

# Podstawy elektroniki, elektrotechniki i miernictwa

## Wykład 8 Półprzewodniki



# Podstawy elektroniki, elektrotechniki i miernictwa

Dr inż. Janusz Dudziak

Plan wykładu:  
pojęcia i definicje podstawowe,

## Podstawy elektroniki, elektrotechniki i miernictwa

Dr inż. Janusz Dudziak

Literatura:

**Elektrotechnika i elektronika dla nieelektryków, WNT 2004**

S. Bolkowski **Teoria obwodów elektrycznych** WNT 2003

S. Osowski, K. Siwek, M. Śmiątek **Teoria obwodów** Oficyna Wydawnicza Politechniki  
Warszawskiej 2006

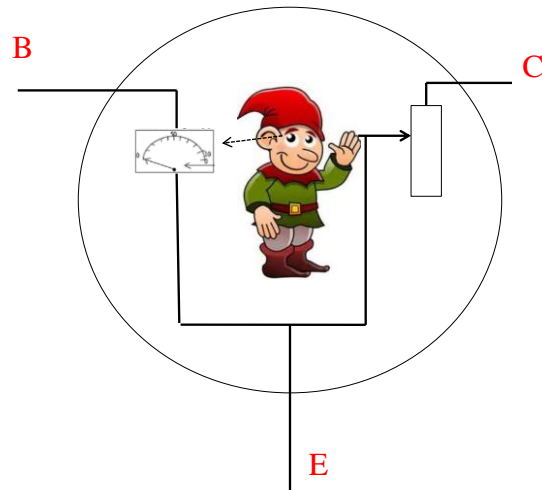


### Elementy aktywne

- Element aktywny – urządzenie, które może wzmacniać, dostarczając na wyjściu sygnał o mocy większej, niż moc sygnału na wejściu.
- Lampy
- Tranzystory

