

# Wykład 2

## Półprzewodnikowe elementy aktywne.

1 kwietnia 2025

### Wstęp

#### 1. Półprzewodniki

#### 2. Złącze p-n

2.1 Diody prostujące

2.2 Emisja światła

2.3 Efekt tunelowy i Zenera

8 kwietnia 2025

#### 3. Tranzystory

3.1 Zasada działania

3.2 Obwody

#### 4. Wzmacniacze operacyjne

4.1 Zasada działania

4.2 Przykładowe zastosowania

# Przewodnictwo

**Opór właściwy:**  $\rho = R \cdot S / l$ ,

**przewodnictwo właściwe:**  $\sigma = 1/\rho$ .

**Zależność od koncentracji:**

$$\sigma = en\mu_e + ep\mu_h$$

$n$ ,  $p$  - koncentracje nośników,

$\mu_e$ ,  $\mu_h$  - ruchliwości.

**Gęstość prądu,  $j$ ,** dla prądu  $I$  płynącego przez przewodnik o powierzchni  $S$ :

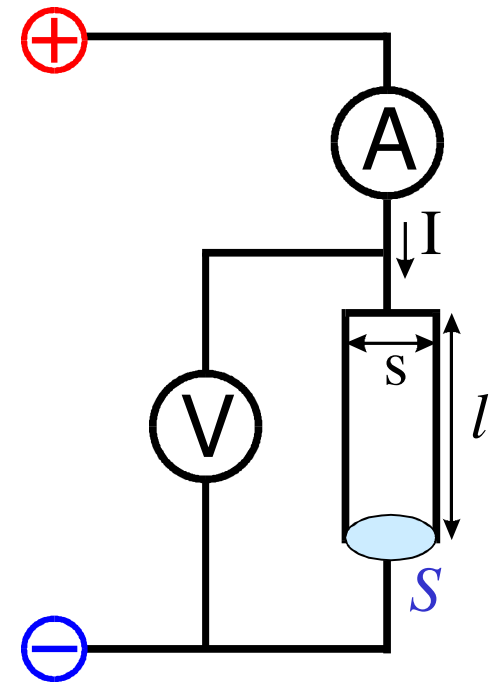
$$j = I/S.$$

Jednostki: A/m<sup>2</sup>, A/cm<sup>2</sup>.

**Mikroskopowe prawo Ohma:**

$$j = \sigma F = en\mu_e F.$$

Gdzie:  $F$  - natężenie pola elektrycznego w przewodniku.



# Przewodzenie prądu

Przewodnictwo:

$$\sigma = en\mu$$

Podział substancji ze względu  
na przewodzenie:

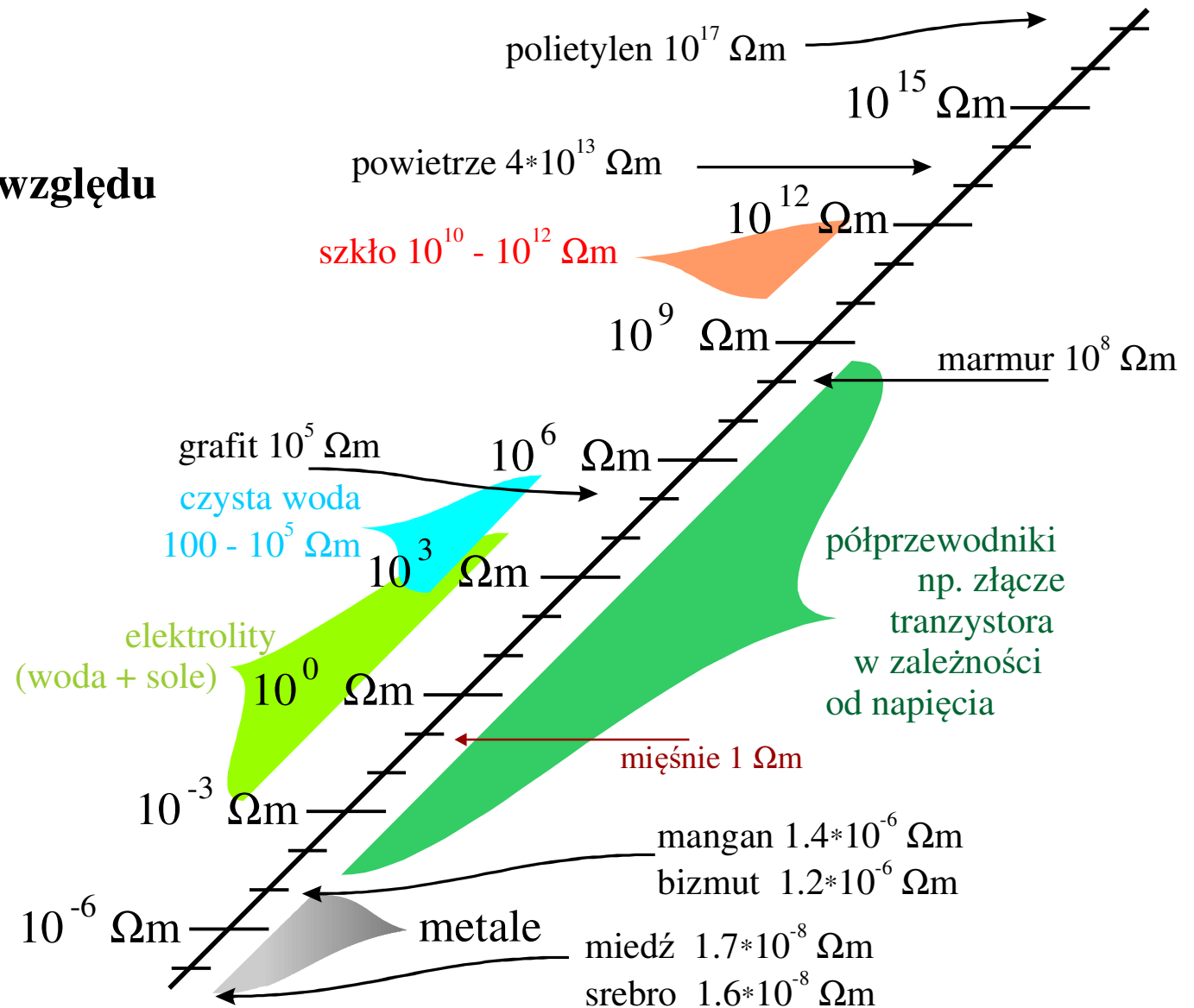
przewodniki

(metale, elektrolity)

i

izolatory

(szkło, powietrze).



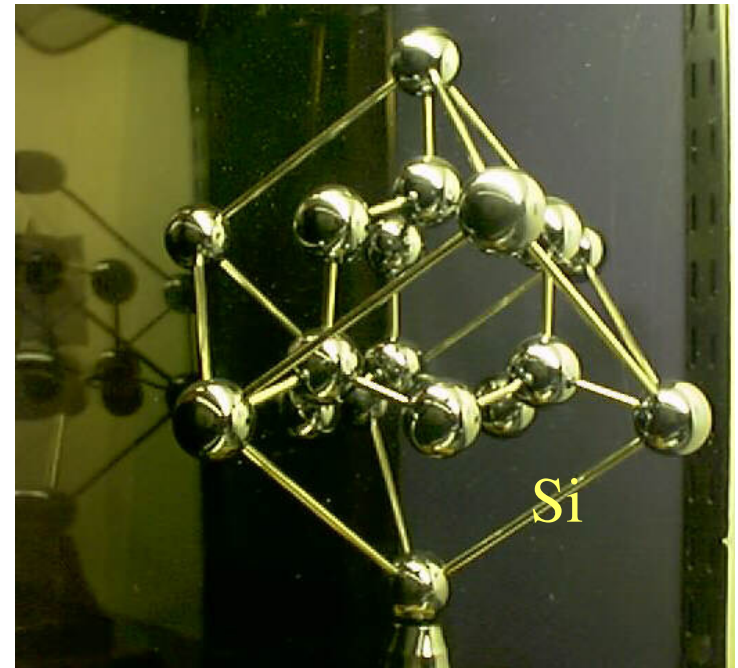
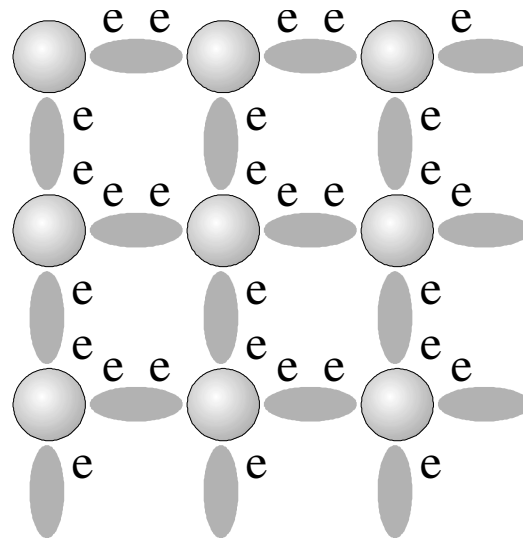
# Półprzewodniki

**Półprzewodnik to materiał, którego przewodnictwo możemy zmieniać w szerokim zakresie przez domieszkowanie, oświetlenie, przyłożenie napięcia, ogrzanie itp.**

# Materiały półprzewodnikowe

Pierwiastki z  
IV grupy układu  
okresowego:

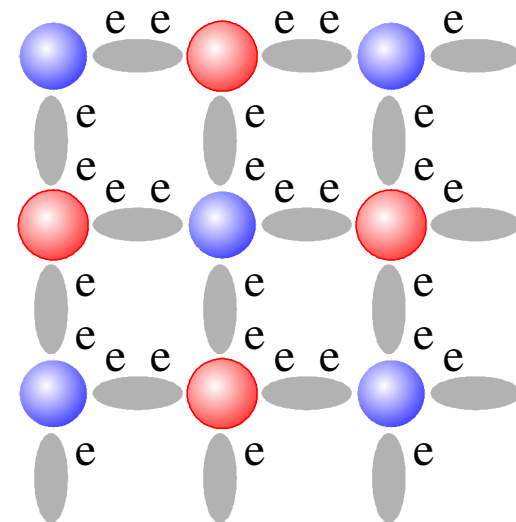
C, Si, Ge, Sn,  
związki: SiC.



