



Elementy złączowe

Dr hab. Maciej Czapkiewicz
Instytut Elektroniki, paw. C-1, pok.321
czapkiew@agh.edu.pl
<http://layer.uci.agh.edu.pl/Fizyka>



- Energia Fermiego E_F w metalach znajduje się w obszarze energii pasma przewodnictwa. Elektrony mogą swobodnie zmieniać swoją energię w obszarze poziomu Fermiego.
- Energia Fermiego E_F w półprzewodnikach samoistnych znajduje się w połowie szerokości pasma wzbronionego. Niewielka ilość termicznie wzbudzonych dziur i elektronów może swobodnie zmieniać swoją energię w obszarze wierzchu pasma walencyjnego lub spodu pasma przewodnictwa.
- Domieszkowanie donorowe (typu n) przesuwa efektywny poziom E_F w pobliże spodu pasma przewodnictwa. W paśmie przewodnictwa jest więcej elektronów, niż dziur w paśmie walencyjnym.
- Domieszkowanie akceptorowe (typu p) przesuwa efektywny poziom E_F w pobliże wierzchu pasma walencyjnego. W paśmie walencyjnym jest więcej dziur, niż elektronów w paśmie przewodnictwa.

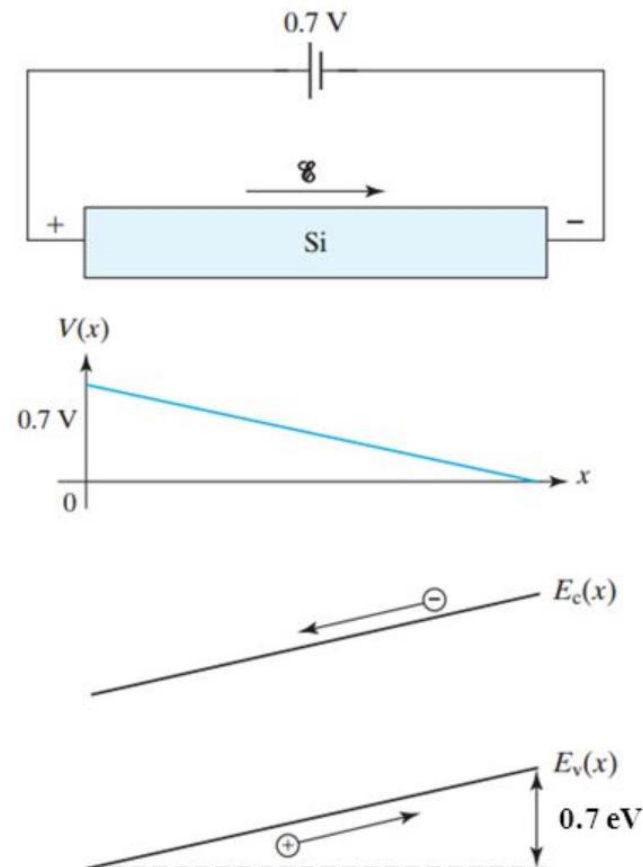
Poziom Fermiego a pole elektryczne



- Przyłożenie jednorodnego pola elektrycznego wzdłuż paska metalu lub półprzewodnika powoduje przechylenie poziomów energetycznych w funkcji odległości wzdłuż paska, wskutek dodania potencjału liniowego:

$$V(x) = - \int \vec{E} \circ d\vec{x}$$

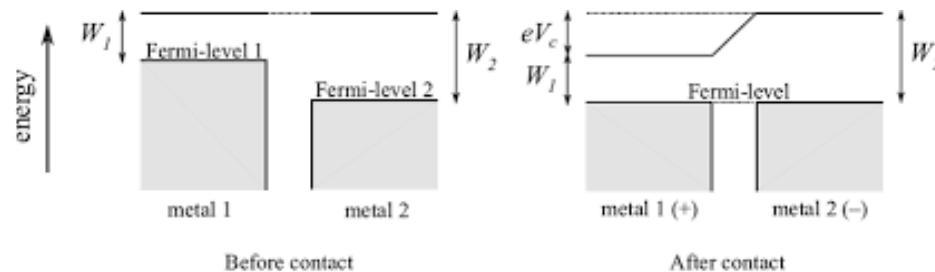
- Elektrony (ładunek ujemny) będą się poruszać w kierunku wzrostu potencjału, dziury (ładunek dodatni) w kierunku spadku potencjału.



