

Półprzewodniki



Półprzewodniki to materiały, których rezystywność* jest większa niż rezystywność przewodników (metali) oraz mniejsza niż rezystywność izolatorów (dielektryków).

Przykłady:

miedź - doskonały przewodnik - ma rezystywność $10^{-8} \Omega\text{m}$

mika - bardzo dobry izolator - ma rezystywność ok. $10^{14} \Omega\text{m}$

krzem - najpowszechniej stosowany półprzewodnik - ma rezystywność ok. $2 \times 10^3 \Omega\text{m}$

Ta definicja ta jest uproszczona bowiem.....

**Rezystywność (inaczej: opór właściwy, oporność właściwa) jest to rezystancja bryły materiału o długości 1 m i o polu przekroju 1 m^2 .*

Istnieje duża jakościowa różnica między właściwościami elektrofizycznymi półprzewodników, przewodników i dielektryków.

Podstawowe własności różniące półprzewodniki i przewodniki:

- rezystywność półprzewodników silnie zależy od znikomo małych zanieczyszczeń materiału (zanieczyszczenia wprowadzane celowo nazywa się domieszkami);
- na rezystywność półprzewodników duży wpływ ma różnego rodzaju promieniowanie zewnętrzne;
- temperaturowy współczynnik rezystancji półprzewodników ma duże ujemne wartości (ze wzrostem temperatury rezystywność półprzewodnika maleje o ok. 5-10% na 1°C)

Temperaturowy współczynnik rezystancji w przewodnikach ma wartości małe i na ogół dodatnie (ze wzrostem temperatury rezystywność zwiększa się o ok. 0,3-0,6% na 1°C).

Krzem Si (silicium)

Podstawowym materiałem półprzewodnikowy

Krzem stanowi ok. 28% skorupy ziemskiej

Występuje w postaci utlenionej jako składnik piasku i skał (krzemionka)

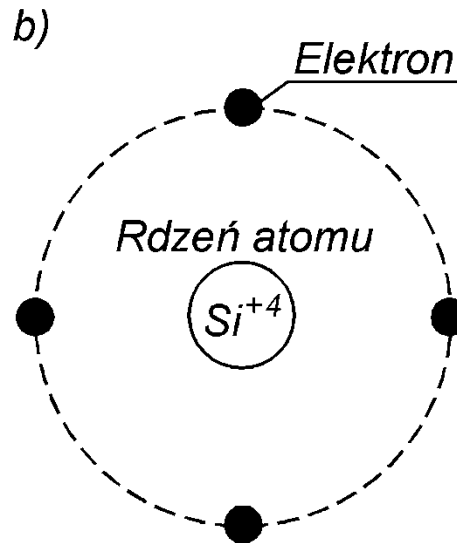
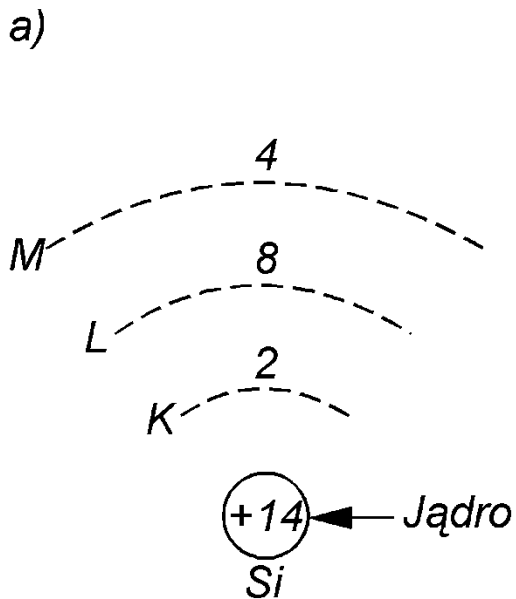
Czternasty pierwiastek w układzie okresowego

5 B	6 C	7 N
13 Al	14 Si	15 P
31 Ga	32 Ge	33 As
49 In	50 Sn	51 Sb

krzem

Do wykorzystania krzemu w elektronice niezbędne jest posiadanie tego materiału w postaci monokryształu





- Schematyczna ilustracja struktury atomu krzemu:
- a) z uwzględnieniem wszystkich orbit elektronowych
 - b) w postaci rdzenia atomu i czterech elektronów na orbicie walencyjnej

Atomu Si na powłoce K ma 2 elektrony, na L ma 8 elektronów, a na M ma 4 elektrony

Elektrony ulokowane na zewnętrznej powłoce określa się jako walencyjne. Są one najslabiej związane z jądrem i biorą udział we wszelkich wiązaniach atomu z innymi atomami i decydują o właściwościach pierwiastka.

Dlatego dla uproszczenia atom krzemu przedstawiony w postaci czterech elektronów na orbicie walencyjnej i tzw. rdzenia atomu Si^{+4} zawierającego jądro wraz ze wszystkimi elektronami orbit wewnętrznych.