Sieć blendy cynkowej

Związki pierwiastków grup III i V:  
AlN, GaN, GaP, GaAs, InSb itd.

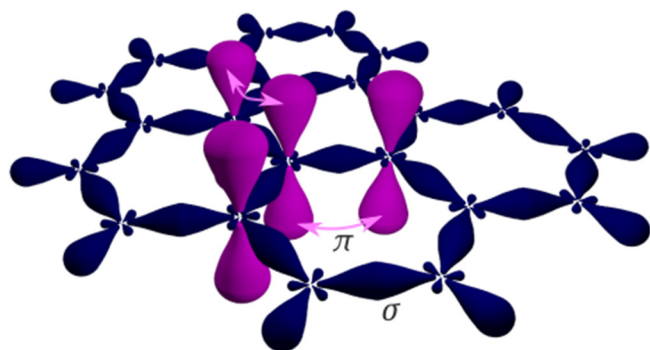
Związki pierwiastków grup II i VI:  
ZnO, ZnS, CdSe, MgTe itd.



# Organiczne półprzewodniki z wiązaniami sprzężonymi

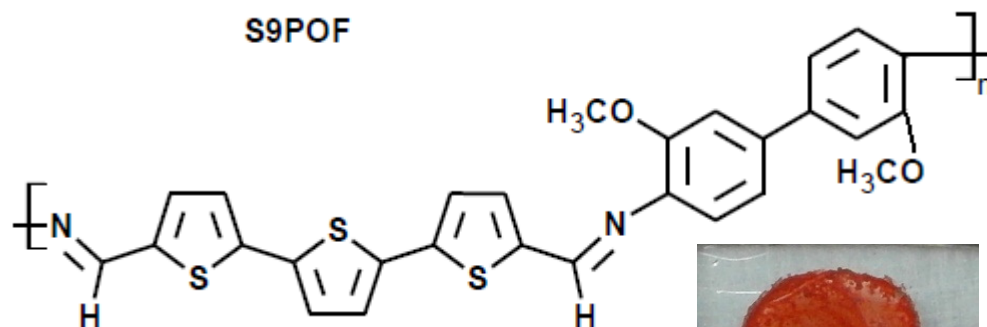
System z wiązaniami sprzężonymi posiada nakładające się na siebie orbitale  $\pi$ . Elektrony na orbitalach  $\pi$  są uśrednione, zatem takie związki mogą przewodzić.

grafen (półmetal)



© Ponor - own work, CC BY-SA 4.0,  
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=92461297>

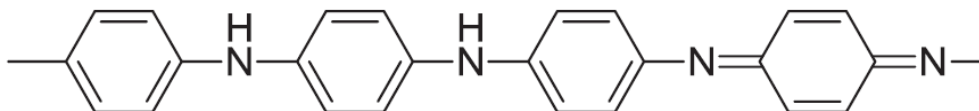
S9POF



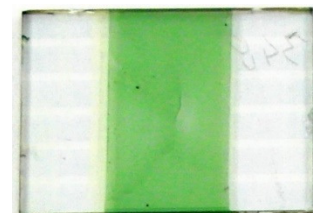
poliazometina (półprzewodnik)



Wiązania sprzężone reprezentowane są na schematach jako naprzemienne wiązania podwójne i pojedyncze.

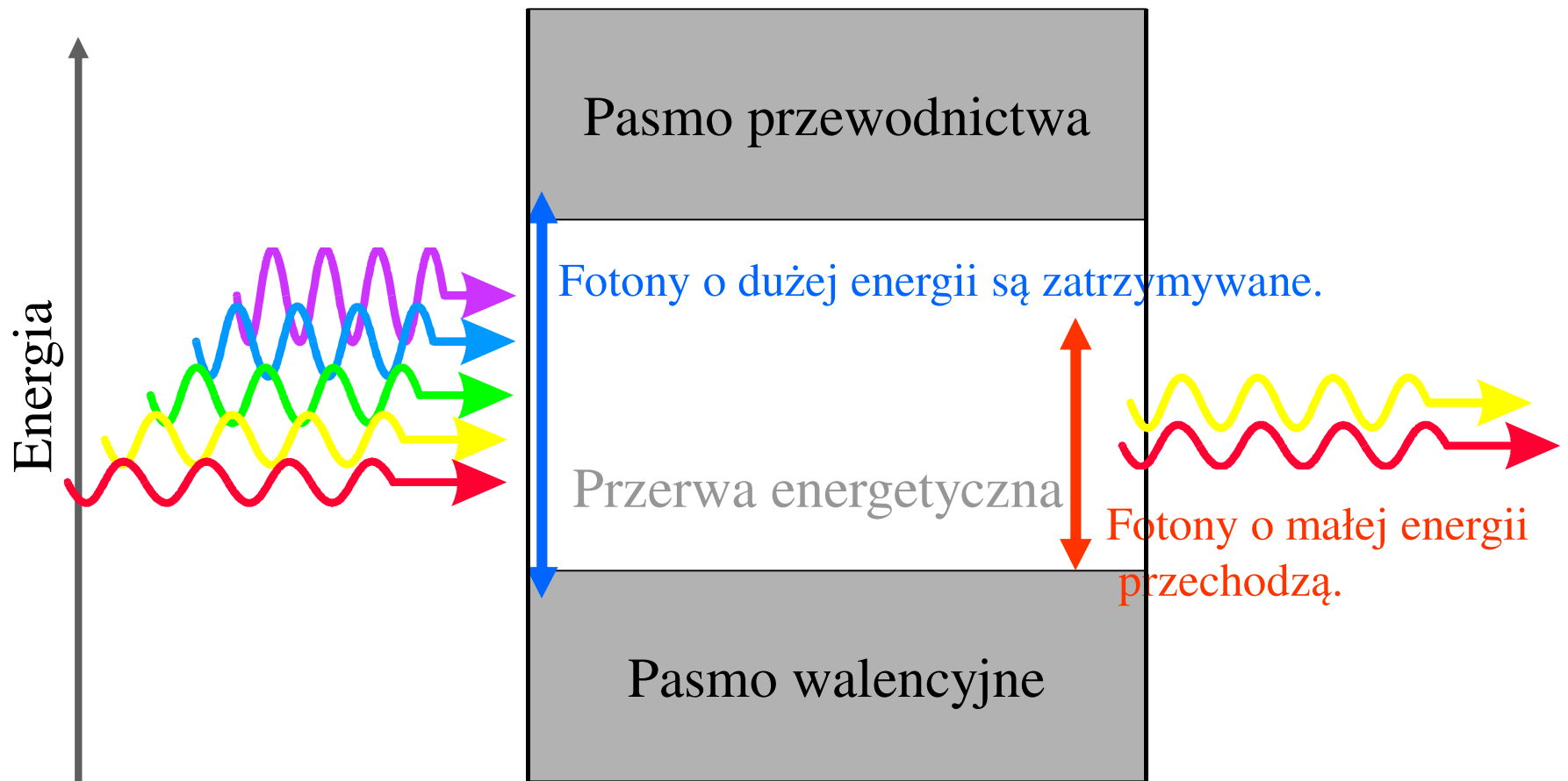


polianilina (półprzewodnik)