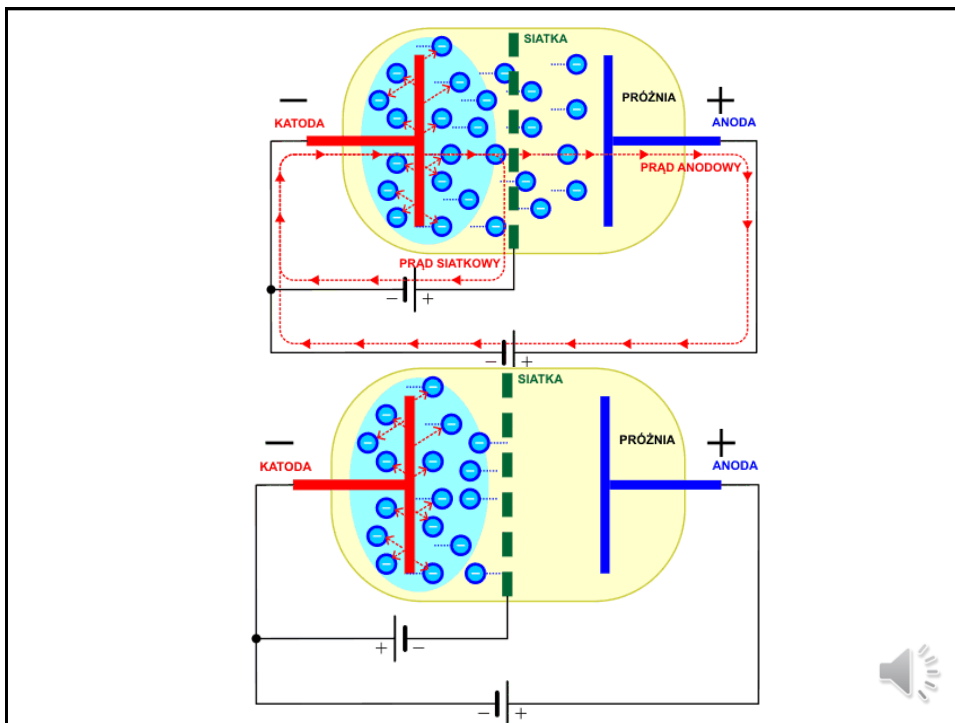
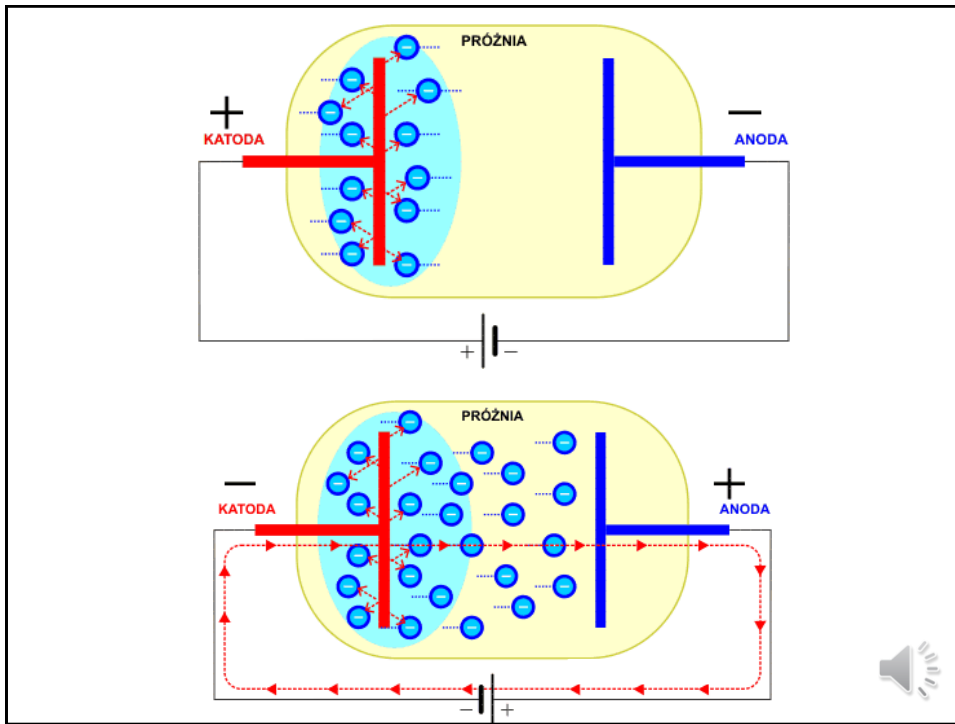