W ciałach stałych odległości między atomami są małe, dlatego istnieją duże siły wzajemnego oddziaływania. Powoduje to uporządkowanie atomów w regularną sieć o komórkach okresowo powtarzających się w przestrzeni.

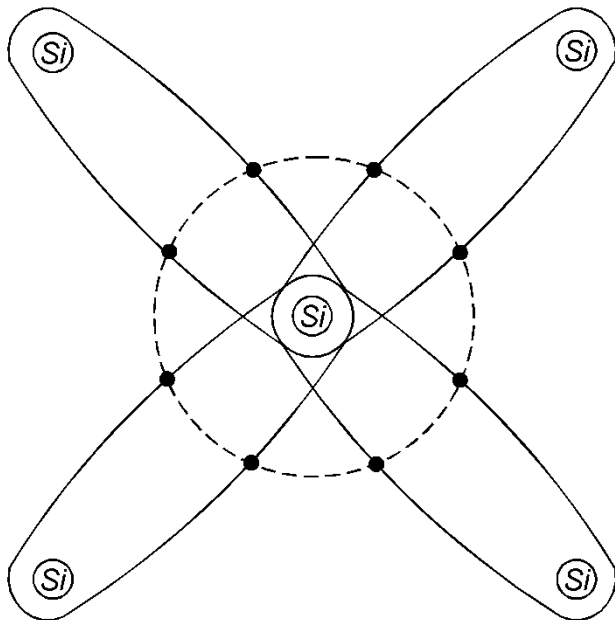
Sieć taka zwana jest siecią krystaliczną.

Jeśli okresowe uporządkowanie budowy jest zachowane w całej bryle ciała stałego, to taki materiał nazywamy monokryształem.

Wiązania międzyatomowe w krzemie są typu kowalencyjnego.

Ten typ wiązań występuje we wszystkich półprzewodnikach.

Atom krzemu ma trwałą (najbardziej korzystną energetycznie) strukturę ośmioelektronową, gdyż oprócz własnych czterech elektronów walencyjnych ma dodatkowe cztery elektrony walencyjne wspólne dla czterech atomów sąsiednich.

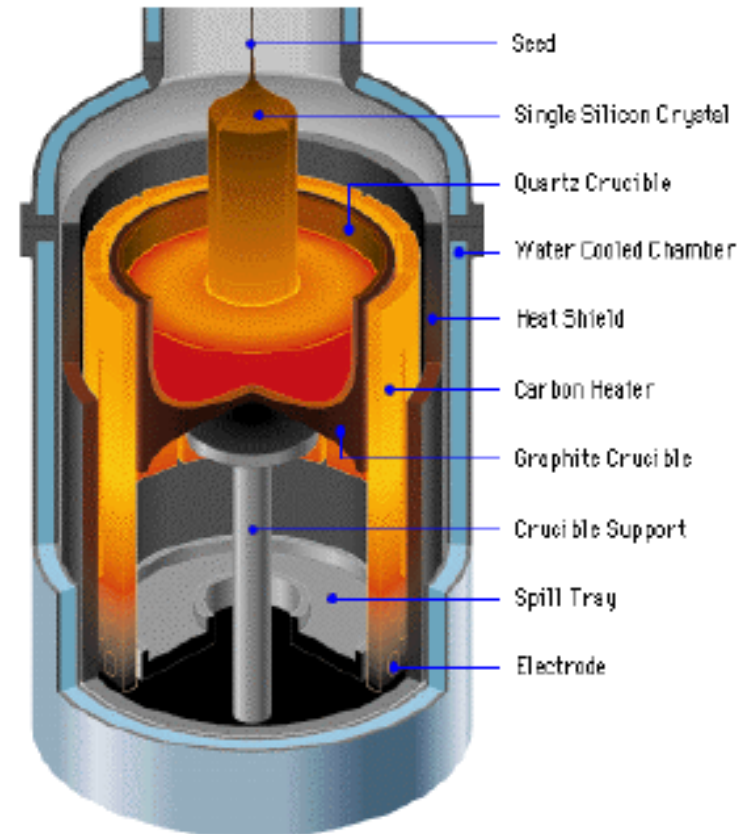


Płaski model wiązań kowalencyjnych atomu krzemu z czterema atomami sąsiednimi

Otrzymywanie monokrystalicznego krzemu

Metoda Czochralskiego

- ❖ Polikrystaliczny Si topi się w tyglu kwarcowym w 1420°C ;
- ❖ Proces odbywa się w argonie
- ❖ Zarodek – monokryształ Si – umieszczony jest w stopionym krzemie i powoli obracany w trakcie wyciągania



materiał dodatkowy



Wojciech Wawrzyński – Półprzewodniki

Profesor Jan Czochralski (1885-1953)

W latach 1906 – 1928 pracuje w Niemczech. W 1916 r. odkrywa metodę krystalizacji metali, wykorzystywaną obecnie do produkcji monokryształów krzemu na całym świecie.