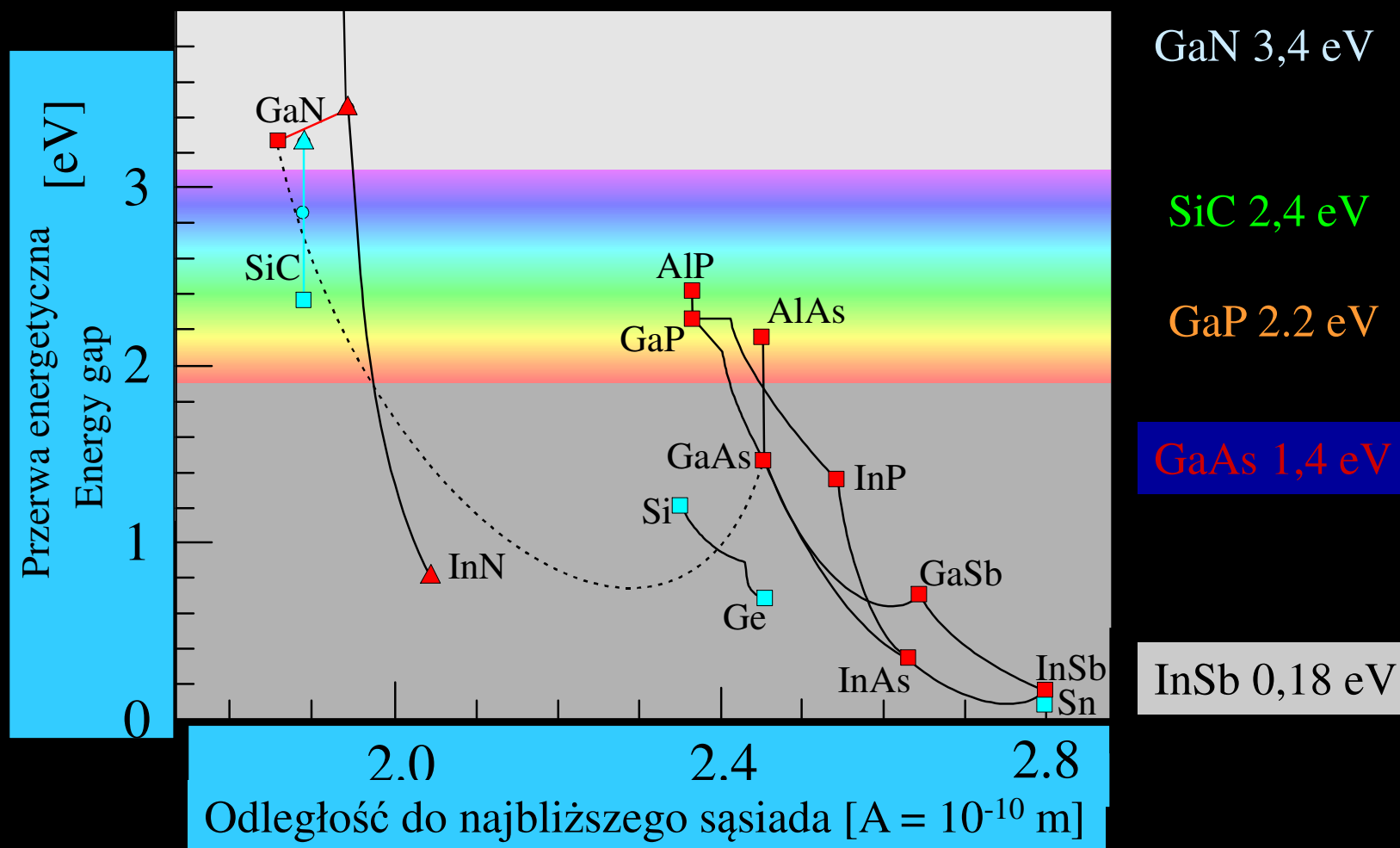


Nobel Prize in Chemistry, 2000, for discovery and development of conductive polymers.

# Absorpcja w kryształach

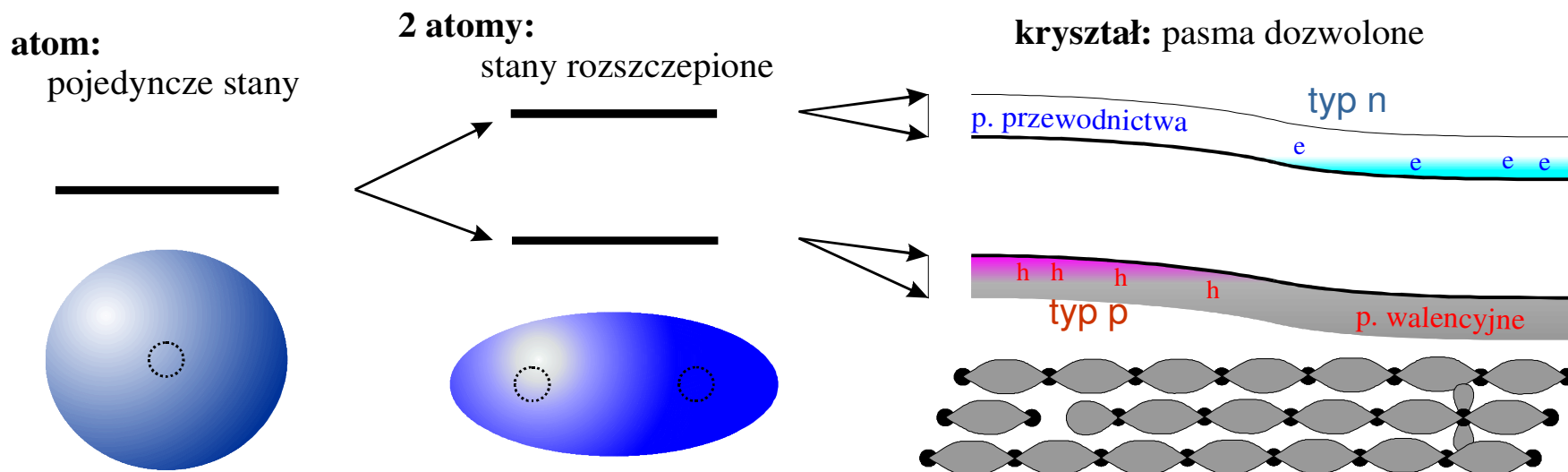


# Przerwy energetyczne półprzewodników z grupy IV i grupy III-V



\* kolorowe kryształy \*

# Pasma w energetyczne w kryształe

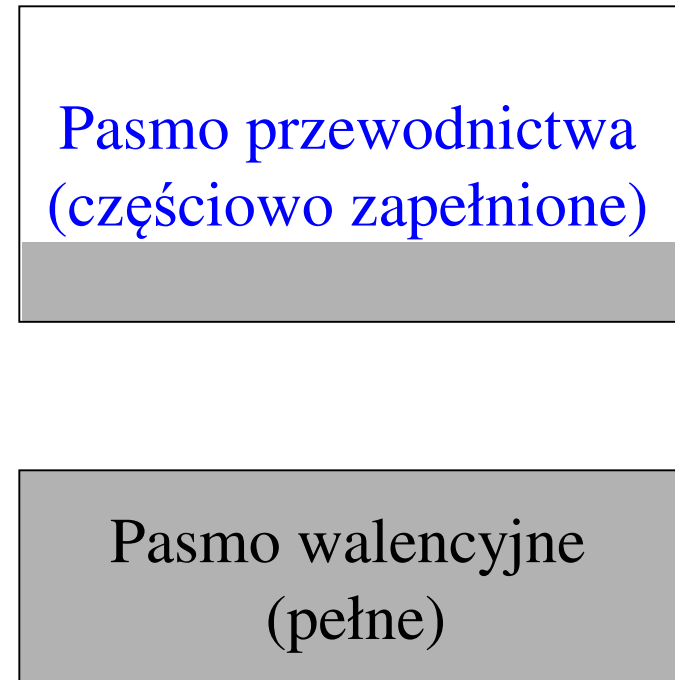
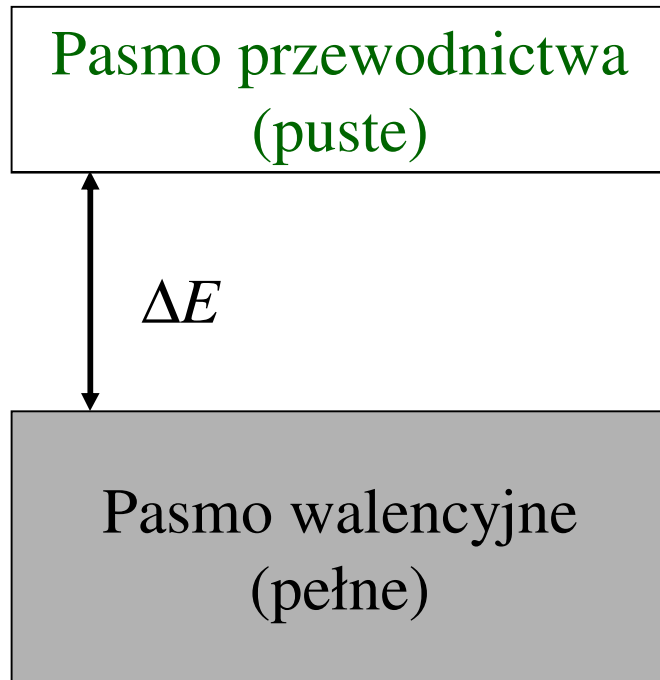


Elektron zamknięty w atomie może mieć tylko pewne stany kwantowe o określonych energiach.

Połączenie dwóch atomów powoduje, że liczba stanów podwaja się.

Kryształ powstaje przez połączenie bardzo wielu atomów w sposób niezwykle uporządkowany. Prowadzi to do powstania pasm stanów dozwolonych, oddzielonych pasmami zabronionymi.

# Półprzewodnik i metal



Koncentracja  $n$  dana jest funkcją wykładniczą:

$$n = N_0 \exp\left(-\frac{\Delta E}{2k_B T}\right)$$

Mogą osiągać wysokie ruchliwości.

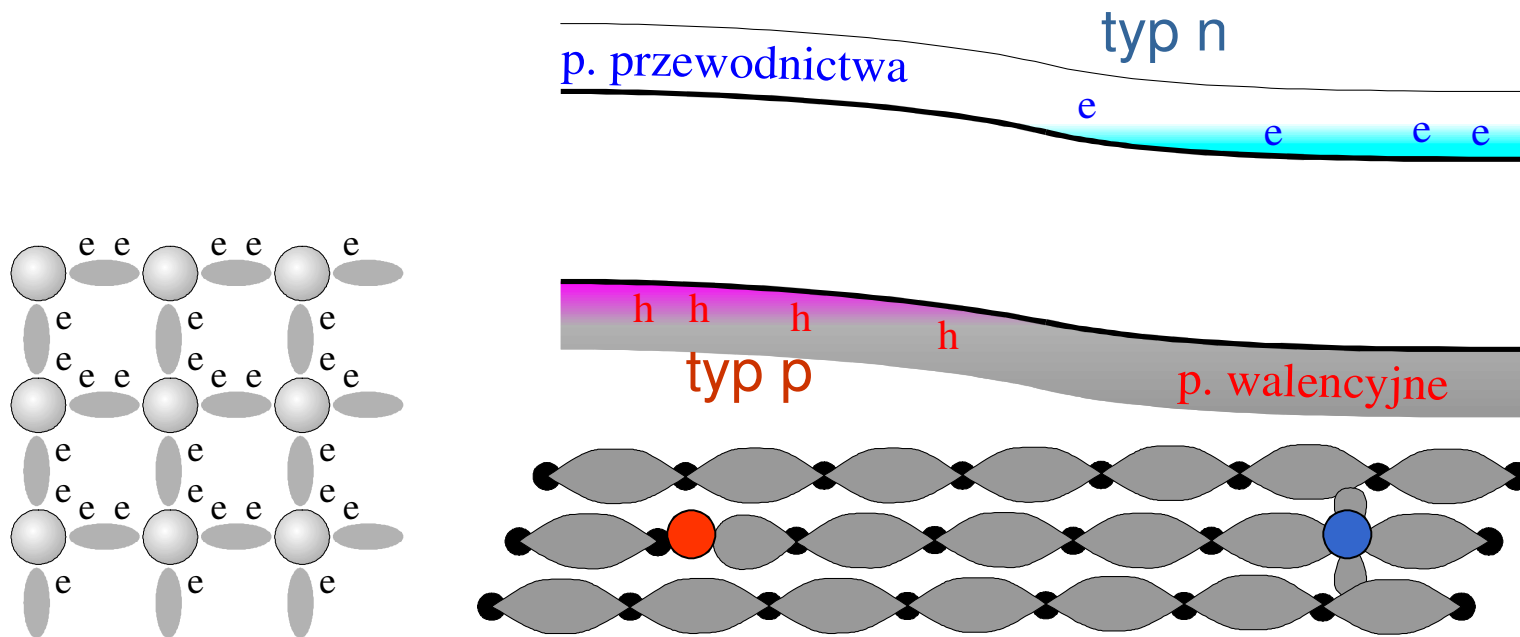
Stała koncentracja nośników.