Kontakt metal-metal



- Dwa różne metale, o różnym poziomie Fermiego, przed i po kontakcie:

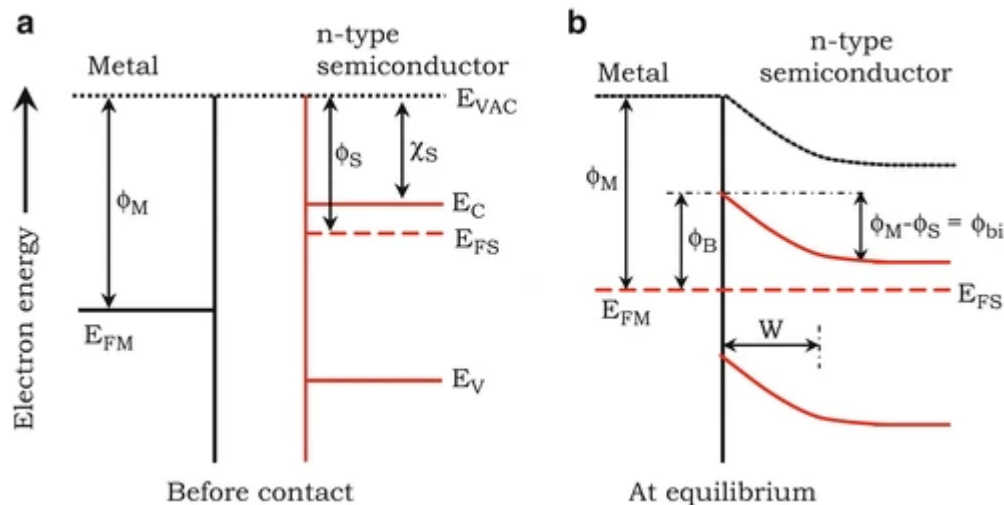


- elektrony przepływają z jednego metalu do drugiego tak, aby wyrównały się poziomy Fermiego, kosztem wystąpienia skoku potencjału na granicy styku. Po przepłynięciu elektronów następuje stan równowagowy.
- Zaburzenie tej równowagi (np. wskutek różnicy temperatur) – efekt termoelektryczny

Kontakt metal-półprzewodnik



- Poziom Fermiego w metalu jest inny, niż w półprzewodniku, np. w półprzewodniku typu n jest wyższy, niż w metalu (a).

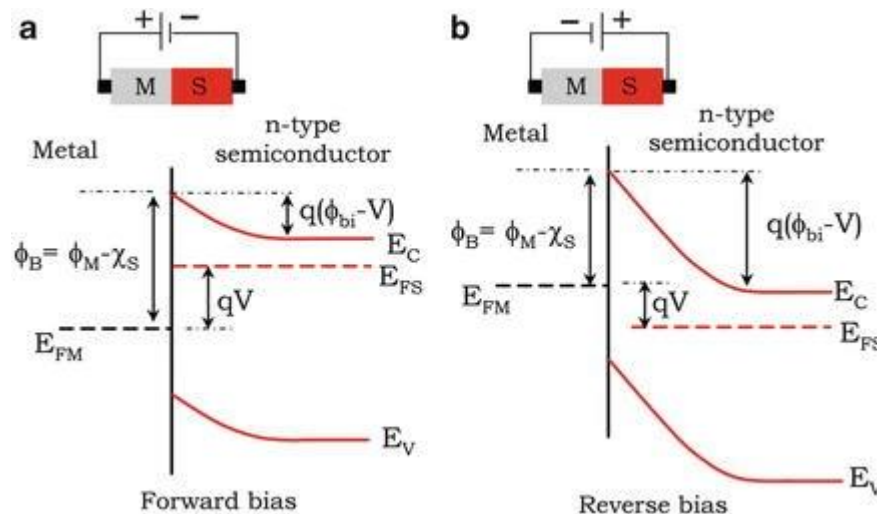


- Elektrony przepływają z półprzewodnika na powierzchnię styku z metalem, w efekcie poziomy Fermiego się wyrównują (b), ale zmienia się położenie poziomów pasm przewodnictwa i walencyjnego w półprzewodniku, ponieważ obszar przy złączeniu jest zubożony (mało elektronów, bo są na powierzchni metalu)

Kontakt metal-półprzewodnik + pole E



- Przyłożenie pola elektrycznego powoduje różnicę poziomów Fermiego na styku metal/półprzewodnik. Jeżeli poziom Fermiego w półprzewodniku będzie wyższy niż w metalu, elektrony nie będą przepływać (a). Mogą przepływać dziury, ale tych w półprzewodniku typu n jest bardzo mało. Następuje efekt zaworowy (diodowy).