W 1928 r. na osobiste zaproszenie prezydenta Ignacego Mościckiego powraca do Polski (odrzucając propozycję zastania dyrektorem fabryki u Forda w USA).

Obejmuje Instytut Metalurgii i Metaloznawstwa na Wydziale Chemicznym Politechniki Warszawskiej.



W czasie okupacji uzyskał od Niemców pozwolenie i uruchomił w Warszawie na bazie przedwojennego instytutu Politechniki Zakład Badań Materiałów. Nastąpiło to za zgodą władz konspiracyjnych Politechniki i miało na celu ochronę pracowników uczelni i wyposażenia.

Po wojnie prześladowany, nie mógł się bronić i ujawnić swojej współpracy z AK, za którą groziły mu kolejne represje.

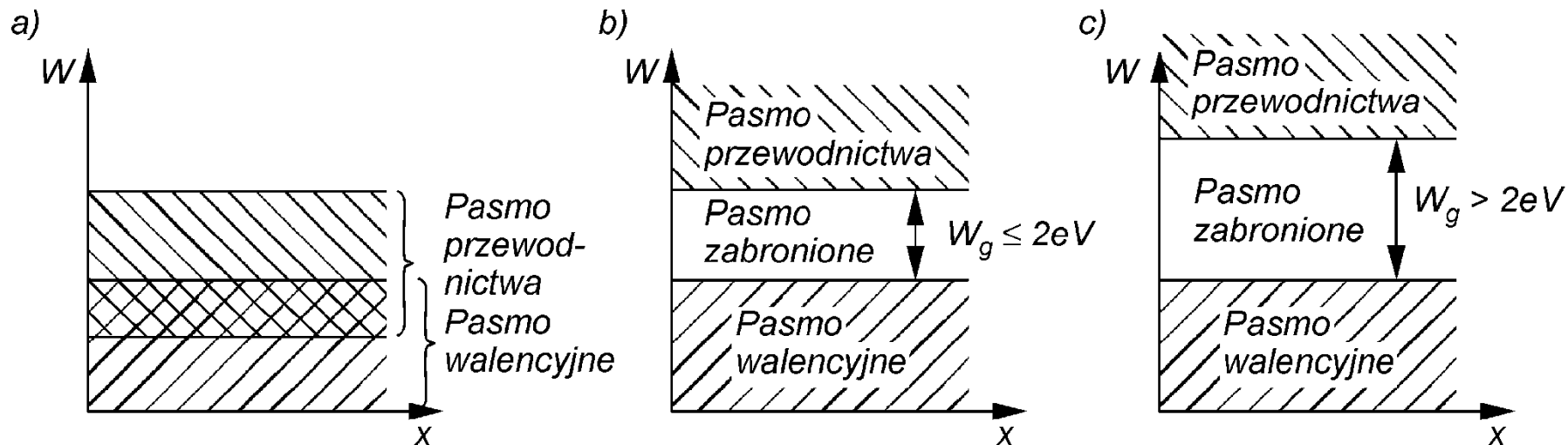
Zmarł w rodzinnej Kcyni, ale dopiero w 1998 r. na anonimowym grobie umieszczono tablicę z nazwiskiem.

ENERGETYCZNY MODEL PASMOWY CIAŁ STAŁYCH

W kryształach na skutek wzajemnych oddziaływań atomów, następuje rozszczepienie poziomów energetycznych i otrzymuje się pasma o dozwolonych lub niedozwolonych poziomach w ramach danego zakresu zmian energii.

Właściwości elektryczne półprzewodnika zależą od zjawisk zachodzących w pasmie walencyjnym i kolejnym wyższym pasmie dozwolonych energii tj w pasmie przewodnictwa, model pasmowy ogranicza się do przedstawienia tych właśnie dwu pasm.

Odstęp między wierzchołkiem pasma walencyjnego, a dnem pasma przewodnictwa jest nazywany pasmem zabronionym.



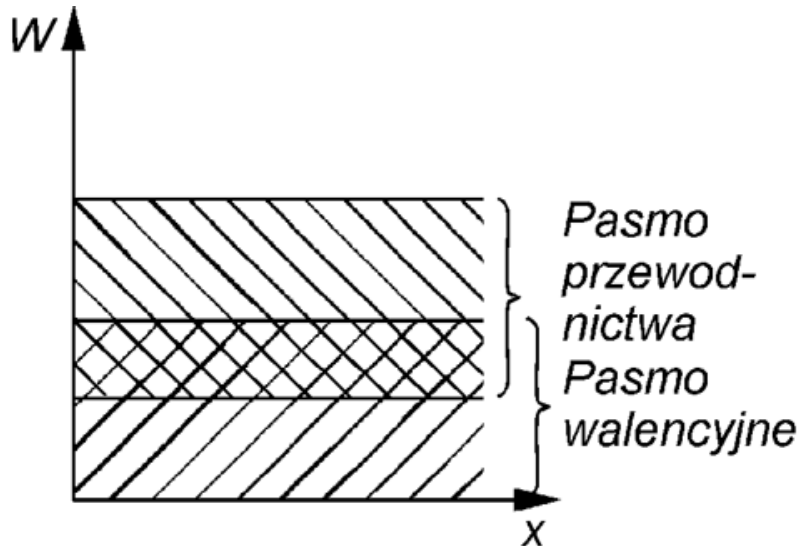
Energetyczny model pasmowy: a) dla przewodnika, b) dla półprzewodnika, c) dla dielektryka; W – energia, x – wymiar w głąb struktury ciała stałego