**Cu:**  $n = 8.5 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\mu = 60 \text{ cm}^2/\text{Vs}$

**GaAs:**  $n = 10^8 - 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ,  
 $\mu = 1000 - 3\,000\,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$

# Elektrony i dziury

W idealnym kryształe półprzewodnika jest tyle samo elektronów, ile stanów w paśmie walencyjnym.

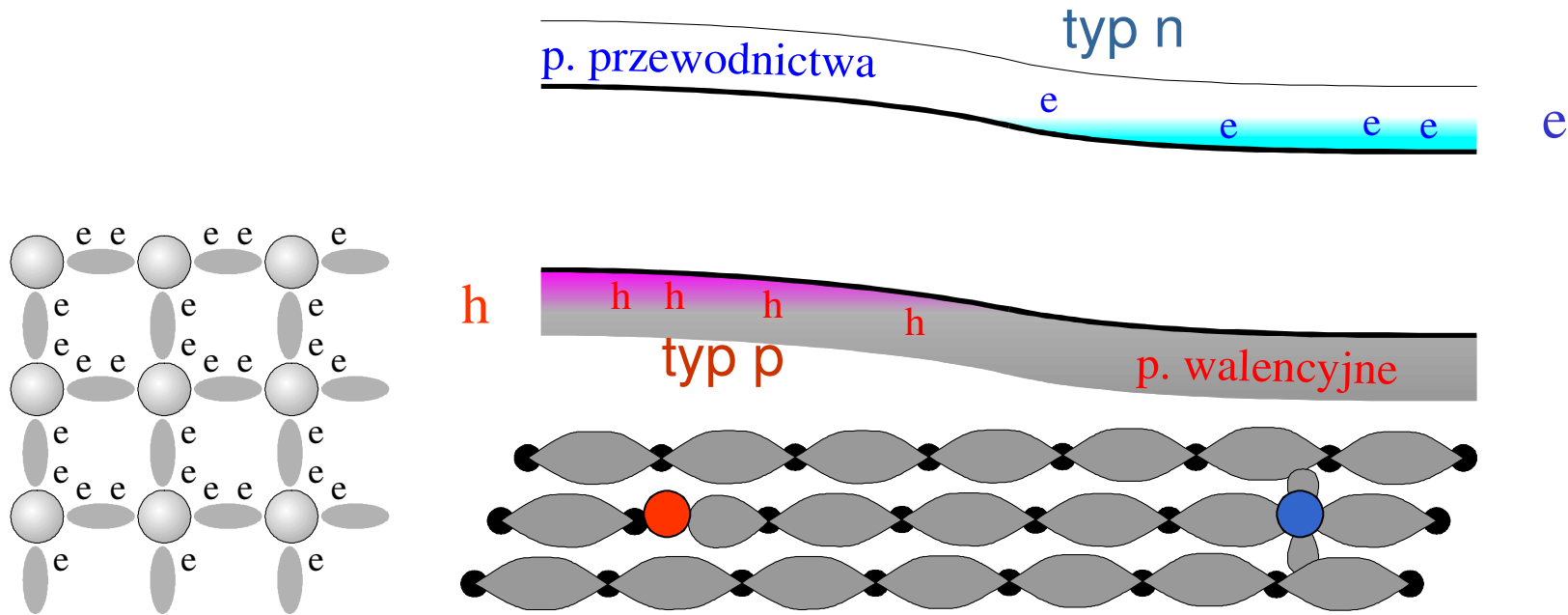


Dodając pierwiastki o mniejszej liczbie elektronów wprowadzamy dziury w paśmie walencyjnym. Dziury zachowują się, jak cząstki mające ładunek dodatni.

Dodając pierwiastki o większej liczbie elektronów obsadzamy pasmo przewodnictwa.

# Przewodnictwo typu n i p

W idealnym kryształe półprzewodnika jest tyle samo elektronów, ile stanów w paśmie walencyjnym.



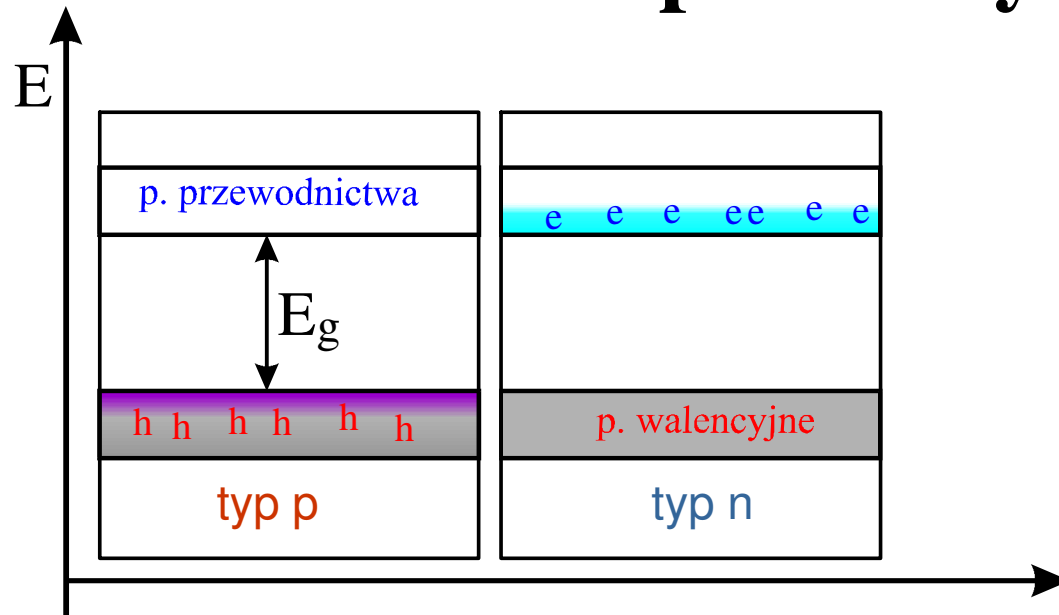
W półprzewodnikach prąd elektryczny może być przewodzony przez niosące ładunek ujemny elektrony (materiał typu n) lub przez naładowane dodatnio dziury (materiał typu p).

# Złącze p-n, diody

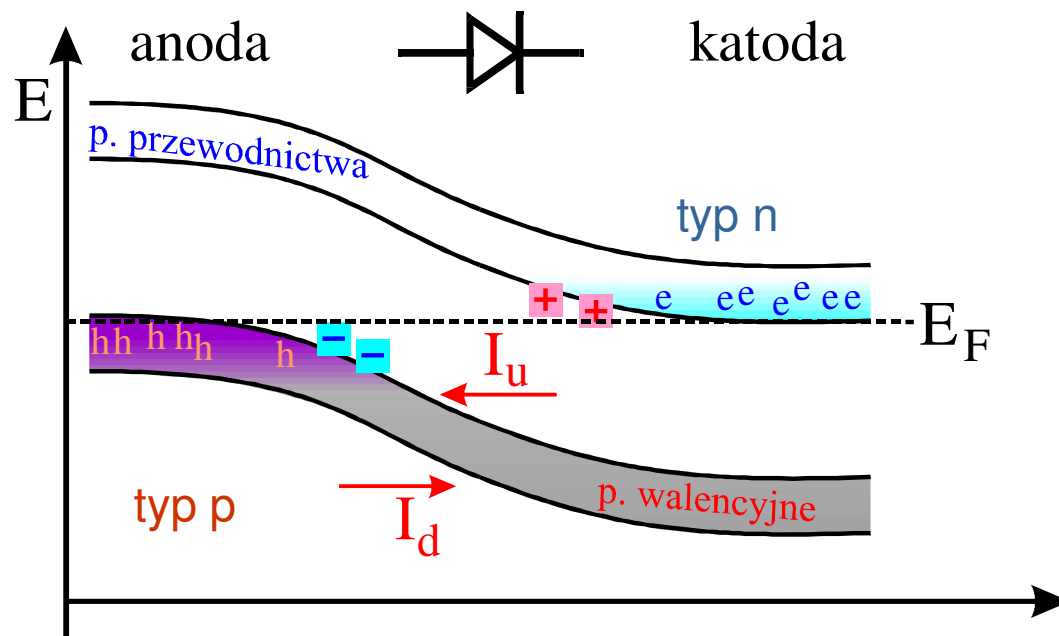
Tworząc struktury z materiałów przewodzących o różnych właściwościach możemy otrzymać złącza o nieomowych charakterystykach, czyli takich gdzie prąd nie będzie proporcjonalny do napięcia.

Przykładami mogą być złącza metal-półprzewodnik (Schottky), heterozłącza (dwa różne półprzewodniki) czy złącza p-n składające się z dwóch warstw o przewodnictwie p i n wytworzonych w tym samym materiale.