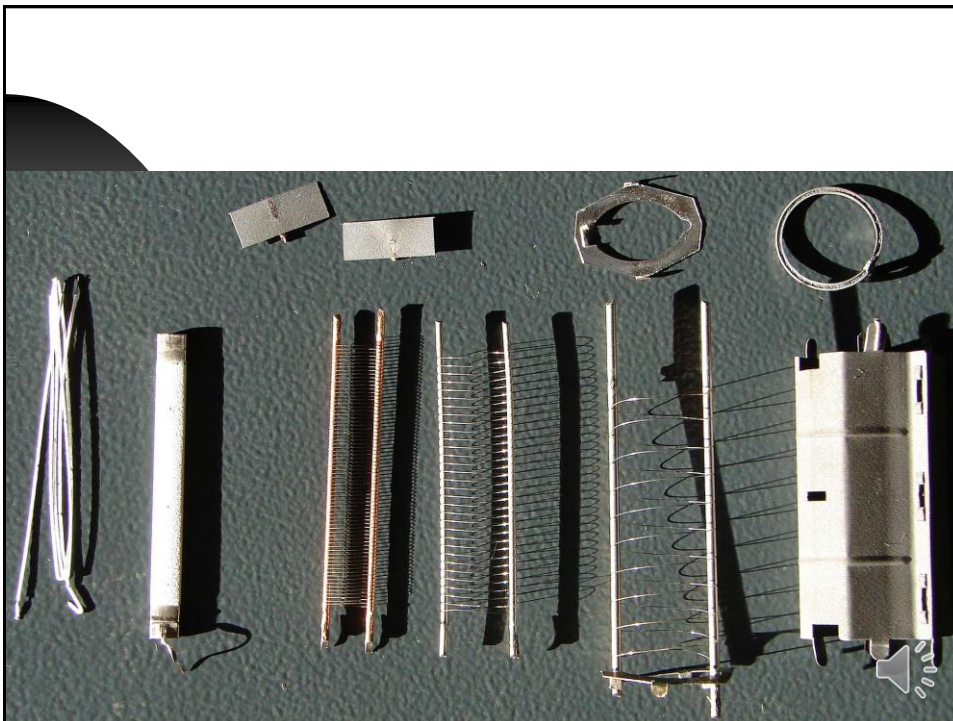
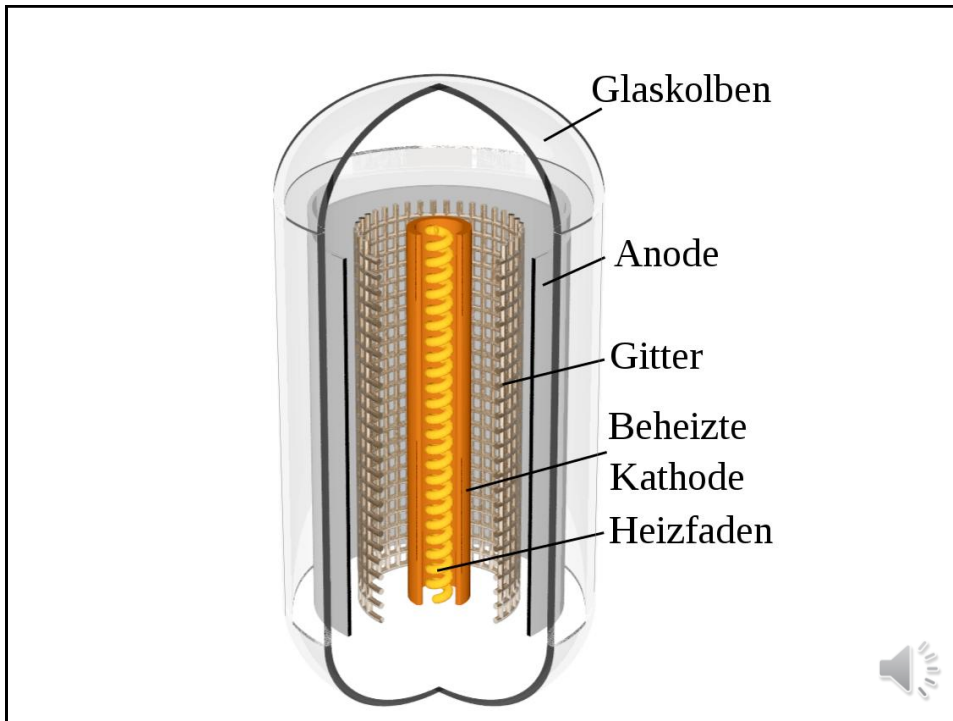
## Elementy aktywne