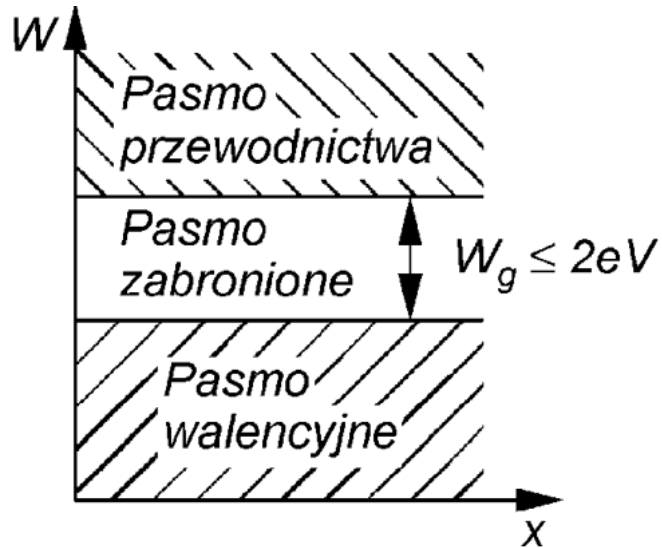
Elektronowolt (eV) jest jednostką energii stosowaną w elektronice. Jest to energia uzyskana przez elektron pod wpływem potencjału 1 V ($1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$).

W energetycznym modelu pasmowym przewodnika (metal) nie ma pasma zabronionego.

Pasmo walencyjne i pasmo przewodnictwa wzajemnie zachodzą na siebie.

Wszystkie elektrony walencyjne są nośnikami swobodnymi i proces przewodzenia prądu nie musi być poprzedzony dostarczeniem odpowiedniej energii do pokonania pasma zabronionego ponieważ pasma zabronionego nie ma.





W energetycznym modelu pasmowym półprzewodnika występuje pasmo walencyjne, pasmo zabronione i pasmo przewodnictwa.

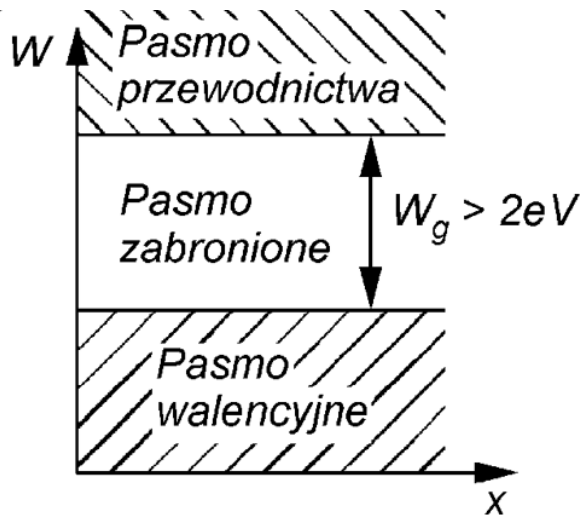
W temperaturze zera bezwzględnej pasmo walencyjne półprzewodnika jest całkowicie wypełnione elektronami a pasmo przewodnictwa jest całkowicie puste.

W miarę wzrostu temperatury część elektronów z pasma walencyjnego pokonuje pasmo zabronione i przeskakuje do pasma przewodnictwa, pozostawiając w pasmie walencyjnym wolne miejsca zwane dziurami.

Taki proces jest nazywany generacją par elektron dziura.

Szerokość pasma zabronionego jest wartością energii, jaką trzeba dostarczyć do sieci krystalicznej, aby proces generacji par elektron - dziura miał miejsce.

W energetycznym modelu pasmowym dielektryka występuje pasmo walencyjne, pasmo zabronione i pasmo przewodnictwa.



Dielektryki różnią się od półprzewodników tym, że mają większą szerokość pasma zabronionego.

Oznacza to, że w tych samych warunkach mniejsze jest prawdopodobieństwo przeskoku elektronów z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa.

Brak nośników w pasmie przewodnictwa powoduje, że rezystywność materiału jest bardzo duża.

WYJAŚNIENIE POJĘCIA DZIURY

Dziura jest zerwanym wiązaniem kowalencyjnym dwóch atomów, powstałym wskutek wyrwania elektronu z tego wiązania.

W tych warunkach istnieje duże prawdopodobieństwo przejścia elektronu z jednego z sąsiednich wiązań międzyatomowych do luki utworzonej w zerwanym wiązaniu.