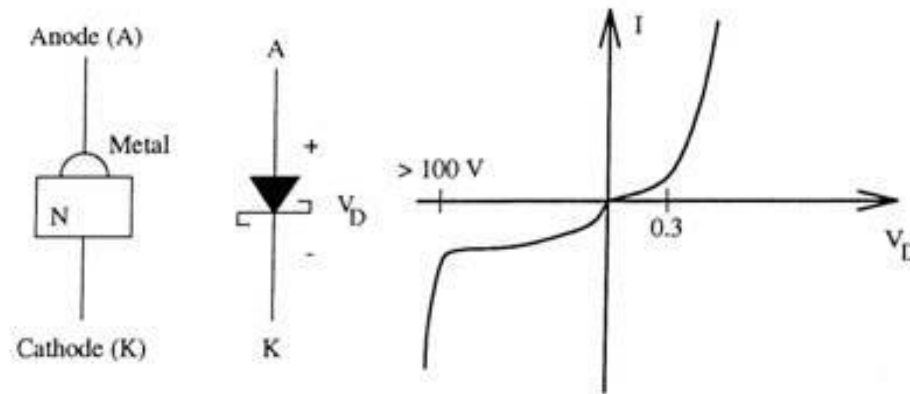


- Odwrotne przyłożenie pola elektrycznego umożliwia przepływ elektronów (b). Dioda w tym kierunku przewodzi.

Dioda metal-półprzewodnik



- Złącze metal-półprzewodnik ma niesymetryczną charakterystykę prądowo-napięciową:

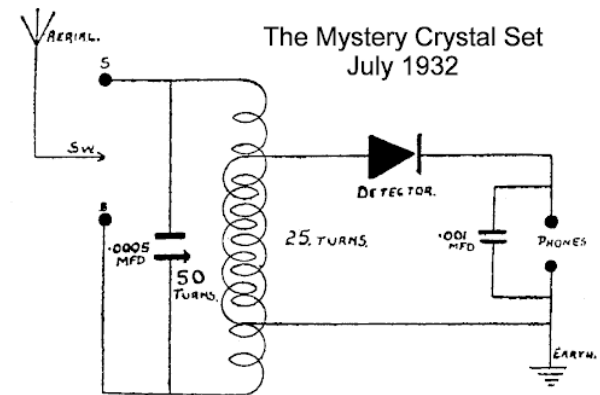


- Prąd wsteczny jest bardzo mały (skala na rysunku znacznie przesadzona) bo pochodzi z nośników mniejszościowych, jest silnie (wykładniczo) zależy od temperatury.
- Diody metal-półprzewodnik mają bardzo cienki obszar zubożony, dobrze pracują przy dużych częstotliwościach (diody Schottky'ego), ale są mało odporne na przebicie w kierunku zaporowym.

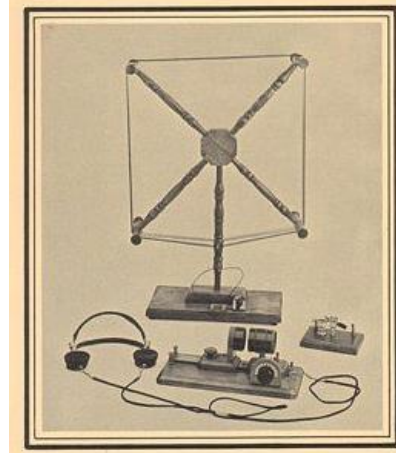
Dioda metal-półprzewodnik



- Pierwsze przyrządy półprzewodnikowe były ostrzowymi diodami kryształkowymi (metal – PbS)