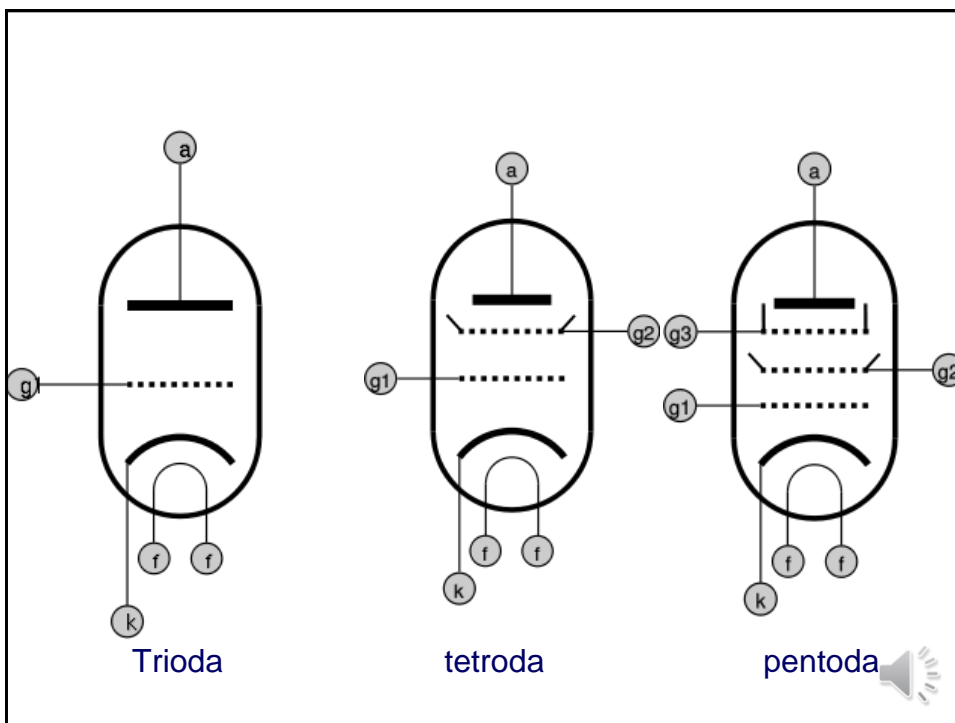


## Lampy elektronowe









# Przyrządy półprzewodnikowe



## półprzewodniki

Półprzewodnik jest materiałem o rezystywności większej niż przewodnik a mniejszej niż izolator

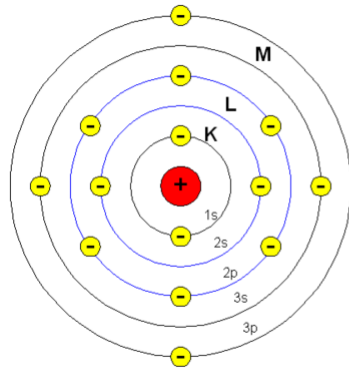
- miedź –  $10^{-8} \Omega \cdot m$
- krzem –  $2 \cdot 10^3 \Omega \cdot m$
- Mika -  $10^{14} \Omega \cdot m$

- Istotne różnice własności

- Silna zależność rezystywności od śladowych ilości zanieczyszczeń
- Silna zależność rezystywności od różnych rodzajów promieniowania zewnętrznego
- Temperaturowy współczynnik rezystancji ma duże ujemne wartości (5-10% na 1°C, dla przewodników + 0,3-0,6% na 1°C)



## półprzewodniki.

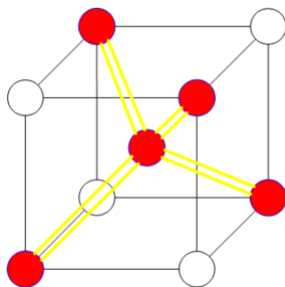


### Krzem $^{14}\text{Si}$ ma 14 elektronów

Warstwa (powłoka)	K	L	M
Liczba kwantowa główna $n$	1	2	3
Podorbity (podpowłoki)	$1s^2$	$2s^2 2p^6$	$3s^2 3p^2$
Liczba elektronów w warstwie	2	8	4
Dozwolona liczba elektronów w warstwie	2	8	8
Stan warstwy (powłoki)	zapełniona	zapełniona	niezapełniona



## półprzewodniki. .



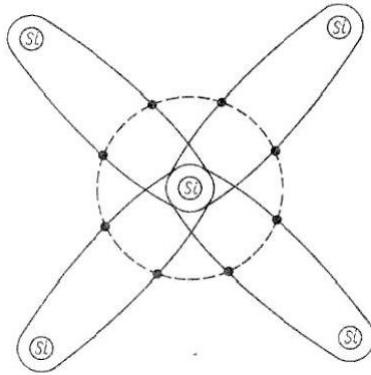
Wiązania międzyatomowe w krzemie są typu kowalencyjnego.