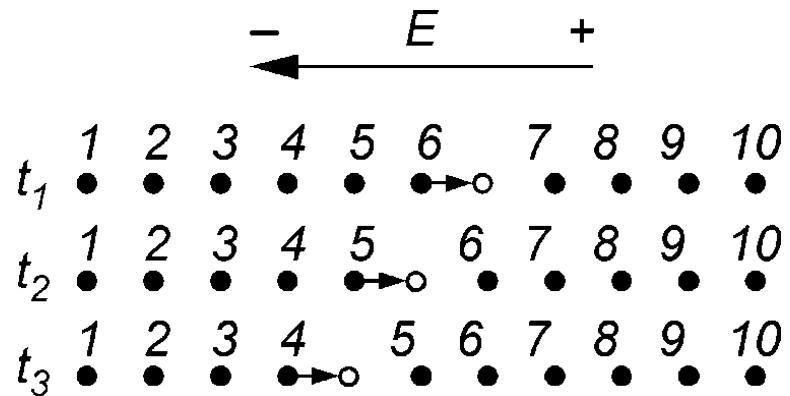
Takiemu przejściu elektronu odpowiada przesunięcie dziury w kierunku przeciwnym.

W przypadku braku zewnętrznego pola elektrycznego ruch dziur jest nieuporządkowany.

W przypadku działania pola elektrycznego następują kolejne przesunięcia elektronów z wiązań kowalencyjnych do sąsiednich luk w zerwanych wiązaniach.

Kierunek tego „sztafetowego” ruchu elektronów ma składową zgodną z kierunkiem działania pola elektrycznego.

Opis takiego „sztafetowego” ruchu elektronów zajmujących kolejno puste miejsca w zerwanych wiązaniach byłby bardzo trudny. Dlatego dla uproszczenia wprowadzono pojęcie dziury.



Ilustracja transportu dziury; $t_1 < t_2 < t_3$

Dziurze przypisano ładunek dodatni, równy co do wielkości bezwzględnej ładunkowi elektronu

W modelu pasmowym dziura jest pustym poziomem energetycznym w pasmie walencyjnym.

PÓŁPRZEWODNIK SAMOISTNY I NIESAMOISTNY

Półprzewodnik idealnie czysty, nie mający żadnych domieszek i defektów sieci krystalicznej nazywamy samoistnym.

Ilość elektronów w półprzewodniku samoistnym jest zawsze równa ilości dziur:

$$n_i = p_i$$

**n_i - koncentracja elektronów, p_i - koncentracja dziur;
indeks i od ang. *intrinsic* – *samoistny***

Materiały półprzewodnikowe mają zanieczyszczenia wprowadzane umyślnie nazywane domieszkami. Takie półprzewodniki nazywamy niesamoistnymi.

W półprzewodnikach niesamoistnych obok zjawiska samoistnego powstawania swobodnych elektronów i dziur, istotną rolę odgrywają dodatkowe mechanizmy powstawania nośników swobodnych ładunku.

PÓŁPRZEWODNIK TYPU n

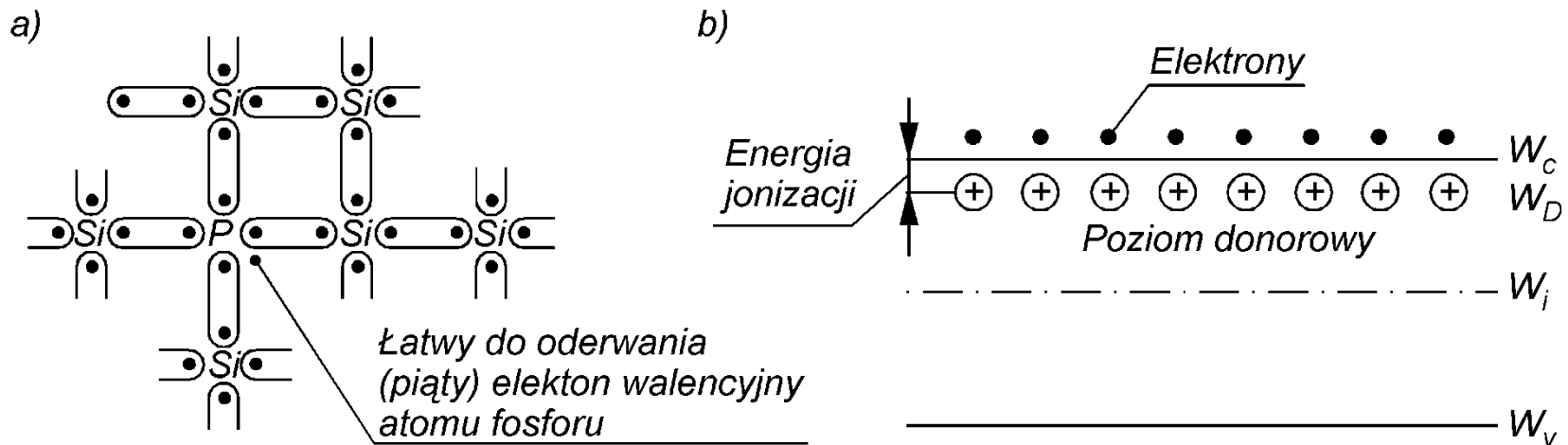
Powstaje poprzez wprowadzenie do półprzewodnika samoistnego domieszki donorowej.