# Model pasmowy złącza p-n



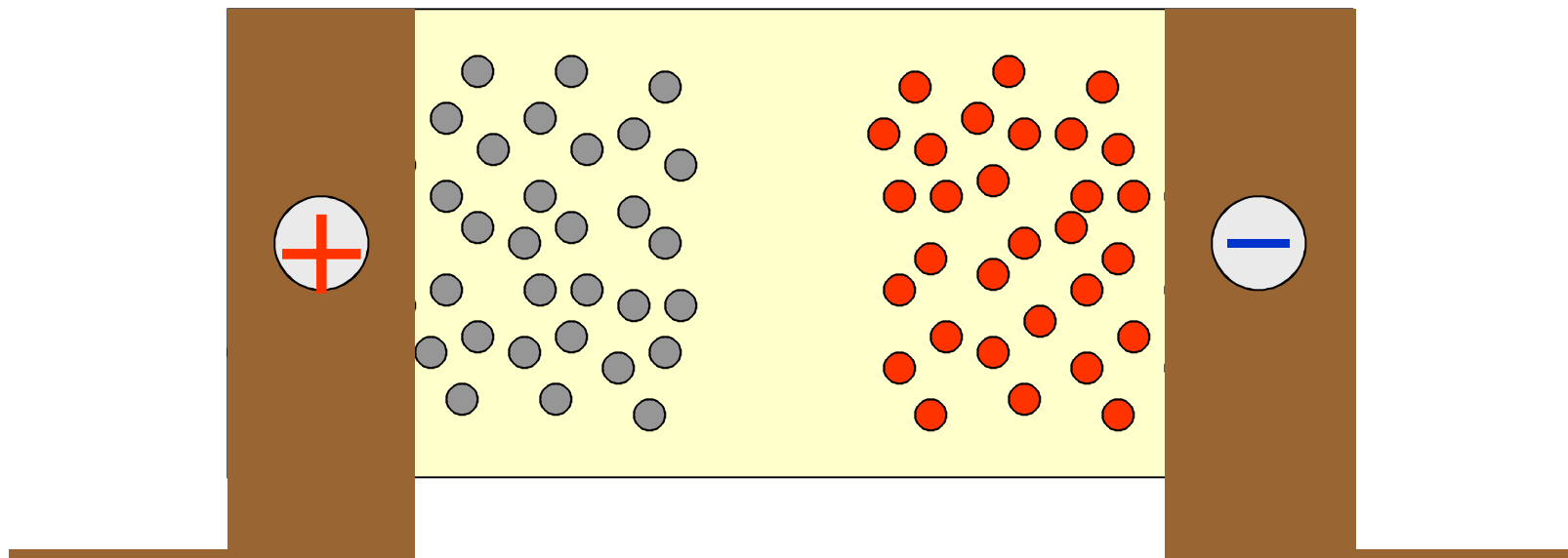
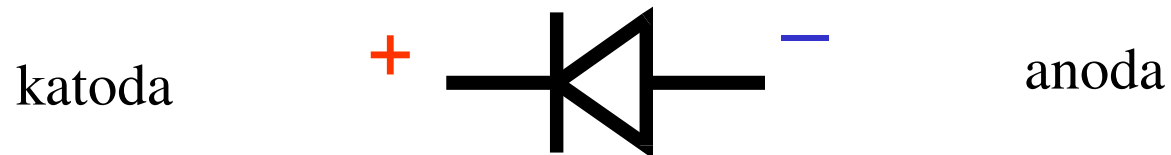
Po połączeniu materiału typu n i typu p elektrony i dziury zaczną płynąć, powodując ładowanie się obu materiałów przeciwnymi znakami i zmianę ich potencjałów.



Naładowane obszary będą odpychały kolejne nośniki aż ustali się równowaga. W warunkach równowagi poziomy Fermiego będą takie same w obu materiałach (w p-typie i n-typie)

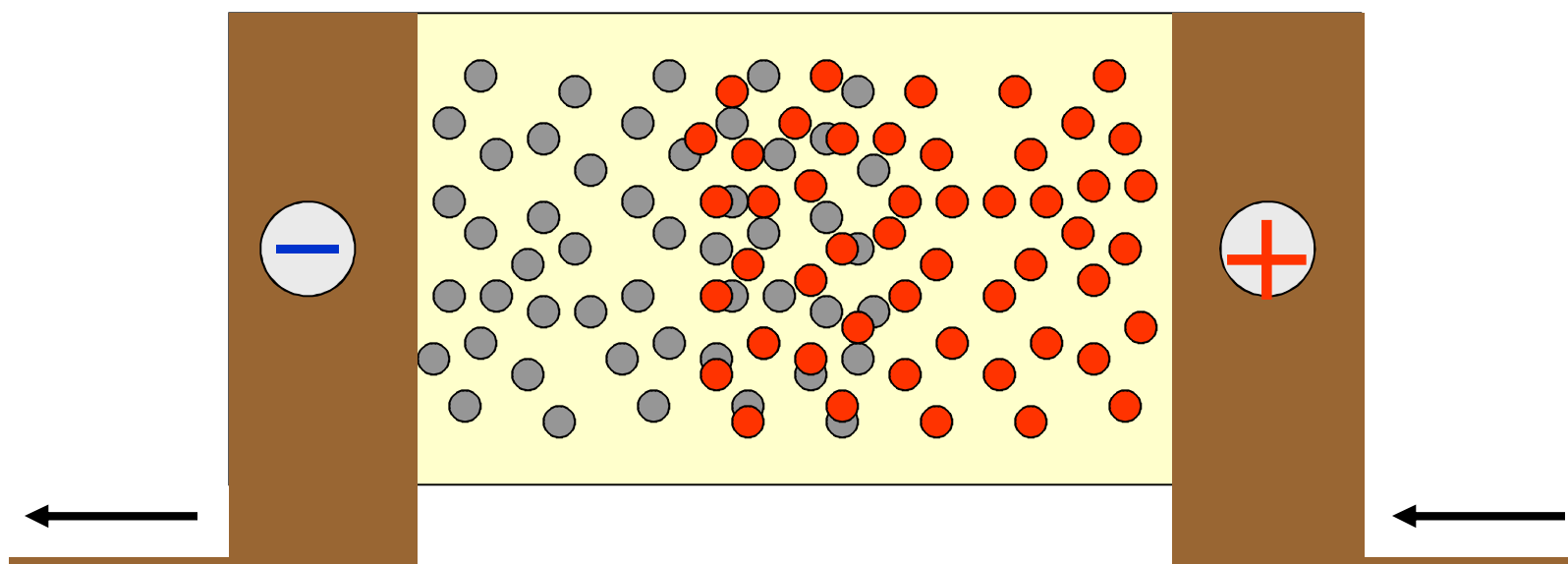
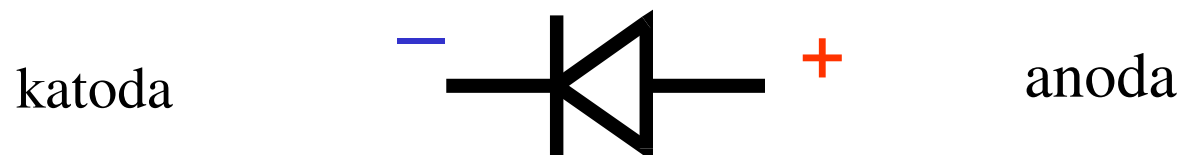
$E$  - energia elektronów

# Dioda półprzewodnikowa, -



kierunek zaporowy

# Dioda półprzewodnikowa, +



kierunek przewodzenia

# Przykłady diod

Dioda Zenera służy do stabilizacji napięcia.



Zener, Si



Si

Dioda prostownicza Si  
pracuje na prądach do  
1 A.



Ge

Detekcyjna dioda  
germanowa. Ma  
niską barierę i dużą  
czułość.



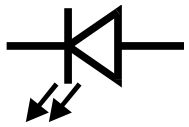
LED

Czerwona dioda  
świecąca wykonana z  
GaAsP/GaP.

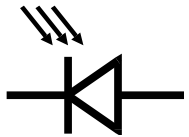
# Elementy półprzewodnikowe



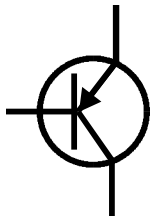
Diody prostujące - wymuszają określony kierunek prądu.



Diody świecące - emitują światło o określonej barwie (długości fali).

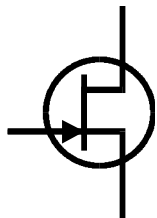


Fotodiody - zamieniają energię świetlną na elektryczną (fotoogniwa, fotodetektory).

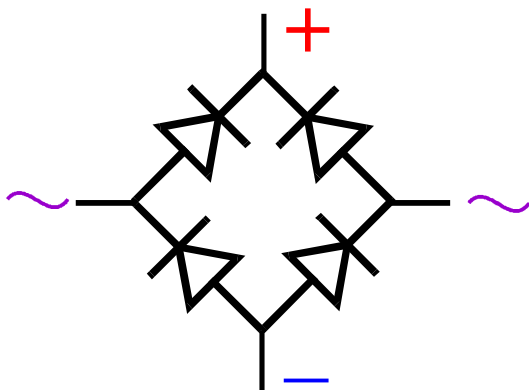


Tranzystory

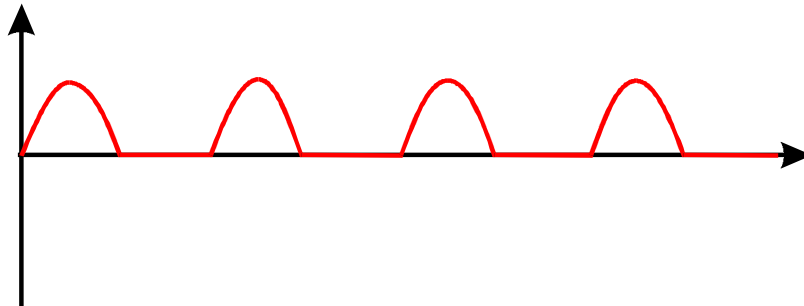
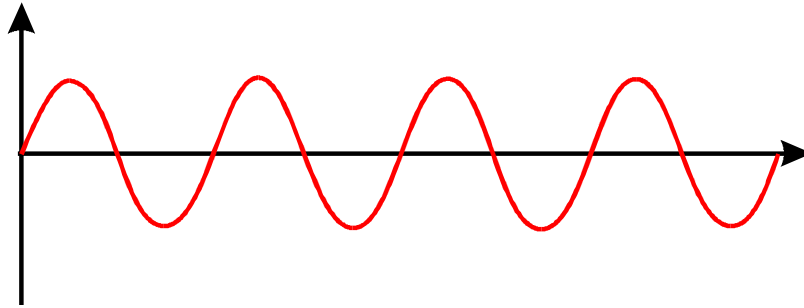
- elektroniczne zawory - sterują przepływem prądu,
- wzmacniacze - przepuszczają znacznie większy prąd, niż pobierają do sterowania.