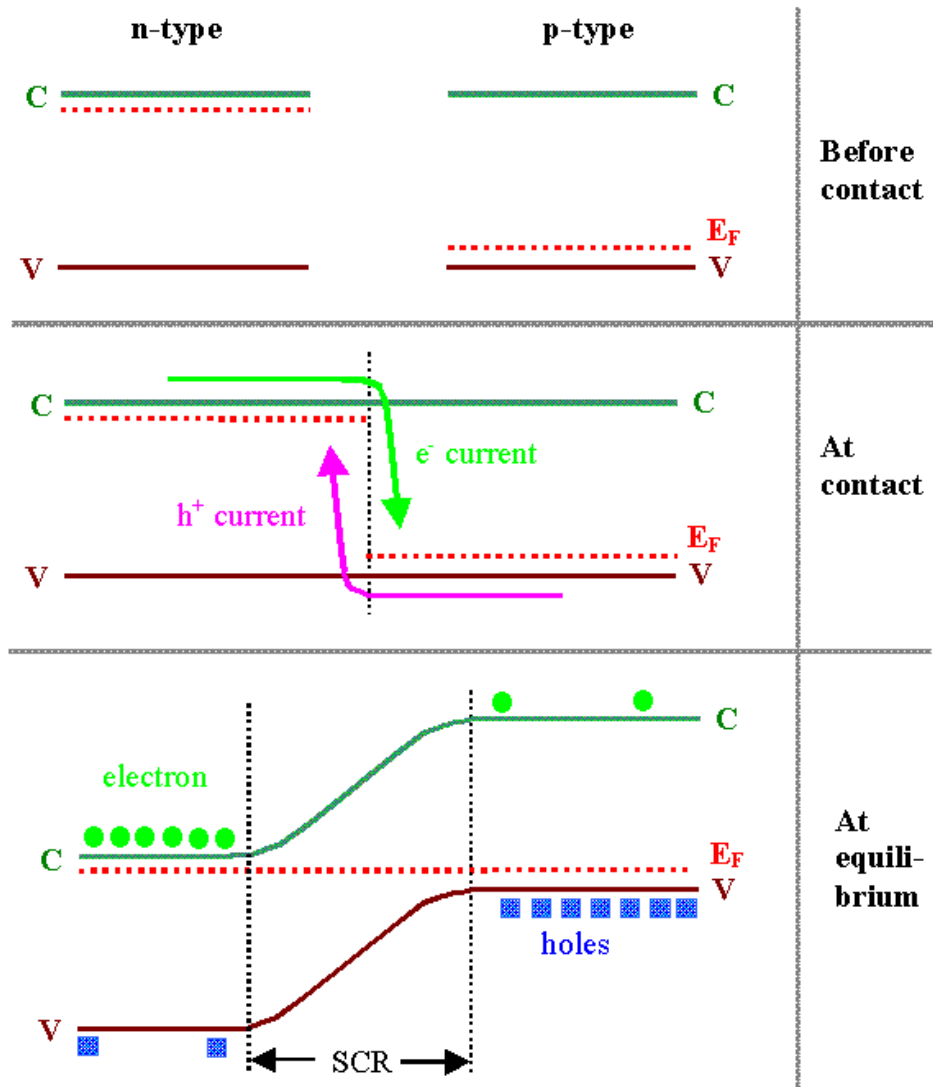
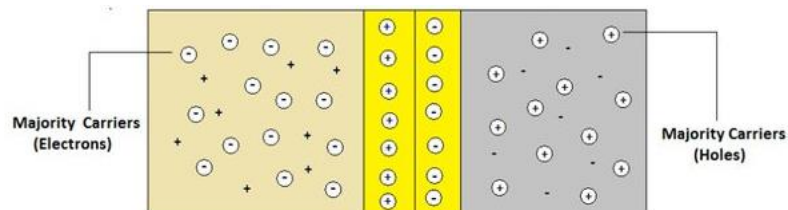
Radios that
Work for Free



Złącze p-n



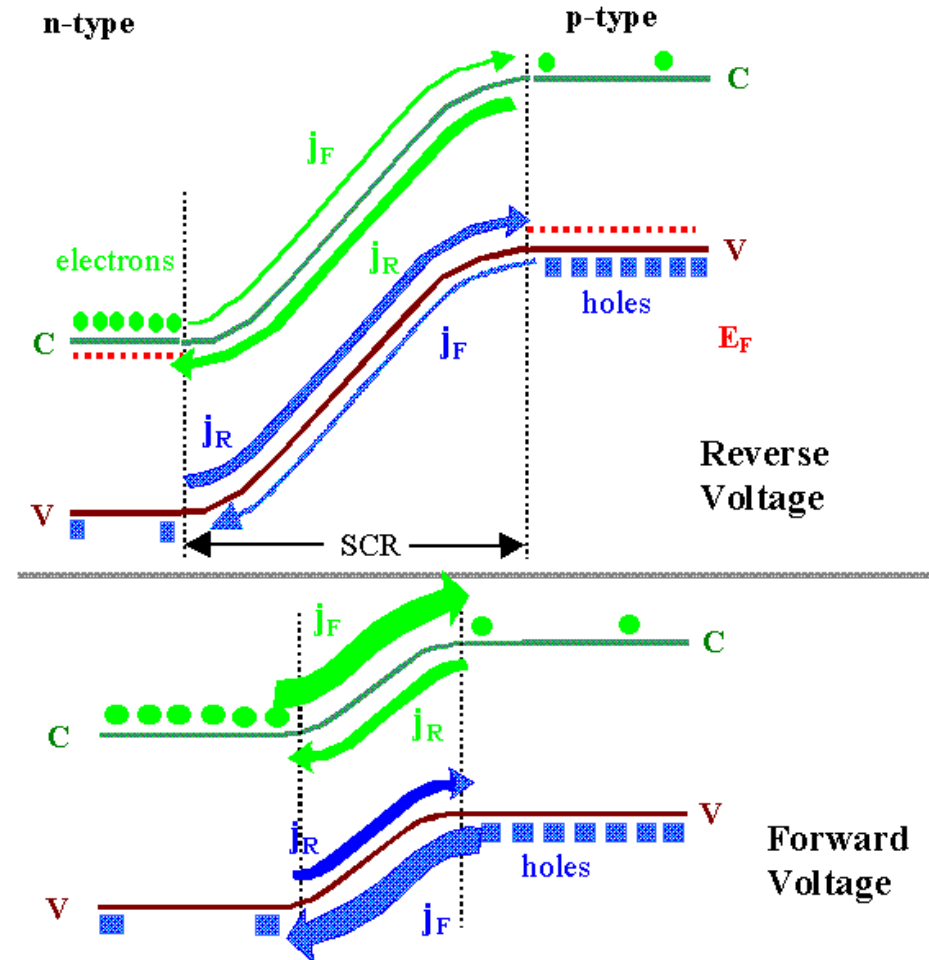
- Efektywny poziom Fermiego jest niższy w półprzewodniku p niż typu n. Kontakt między tymi półprzewodnikami wymusza przemieszczenie ładunków tak, aby wyrównał się poziom E_F .
- W efekcie zmianie ulegają poziomy pasma przewodnictwa i walencyjnego, a także tworzy się warstwa zaporowa, w której są nieskompensowane elektrony lub dziury.