Pomiędzy sąsiadującymi ze sobą jądrami krążą pary elektronów tworząc trwałe wiązanie atomowe. Struktura jest elektrycznie obojętna. Aby zerwać wiązanie atomowe utworzone przez cztery elektrony walencyjne należy dostarczyć do siatki krystalicznej znacznej energii tzw. energii jonizacji.





## półprzewodniki.



Energia konieczna do wyrwania elektronu walencyjnego z wiązania kowalencyjnego wynosi

Dla Si=1,1eV, dla Ge=0,7eV.



## półprzewodniki.

Zgodnie z teorią Nielsa Bohra elektron krążący po orbicie kołowej wokół jądra atomu ma określoną energię, równą dla atomu odosobnionego

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

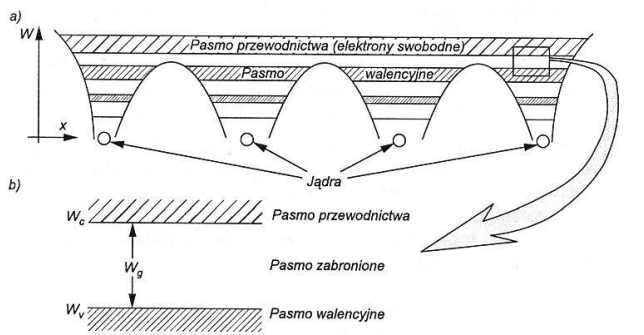
Z-liczba atomowa, e- ładunek elektronu,  $m_e$  - masa elektronu, h – stała Plancka, n – nr orbity,  $\epsilon_0$  - przenikalność elektryczna próżni

Przejście z orbity na orbitę może odbywać się tylko w sposób skokowy.

W sieci krystalicznej ruch elektronów jest bardziej złożony i energia całkowita każdego nieznacznie różni się od podanej w/w zależnością. Poziomy energetyczny zamienia się w tzw. pasmo energetyczne, a elektrony będące na określonej orbicie mogą przyjmować każdą wartość energii, która mieści się wewnątrz pasma. Takie pasma są tzw. pasmami dozwolonymi. Inne poziomy energetyczne należą do tzw. pasm zabronionych.



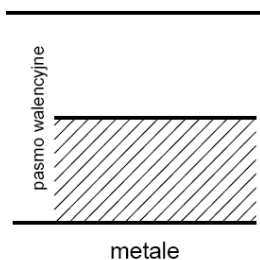
### półprzewodniki.



Energia aktywacji – ilość energii konieczna dla wyrwania elektronu z orbity walencyjnej. Wartość ta jest równoważna szerokości pasma zabronionego.



### półprzewodniki.



Dla półprzewodników arbitralnie przyjmuje się graniczna wartość energii aktywacji = 2eV ( $1\text{eV}=1,602 \cdot 10^{-19}\text{ J}$ )

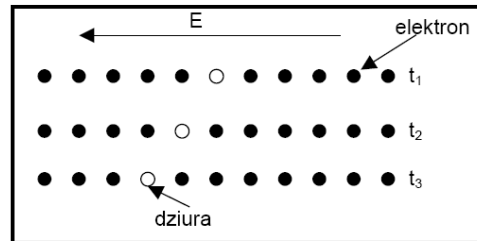
Półprzewodnik	InSb	PbS	Ge	Si	GaAs	Se	CdS
$W_g$ [eV]	0,18	0,37	0,67	1,12	1,43	1,7	1,9



## półprzewodniki.

doprowadzona energia jonizacji (np. energia cieplna) może uwolnić elektrony, które mogą się swobodnie poruszać w kryształach. Te elektrony nazywamy elektronami swobodnymi.

Po każdym uwolnionym elektronie pozostaje w siatce krystalicznej dodatnio naładowany jon - dziura. Dziura może przemieszczać się, podobnie jak elektrony swobodne w całej objętości kryształu.



Można wyróżnić w półprzewodniku **prąd elektronów i prąd dziur**



## Półprzewodnik

- już w temperaturze otoczenia ( $T \gg 300 \text{ K}$ ) pewna część elektronów przechodzi do pasma przewodnictwa, pozostawiając nieobsadzone miejsca w paśmie podstawowym.