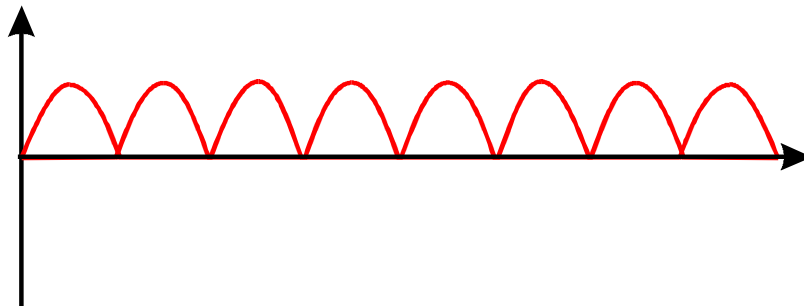
# Prostowanie prądu



mostek Graetza

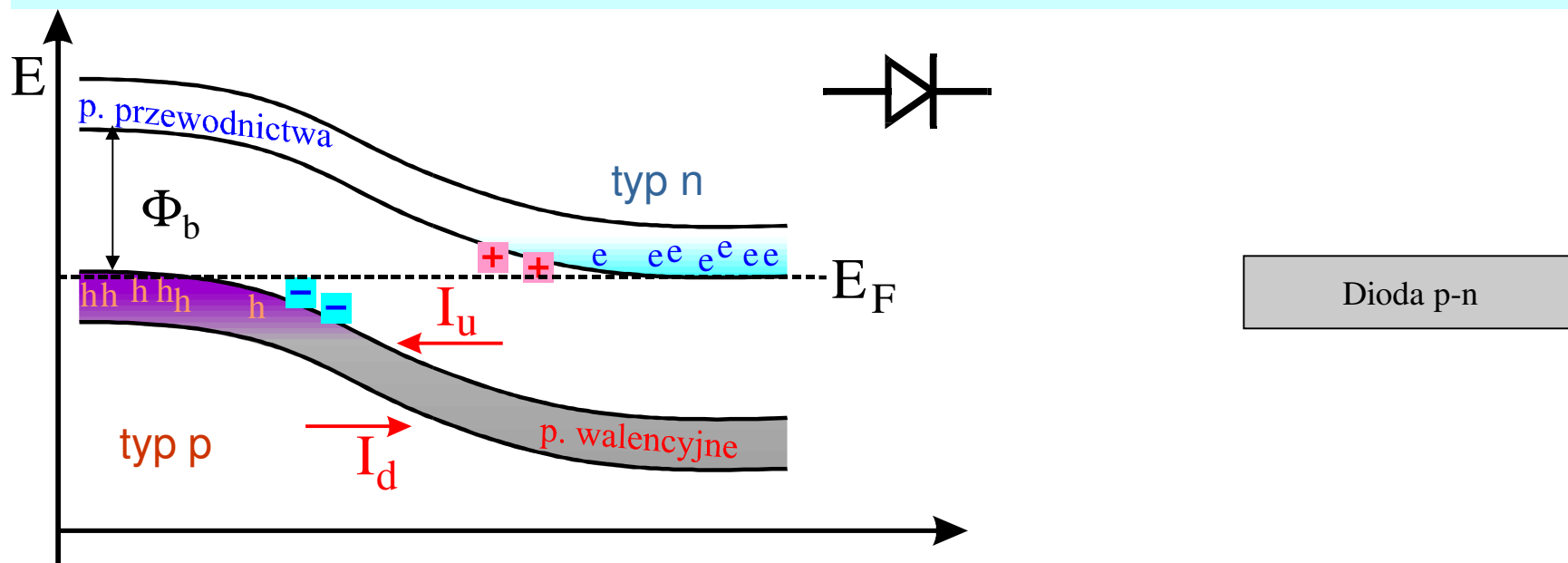


Dioda dopuszcza przepływ tylko w jednym kierunku, czyli prostuje prąd.



Mostek Graetza wykorzystuje obie połowy sygnału.

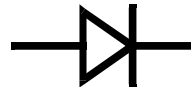
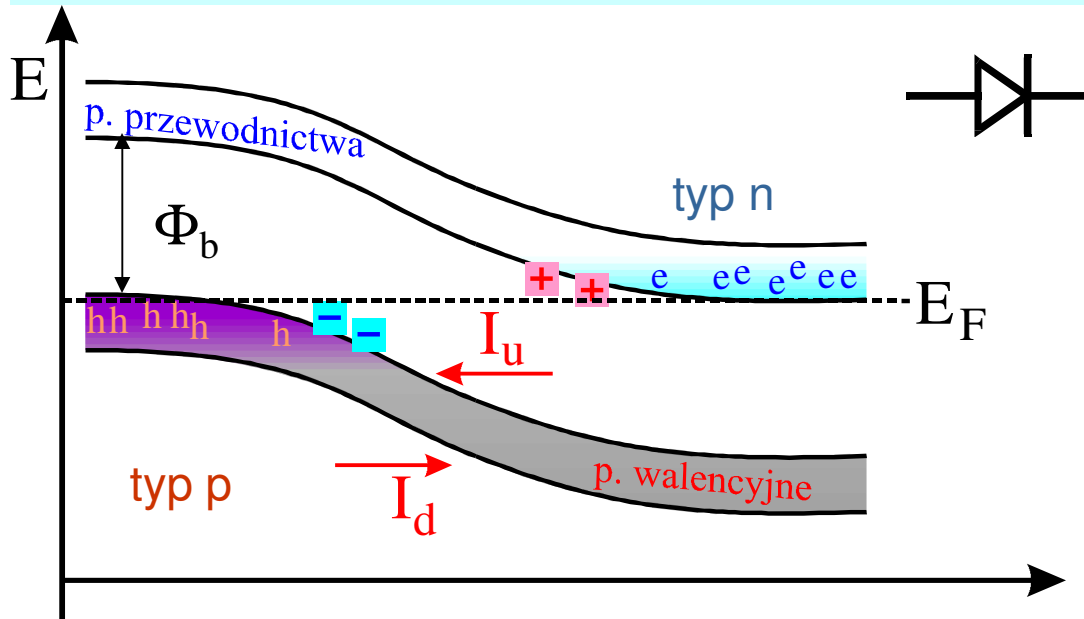
# Teoretyczny opis diody (złącza p-n)



W obszarze bliskim granicy p-n nie ma ani dziur, ani elektronów, powstaje warstwa o dużej oporności (obszar zubożony). W warstwie tej pozostają jedynie zjonizowane domieszki. Dzięki nim, w tym obszarze powstaje pole elektryczne i wbudowane napięcie elektryczne  $V_b$ . Wytwarza się tam równowaga przepływów dyfuzyjnego i dryfu obu rodzajów nośników (elektronów i dziur). Elektrony, aby dyfundować z obszaru typu n do obszaru p muszą pokonać barierę energii o wysokości  $\Phi_b = eV_b$ . Podobnie dziury.

$E$  - energia elektronów

# Nośniki płynące przez diodę



Dioda p-n

Zależność liczby elektronów od ich energii dana jest rozkładem Fermiego:

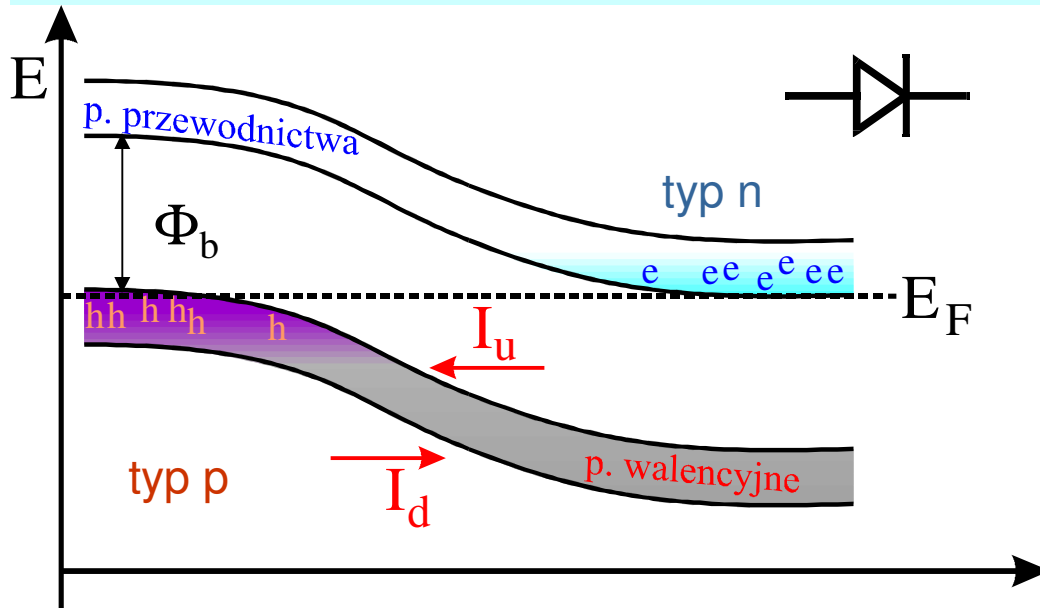
$$f(E) = \frac{1}{\exp((E - E_F)/k_B T) + 1}$$

Na ogół możemy przybliżyć go rozkładem Boltzmana:  $n(E) \approx n_0 \exp\left(-\frac{E}{k_B T}\right)$

Transport nośników odbywa się na skutek unoszenia przez pole elektryczne  $F$  lub dyfuzji proporcjonalnej do gradientu koncentracji  $dn/dx$ .

$$I = I_u + I_d = -en\mu F - eD \frac{dn}{dx}$$

# Natężenie prądu płynącego przez diodę



Rozpędzone elektrony wpadają do obszaru zubożonego (prąd dyfuzji), ale są z niego wypychane przez pole (prąd unoszenia). Bez napięcia prąd unoszenia i dyfuzyjny są równe.