Złącze p-n pod wpływem napięcia



- W zależności od kierunku przyłożonego napięcia, zmianie ulegną poziomy pasma walencyjnego i przewodnictwa.
- Wsteczne napięcie spowoduje, że tylko nośniki mniejszościowe będą mogły swobodnie się przemieszczać, poszerzy się też warstwa zaporowa.
- Napięcie w kierunku przewodzenia – ruch nośników większościowych, wąska warstwa zaporowa.



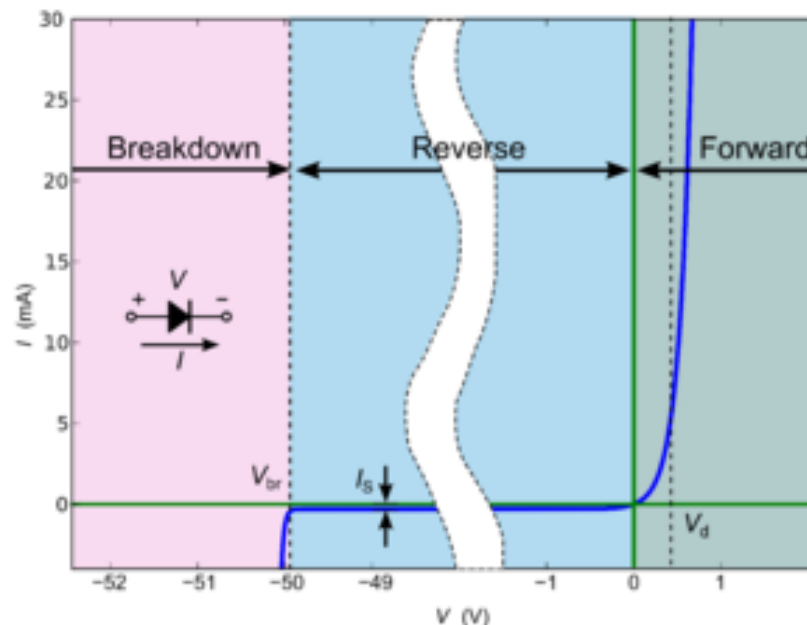
Charakterystyka prądowo-napięciowa diody



- W kierunku przewodzenia, powyżej napięcia progowego, prąd bardzo szybko rośnie z napięciem – równanie Schockleya:

$$I = I_S \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right)$$

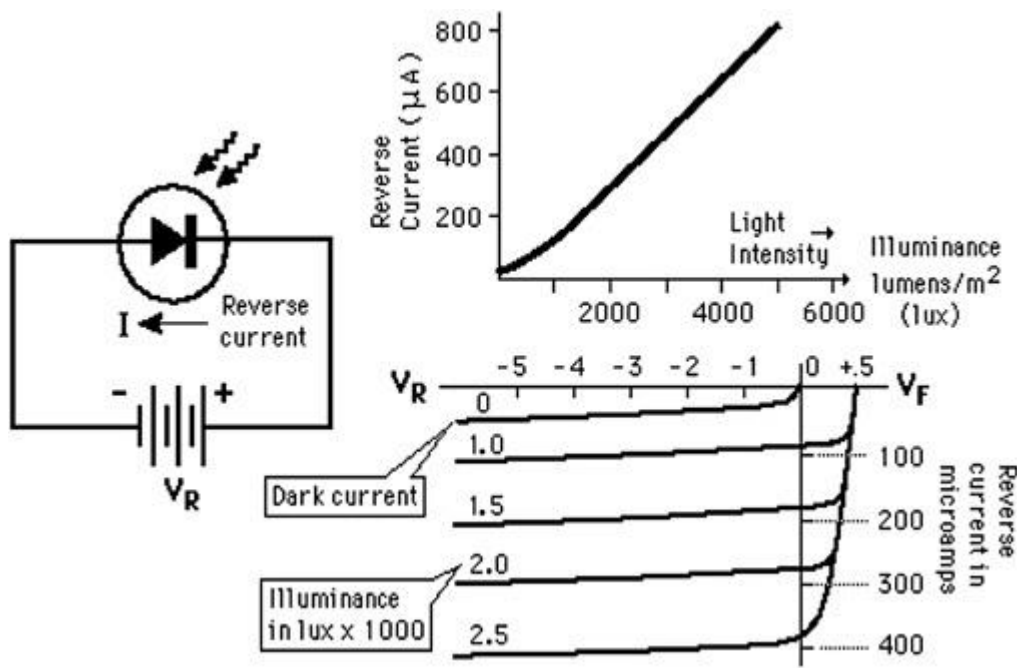
- W kierunku zaporowym (ujemne U) płynie stały prąd nasycenia (dla napięć mniejszych niż napięcie przebicia).



