiał
- xc) od temperatury bezwzględnej materiału

Odpowiedzi do testu: 12.1a, 12.2b, 12.3b, 12.4c, 12.5a, 12.6c, 12.7b, 12.8a, 12.9c, 12.10a, 12.11c