**Definicja** Proces pojawiania się elektronów w paśmie przewodnictwa i dziur w paśmie podstawowym pod wpływem wzrostu temperatury nosi nazwę **generacji termicznej par dziura-elektron**.

- Jednocześnie z procesem generacji termicznej występuje proces odwrotny.

**Definicja**. Proces odwrotny, wyłapywania elektronów przez dziury nazywamy **rekombinacją termiczną par dziura-elektron**.

- Liczbę nośników ładunków określa się za pomocą liczby nośników w jednostce objętości, inaczej - koncentracji. Koncentrację elektronów w paśmie przewodnictwa oznacza się przez  $n_p$ , natomiast koncentrację dziur w paśmie podstawowym przez  $p_p$ . Obydwa procesy - generacji i rekombinacji, w stanie równowagi termicznej mają zrównoważone szybkości. Oznacza to, że koncentracja elektronów w paśmie przewodnictwa jest wtedy równa koncentracji dziur w paśmie podstawowym.



## Półprzewodniki

Półprzewodniki dzielą się na:

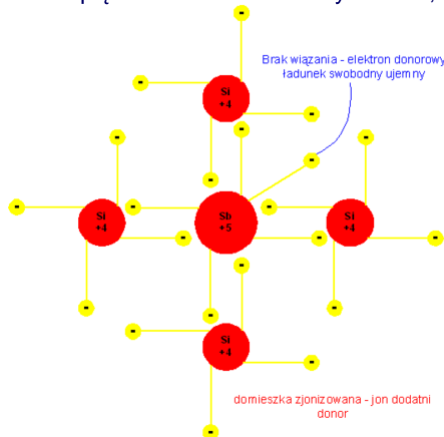
- Samoistne
  - którego materiał jest idealnie czysty, bez żadnych zanieczyszczeń struktury krystalicznej. Koncentracja wolnych elektronów w półprzewodniku samoistnym jest równa koncentracji dziur.
- domieszkowane.
  - Do którego wprowadzone zostały atomy pierwiastków niewchodzących w skład półprzewodnika samoistnego (np. domieszka krzemu w arsenku galu. W wiązaniach kowalencyjnych bierze udział ustalona liczba elektronów, zamiana któregoś z atomów struktury na odpowiedni atom domieszki powoduje wystąpienie nadmiaru (wtedy mamy do czynienia z półprzewodnikiem typu N) lub niedoboru elektronów. (półprzewodnik typu P)



## Półprzewodnik typu n.

Półprzewodniki niesamoistne powstają przez wprowadzenie do półprzewodnika domieszki:

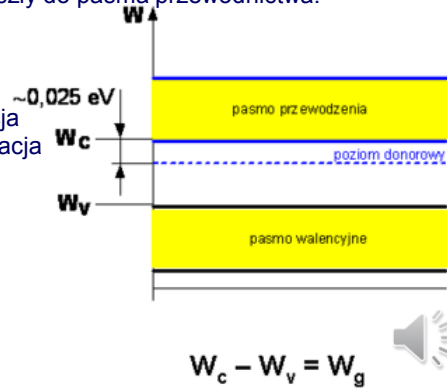
- **Donorowej** będącej źródłem elektronów (pierwiastki pięciowartościowe – antymon Sb, arsen As, fosfor P)



## Półprzewodnik typu n.

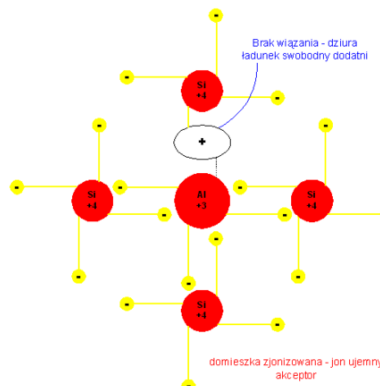
Na wykresie pasmowym pojawia się dodatkowy poziom – poziom donorowy. Wskutek małej różnicy energii poziomu donorowego względem pasma przewodnictwa (około 0,05 eV dla Si) elektrony z tego poziomu będą przechodziły do pasma przewodnictwa. W temperaturze pokojowej prawie wszystkie atomy domieszkowe zostaną zjonizowane. Oznacza to, że na poziomach donorowych nie ma elektronów. Wszystkie przeszły do pasma przewodnictwa.