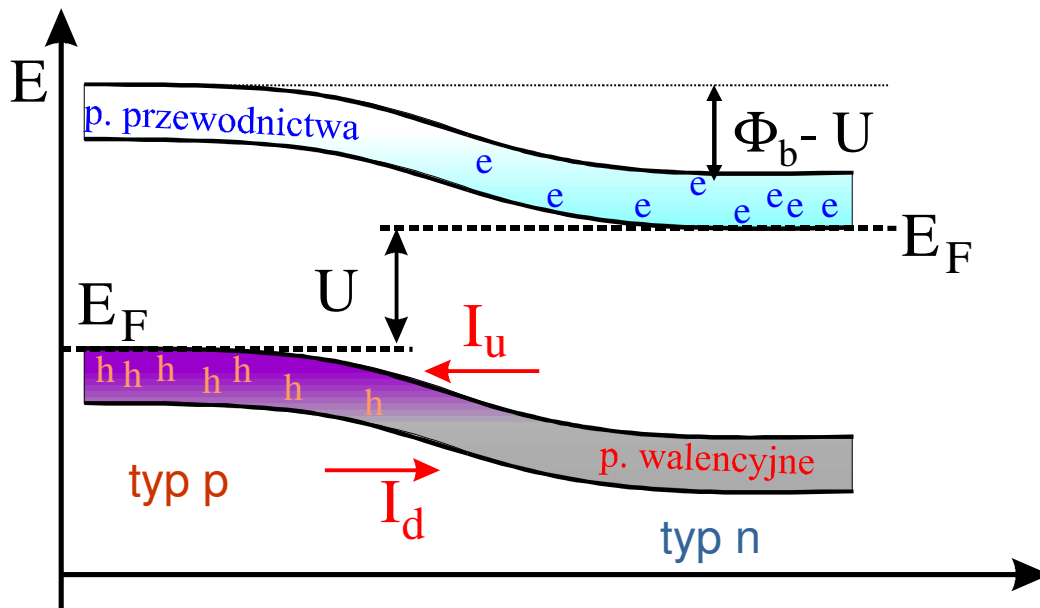
$$I_{d0} = -I_u = I_{d00} \exp\left(-\frac{\Phi_b}{k_B T}\right)$$

Energia elektronów zadana jest przez rozkład termiczny, a więc natężenie prądu dyfuzyjnego zmienia się wykładniczo z napięciem,  $U$ .

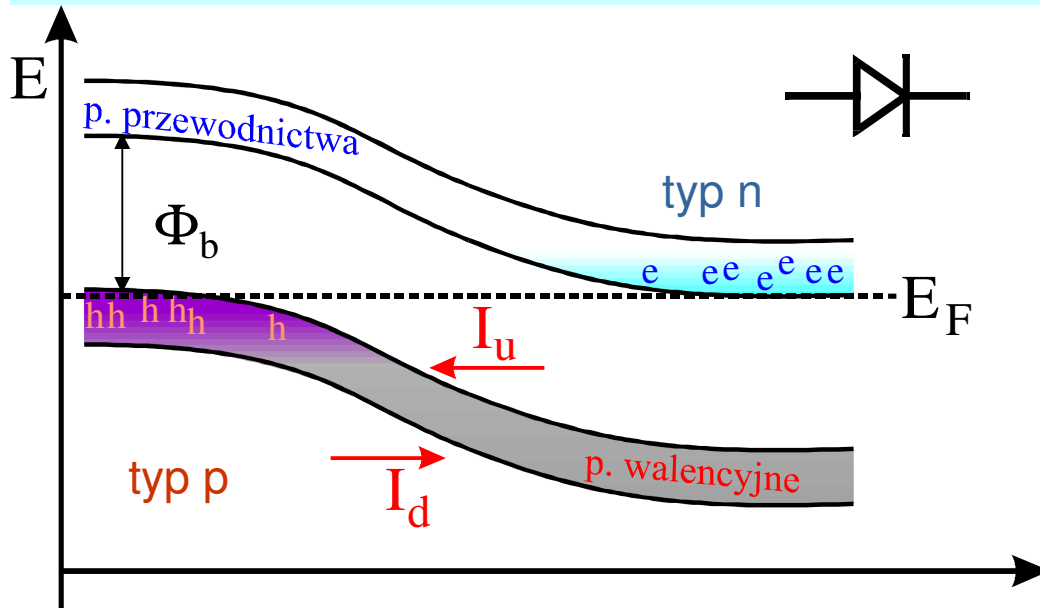
$$I_d(U) = I_{d00} \exp\left(-\frac{\Phi_b - eU}{k_B T}\right) = I_{d0} \exp\left(\frac{eU}{k_B T}\right)$$

Całkowity prąd wynosi  $I_u + I_d$ , zatem:

$$I(U) = I_{d0} \left( \exp\left(\frac{eU}{k_B T}\right) - 1 \right) \quad (5)$$



# Natężenie prądu płynącego przez diodę

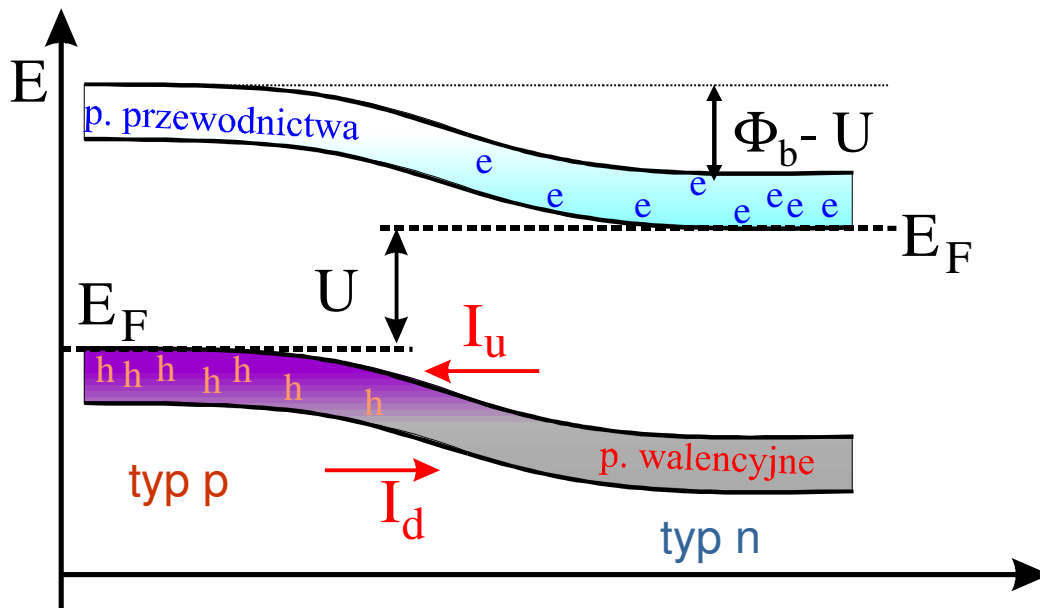


Równanie Shockleya:

$$I = I_0 \left( \exp \left( \frac{Ue}{nk_B T} \right) - 1 \right)$$

Natężenie prądu wykładniczo zmienia się z napięciem.

Parametry  $I_0$  (prąd nasycenia) i  $n$  (współczynnik niedoskonałości) można obliczać, ale w praktyce trzeba ustalić poprzez pomiar.