Domieszkami donorowymi są pierwiastki piątej grupy układu okresowego.

Mają one pięć elektronów walencyjnych, a więc o jeden więcej niż krzem.

Najczęściej stosowany jest fosfor P, rzadziej arsen As i antymon Sb

5 B	6 C	7 N
13 Al	14 Si	15 P
31 Ga	32 Ge	33 As
49 In	50 Sn	51 Sb



Półprzewodnik typu n. Atom domieszki donorowej w węźle sieci krystalicznej krzemu: a) model wiązań kowalencyjnych, b) energetyczny model pasmowy

Atom domieszki donorowej zajmuje położenie w węźle sieci krystalicznej krzemu, zamiast atomu krzemu.

Cztery elektrony walencyjne biorą udział w wiązaniach kowalencyjnych z czterema sąsiadującymi atomami krzemu, natomiast piąty elektron nie zaabsorbowany wiązaniem może być łatwo oderwany.

Oderwanie tego elektronu oznacza w modelu pasmowym jego przejście do pasma przewodnictwa, stąd nazwa „domieszka donorowa” (donor - dawca).

W węźle sieci krystalicznej pozostaje wtedy zjonizowany dodatnio atom fosforu

Energia jonizacji jest bardzo mała w porównaniu z szerokością pasma zabronionego (poziomy donorowe znajdują się blisko dna pasma przewodnictwa), dlatego w temperaturze pokojowej można przyjąć, że wszystkie atomy domieszki są zjonizowane.

Przy koncentracji domieszek donorowych znacznie większej od koncentracji elektronów dla półprzewodnika samoistnego i przy całkowitym zjonizowaniu domieszek donorowych, koncentracja elektronów w pasmie przewodnictwa jest w przybliżeniu równa koncentracji domieszek donorowych.

Półprzewodnik taki ma znacznie większą koncentrację elektronów niż dziur, stąd jego nazwa półprzewodnik typu n (n - negative).

W półprzewodniku typu n elektrony są nośnikami większościowymi, a dziury nośnikami mniejszościowymi.

PÓŁPRZEWODNIK TYPU p

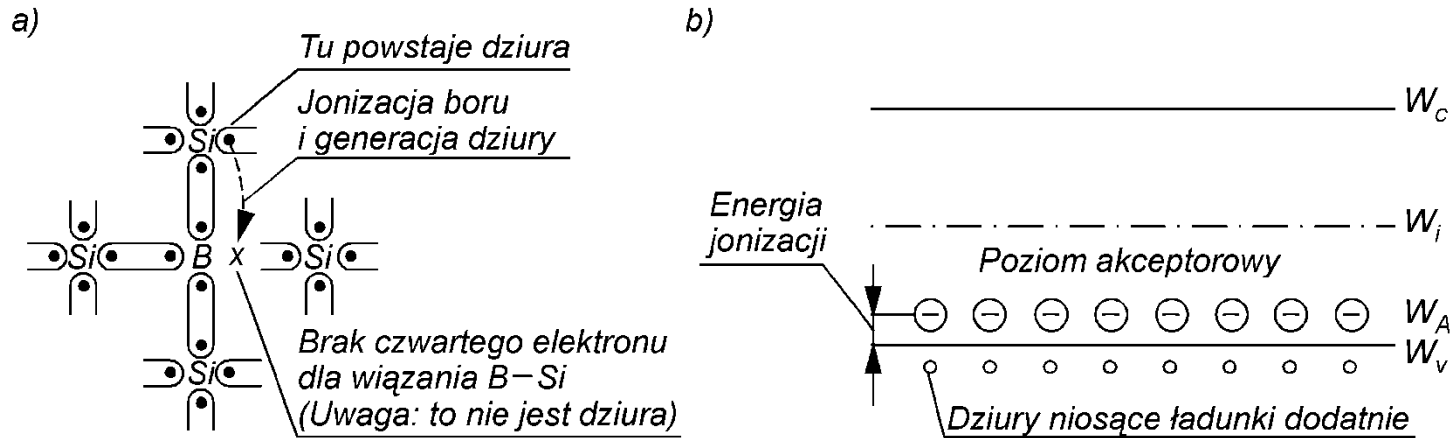
Półprzewodnik typu p powstaje poprzez wprowadzenie do półprzewodnika samoistnego domieszki akceptorowej.

Domieszkami akceptorowymi są pierwiastki trzeciej grupy układu okresowego.

Mają one trzy elektrony walencyjne, a więc o jeden mniej niż krzem.

Najczęściej stosowany jest bor B, aluminium Al, ind In, gal Ga.