W półprzewodniku typu n koncentracja dziur jest mniejsza niż koncentracja elektronów swobodnych



## Półprzewodnik typu p

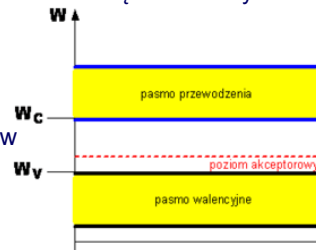
Wprowadzenie domieszki **akceptorowej** (pierwiastki trójwartościowe – glin Al., ind In, gal Ga) - brak elektronu może być uzupełniony elektronem z sąsiedniego wiązania. Powstaje w ten sposób **dziura**, która może przemieszczać się w kryształ podobnie jak elektron walencyjny.



## Półprzewodnik typu p.

Na wykresie pasmowym pojawia się dodatkowy poziom – poziom akceptorowy. Puste miejsca w sieci krystalicznej, nie zajęte przez elektrony, odpowiadają nieobsadzonym dodatkowym poziomom dozwolonym, leżącym blisko pasma podstawowego, zwanych poziomami akceptorowymi. W temperaturze pokojowej wszystkie poziomy akceptorowe są zajęte elektronami, które przeszły tu z pasma podstawowego. Na skutek tego liczba dziur w paśmie przewodnictwa jest większa od liczby elektronów w paśmie przewodnictwa. W półprzewodniku typu p nośnikami większościowymi są dziury, a mniejszościowymi elektrony.

W półprzewodniku typu p koncentracja dziur jest znacznie większa niż koncentracja elektronów swobodnych



$$W_c - W_v = W_g$$



## Półprzewodnik typu n.

Proces rekombinacji jest opóźniony względem procesu generacji o czas (rzędu mikrosekund)  $\tau$  nazywany **czasem życia** nośników.

W czasie  $\tau$  nośniki ładunku przebywają pewien odcinek drogi L nazywany **drogą dyfuzji**. Droga dyfuzji jest związana z czasem życia nośników

$$L = \sqrt{D\tau}$$

D jest stała dyfuzji = dla temperatury 300°K

$$D_n = 35 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

$$D_p = 12,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$



## Półprzewodnik typu n.

- W półprzewodniku typu **n** nośnikami nadmiarowymi są **elektrony**
- w półprzewodniku typu **p** nośnikami nadmiarowymi są **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. Występuje wówczas **dyfuzyjny ruch nośników** z obszarów o większej koncentracji do obszarów o mniejszej koncentracji. Proces przenoszenia nośników z obszaru o większej koncentracji do obszaru o koncentracji mniejszej nazywamy **dyfuzją**.
- Drugim procesem transportu nośników jest **unoszenie** w polu elektrycznym.
- Prąd w materiale półprzewodnikowym składa się z dwóch składników:
  - **prądu unoszenia** pochodzącego od pola elektrycznego oraz
  - **prądu dyfuzji**



# ZŁĄCZE



## złącze.

- Obszar, w którym zachodzi bardzo silna (o kilka rzędów wielkości) zmiana koncentracji ładunku nazywa się **złączeniem**.
- W stanie równowagi termicznej niezależnie od koncentracji domieszek w każdym półprzewodniku spełniony jest tzw. warunek neutralności, który mówi, że w każdym punkcie obszaru półprzewodnika wypadkowy ładunek elektryczny jest równy zero, a wszelkie zaburzenia warunku neutralności powodują powstanie pola elektrycznego przywracającego stan równowagi
- Najszersze zastosowanie w elektronice mają złącza:
  - półprzewodnik - półprzewodnik
  - metal - półprzewodnik (złącza *m-p*, nazywane często złączami Schottky'ego).