Fotodiody

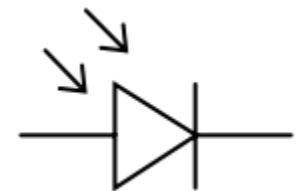


- Pochłanianie fotonów o energii większej niż przerwa wzbroniona generuje parę dziura-elektron: to zaburza równowagę potencjałów (efekt fotowoltaiczny) i zwiększa prąd wsteczny (więcej nośników mniejszościowych) – dwa tryby pracy



materiał	Symbol	E_g [eV]
fosforek galu	GaP	2,26
arsenek galu	GaAs	1,43
krzem	Si	1,11
german	Ge	0,67
arsenek indu	InAs	0,36
selenek ołowiu	PbSe	0,27

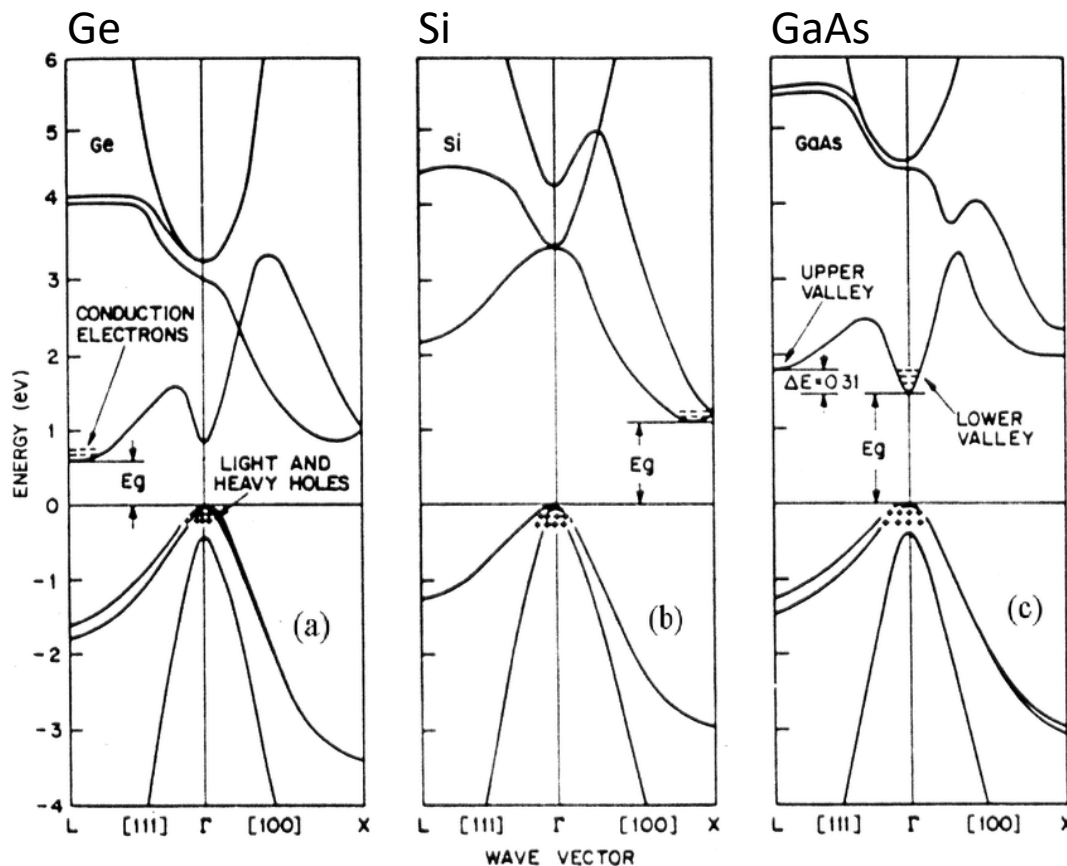
$$\lambda < \frac{hc}{E_g}$$



Diody elektroluminescencyjne

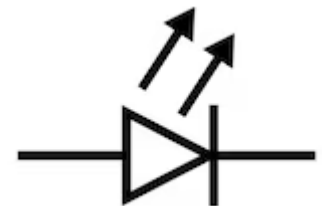


- Rekombinacja promienista dziur i elektronów w złączu p-n w materiałach z prostym przejściem (z zachowaniem pędu) – wypromieniowana długość fali zależy od półprzewodnika