5 B	6 C	7 N
13 Al	14 Si	15 P
31 Ga	32 Ge	33 As
49 In	50 Sn	51 Sb



Półprzewodnik typu p. Atom domieszki akceptorowej (boru) w węźle sieci krystalicznej krzemu: a) model wiązań kowalencyjnych, b) energetyczny model pasmowy

Atom domieszki akceptorowej, zajmuje położenie w sieci krystalicznej zamiast atomu krzemu. Brak jest czwartego elektronu. Może być on uzupełniony po oderwaniu z sąsiadującego wiązania kowalencyjnego.

W modelu pasmowym oznacza to zabranie elektronu z pasma walencyjnego. Stąd nazwa „domieszka akceptorowa” (akceptor - ten, który akceptuje czyli przyjmuje elektrony).

W pasmie walencyjnym powstaje dziura, a jednocześnie jonizuje się atom boru ulokowany w węźle sieci krystalicznej.

Energia jonizacji jest bardzo mała w porównaniu z szerokością pasma zabronionego. Dlatego w temperaturze pokojowej można przyjąć, że wszystkie atomy domieszki są zjonizowane.

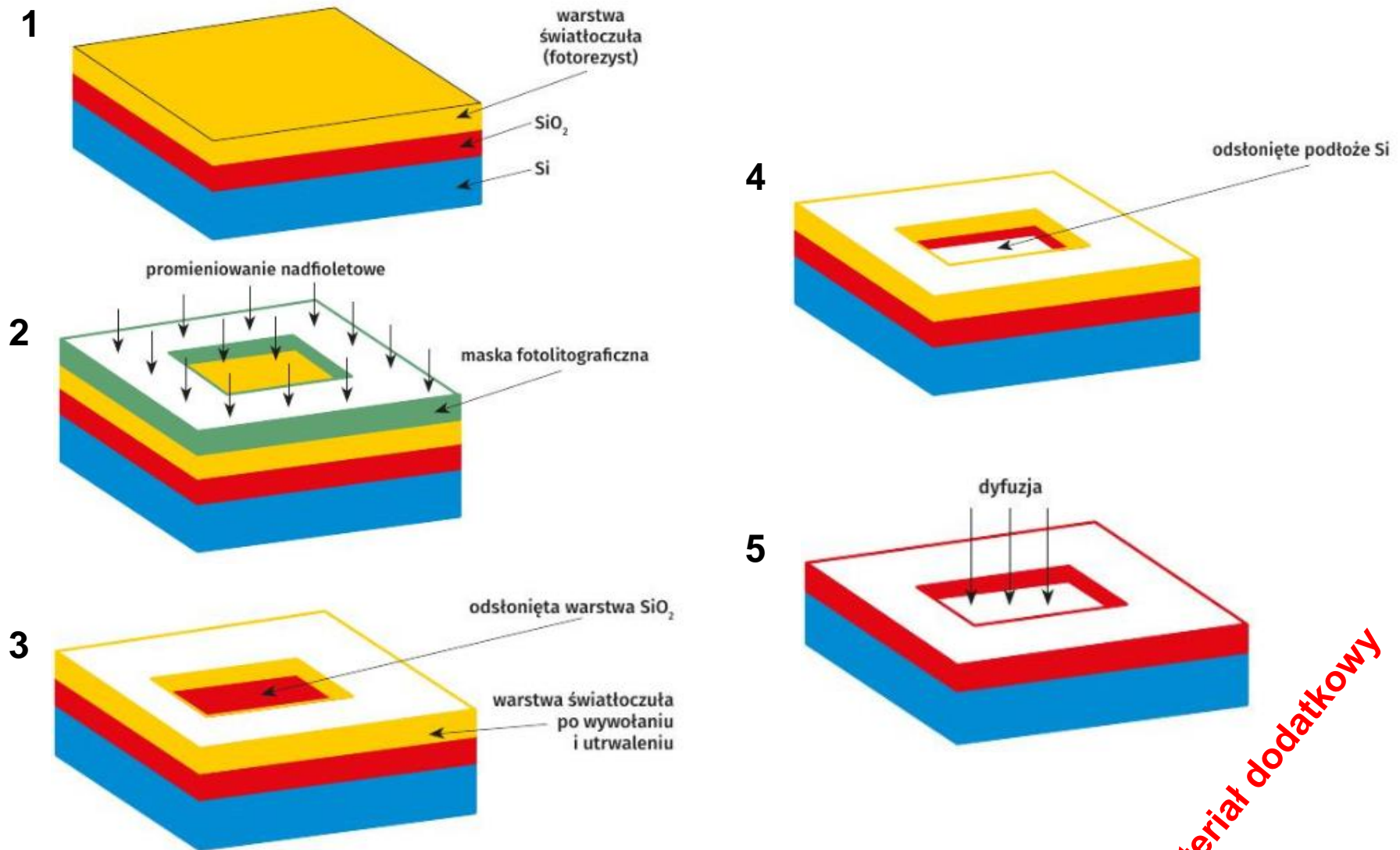
Przy koncentracji domieszek znacznie większej od koncentracji dziur w półprzewodniku samoistnym koncentracja dziur w pasmie walencyjnym jest w przybliżeniu równa koncentracji atomów domieszki akceptorowej.