## Procesy technologiczne

- Wytwarzanie Si
- Domieszkowanie
- Wytwarzanie i usuwanie warstw izolatora. Cienkie warstwy.
- Litografia.
- Montowanie kontaktów.





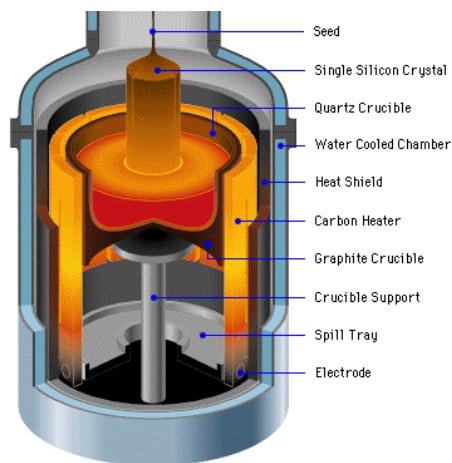
## Półprzewodnik. Etapy produkcji na przykładzie krzemu

- Otrzymywanie Si z  $\text{SiO}_2$ 
  - $\text{SiO}_2 + 2\text{C} \Rightarrow \text{Si} + 2\text{CO}$  (1800 °C)
  - $\text{SiO}_2 + \text{SiC} \Rightarrow \text{Si} + \text{SiO (gaz)} + \text{CO}$
- Oczyszczanie
  - $\text{Si} + 3\text{HCl} \Rightarrow \text{SiHCl}_3 + \text{H}_2$
- Otrzymanie polikrystalicznego krzemu
  - Redukcja trichlorosilanu w wodorze:
    - $\text{SiHCl}_3 + \text{H}_2 \Rightarrow \text{Si} + 3\text{HCl (gaz)}$  (1000 °C)
- Otrzymanie monokryształu
- Obrabianie monokryształu
- Cięcie
- Obrabianie wafli Si
- Pakowanie



## Otrzymanie monokryształu 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
  - wynik: pręt monokrystaliczny o średnicy 5 lub 7,5 cm (12cm).
  - Płytki o grubości 300 do 500µm, po obróbce mechanicznej 200 µm.



## Półprzewodnik.

- Półprzewodnik *technologicznie czysty*.
  - Na 1 atom obcego pierwiastka przypada ok. 10 miliardów atomów pierwiastka podstawowego (krzemu lub germanu).
- Najczystszy znany materiał
  - 1 atom zanieczyszczenia na  $10^{11}$  atomów Si



## Cięcie i obrabianie wafli.

- Wafel krzemowy
  - Płytki o grubości 300 do 500  $\mu\text{m}$ , po obróbce mechanicznej 200  $\mu\text{m}$ .



# PRZYRZĄDY PÓŁPRZEWODNIKOWE



## Klasyfikacja przyrządów półprzewodnikowych

Obszar determinujący właściwości	<b>Elementy objętościowe</b> , np. termistor <b>Elementy powierzchniowe</b> , np. tranzystor MOSFET
Liczba złączy	<b>Elementy bezzłączowe</b> , np. tranzystor MOSFET <b>Elementy złączowe</b> , np. dioda
Obszar stosowania	<b>Sensory</b> , np. termistor, hallotron <b>Wskaźniki</b> , np. dioda elektroluminescencyjna <b>Aktory</b> , np. tranzystor, tyrystor
Liczba zacisków	<b>Dwubiegunniki</b> , np. dioda <b>Wielobiegunniki</b> , np. tranzystor, tyrystor
Sterowalność	<b>Elementy niesterowalne</b> , np. rezystor, dioda <b>Elementy sterowalne ciągłe</b> , np. tranzystor <b>Elementy sterowalne dyskretne</b> , np. tyrystor
Monotoniczność charakterystyki prądowo-napięciowej	<b>Elementy z charakterystyką monotoniczną</b> , np. dioda <b>Elementy z ujemną rezystancją dynamiczną</b> , np. tyrystor