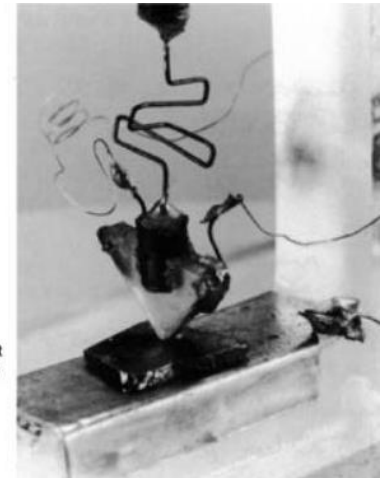


materiał	Symbol	E_g [eV]
azotek galu	GaN	3,4
siarczek kadmu	CdS	2,42
fosforek galu	GaP	2,26
arsenek galu	GaAs	1,43
krzem	Si	1,11
german	Ge	0,67

$$\lambda \approx \frac{hc}{E_g}$$



-
- Tastspitzen
- $< 1\text{ mm}$
- Target (Silicium, Germanium)

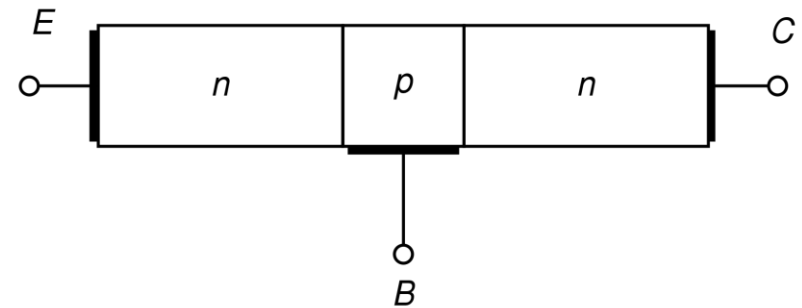
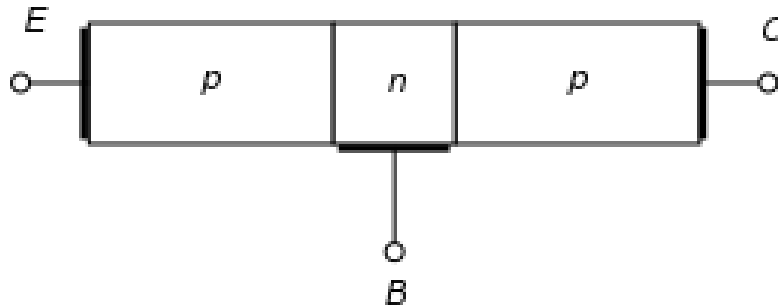
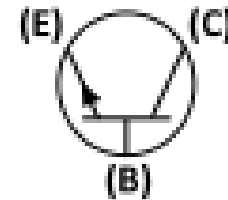
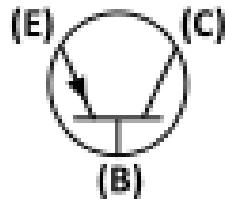


- 1947, prototypy tranzystorów ostrzowych w Bell Labs
- 1953 – produkcja tranzystorów warstwowych

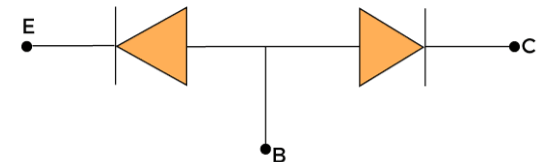


Tranzystor bipolarny

- Trójelektrodowy element z dwoma złączami



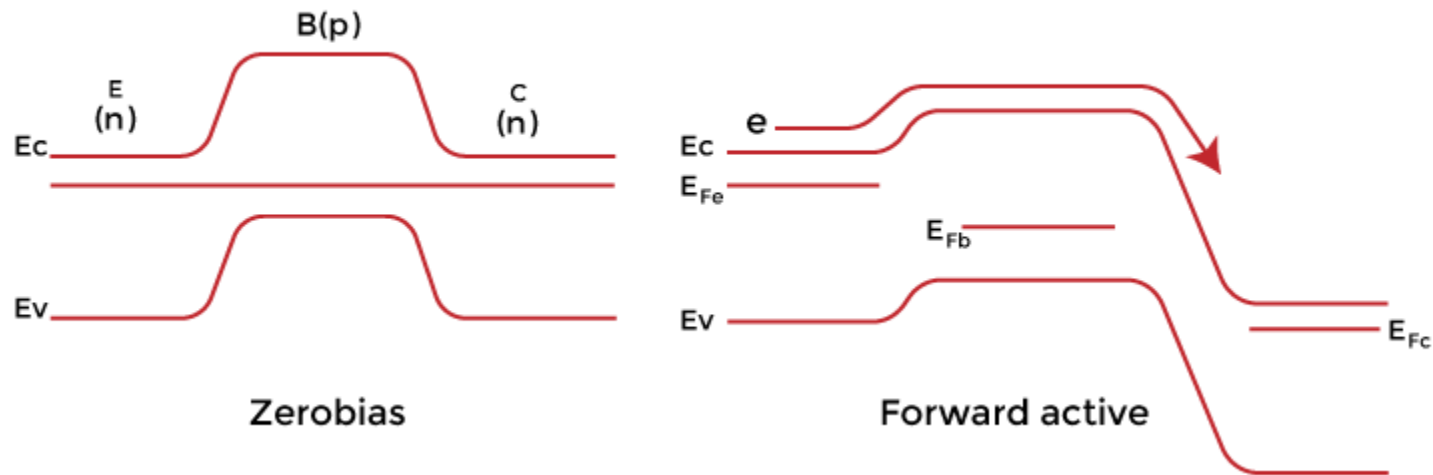
- Efektywnie dla prądu emiter-kolektor są to dwie diody połączone przeciwsobnie