Z uwagi na większą koncentrację dziur niż elektronów, półprzewodnik ten nazywany jest półprzewodnikiem typu p (p - positive).

W półprzewodniku typu p dziury są nośnikami większościowymi, a elektrony są nośnikami mniejszościowymi.

Otrzymywanie półprzewodnika określonego typu w technologii planarnej.

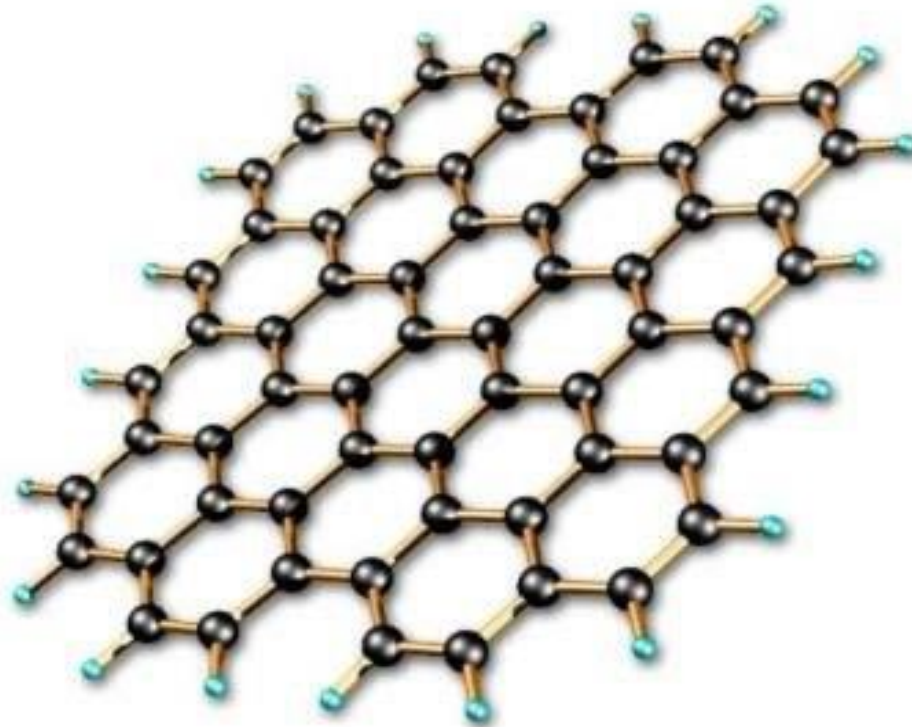
Zasadnicze fazy procesu planarnego.



materiał dodatkowy

Grafen – nowy materiał w elektronice

materiał dodatkowy



Zbudowany jest z pojedynczej warstwy atomów węgla, które tworzą połączenia pierścieniowe sześciocząłkowe - struktura plastra miodu

Właściwości grafenu

- jedno i i dwu warstwowy grafen jest półprzewodnikiem, gdy więcej warstw staje się przewodnikiem
- bardzo dobry przewodnik ciepła
- posiada niewielką rezystancję
- bardzo wysoka ruchliwość elektronów w temperaturze pokojowej prędkość przepływu elektronów, wynosząca 1/300 prędkości światła
- jest prawie przezroczysty – warstwa o grubości jednego atomu pochłania 2,3% białego światła
- jest ponad 100 razy mocniejszy niż stal (o tej samej grubości), a zarazem tak elastyczny, że można go bez szkody rozciągnąć o 20%
- membrana z utlenionego grafenu nie przepuszcza gazów, nawet atomów helu, a równocześnie jest całkowicie przenikalna przez wodę (H₂O). Daje to możliwość zastosowania do filtracji w temperaturze pokojowej

Po raz pierwszy udało się wyizolować grafen w roku 2004.

Brytyjsko - rosyjscy naukowcy Andrej Gejm i Konstantin Nowosiołow pracowali na uniwersytecie w Manchesterze. W wolnych chwilach przeprowadzali różne eksperymenty i doświadczenia. Przyklejali taśmę samoprzylepną do bloczku grafitu odrywali i obserwowali pod mikroskopem co się do niej przykleiło. Jeśli warstwa grafitu była zbyt gruba to doświadczenie kończyło się niepowodzeniem. Naklejano kolejną taśmę i odrywano. Powtarzano to wiele razy. Mieli dużo szczęścia. Udało im się otrzymać pojedynczą warstwę atomów węgla a więc grafen.

W 2010 roku otrzymali nagrodę nobla w dziedzinie fizyki za badania nad materiałem.



Andrej Gejm

materiał dodatkowy



Konstantin Nowosiołow

Półprzewodniki

K O N I E C