Tranzystor bipolarny – zasada działania

- Emiter jest silniej zdomieszkowany niż pozostałe obszary. Doprowadzenie potencjału do bazy i wprowadzenie tam nośników mniejszościowych zmienia równowagę potencjałów i umożliwia przewodzenie prądu E-C



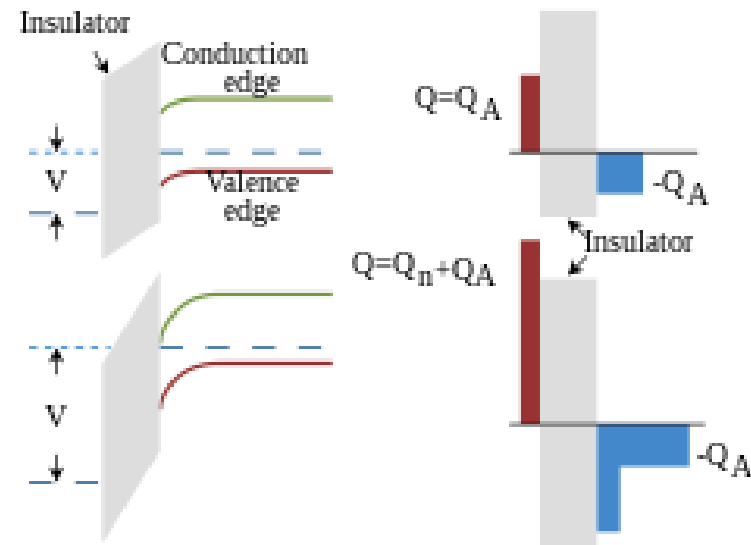
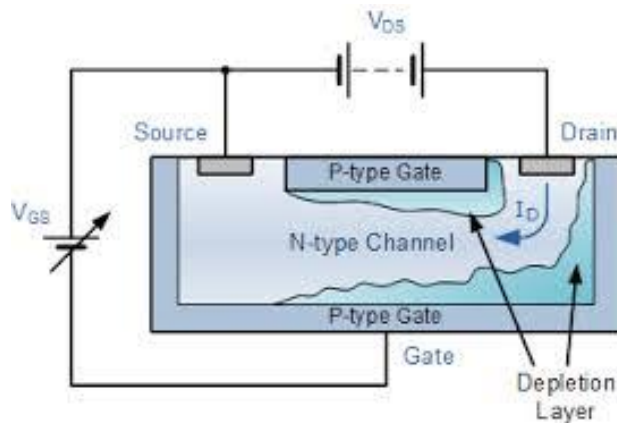
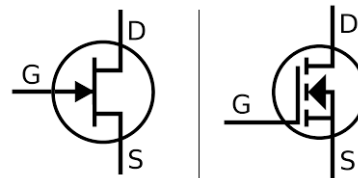
Animacja, jak działają diody i tranzystory:

<https://www.youtube.com/watch?v=hrpPKCDLRN0>



Efekt polowy

- Pole elektryczne bramki zmienia poziomy energetyczne drenu, zubożając ten obszar i efektywnie blokując przepływ ładunków w ścieżce źródło-dren.
- Tranzystory polowe: złączowe (JFET), z izolatorem tlenkowym (MOSFET)



Zastosowania elementów złączowych



- Diody – prostowanie, zabezpieczenie, generacja, fotodiody, LED
- Tranzystory: wzmacnianie (sygnały analogowe), przełączanie (sygnały cyfrowe), generacja, fototranzystory, czujniki wielkości nieelektrycznych
- Różne konstrukcje, wytwarzanie, materiały i sposób domieszkowania dla zastosowań w
 - ✓ mikroelektroniki
 - ✓ obwodach dużej mocy
 - ✓ generacji lub detekcji dużych częstotliwości