# Prąd elektronów w półprzewodniku.

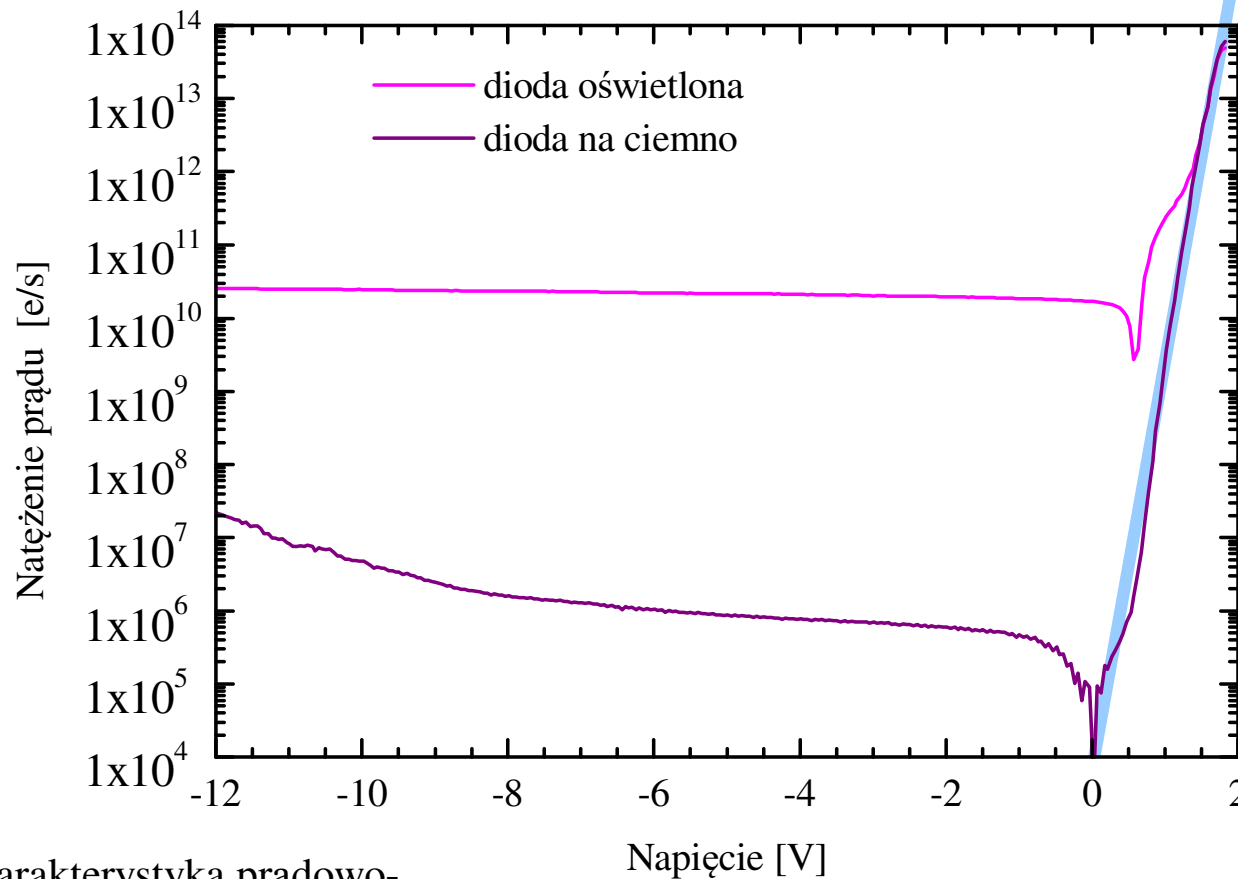
Liczba nośników  
(koncentracja  $n$ ) dana jest  
funkcją wykładniczą:

$$I = I_0 \exp\left(\frac{eU}{k_B T}\right)$$

$$V_T = \frac{k_B T}{e}$$

$$I = I_0 \exp\left(\frac{U}{V_T}\right)$$

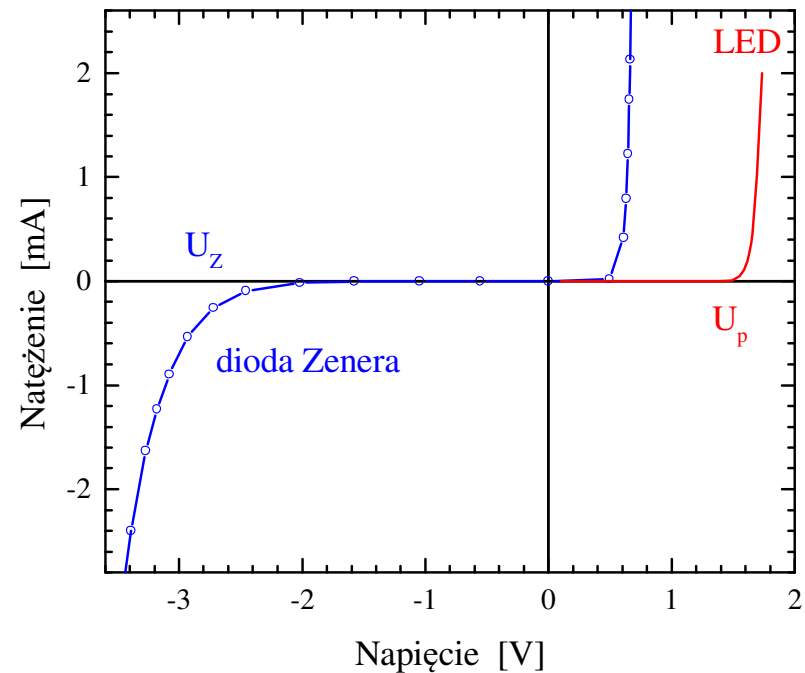
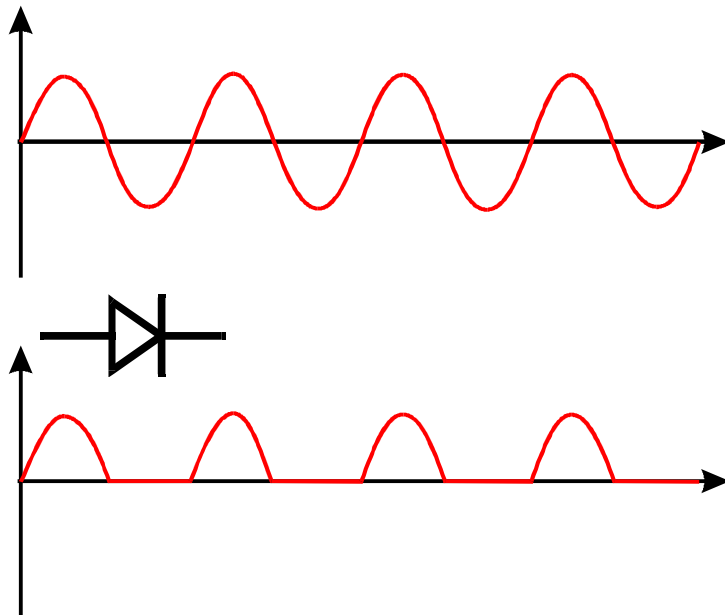
W temperaturze 20°C:  
 $V_T = 25 \text{ mV}$ .



Charakterystyka prądowo-  
napięciowa fotodiody GaN .

# Rodzaje diod

Złącza metal-półprzewodnik (Schottky), heterozłącza (różne półprzewodniki) czy złącza p-n składające się z dwóch warstw o przewodnictwie p i n tworzą **diody**.

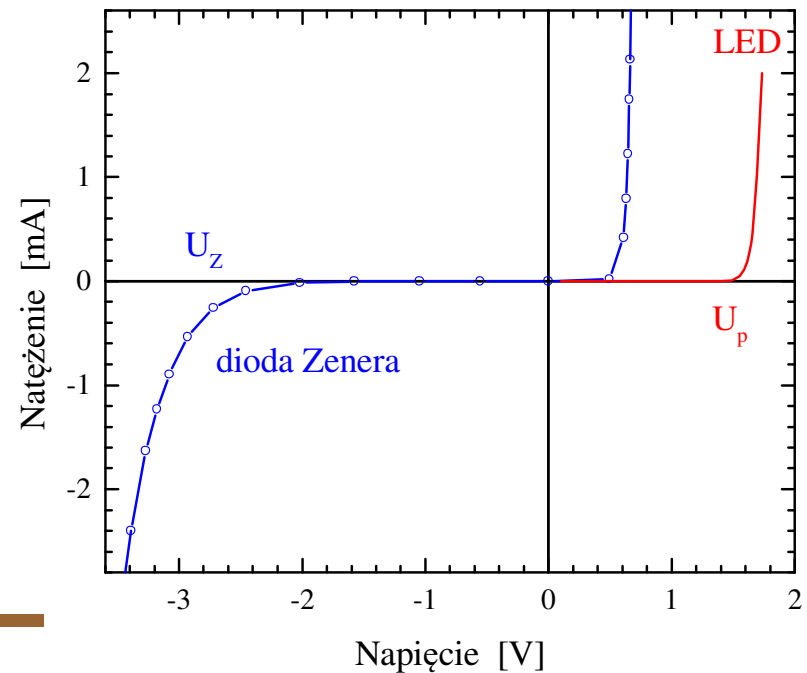
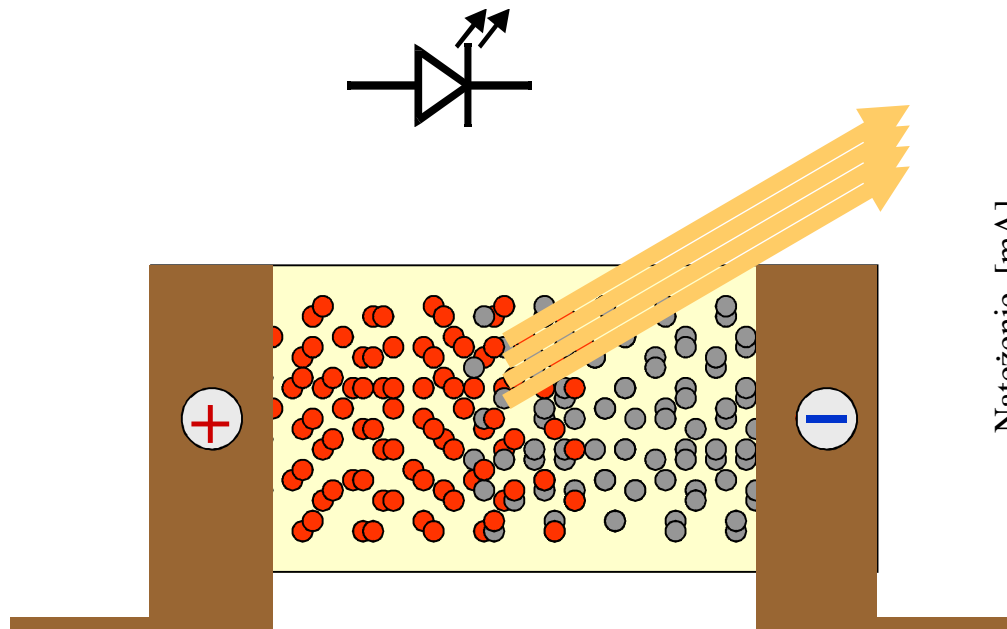


Równanie Shockleya: 
$$I = I_0 \left( \exp \left( \frac{U_e}{n k_B T} \right) - 1 \right)$$

Dioda dopuszcza przepływ tylko w jednym kierunku, czyli prostuje prąd.

# Dioda świecąca

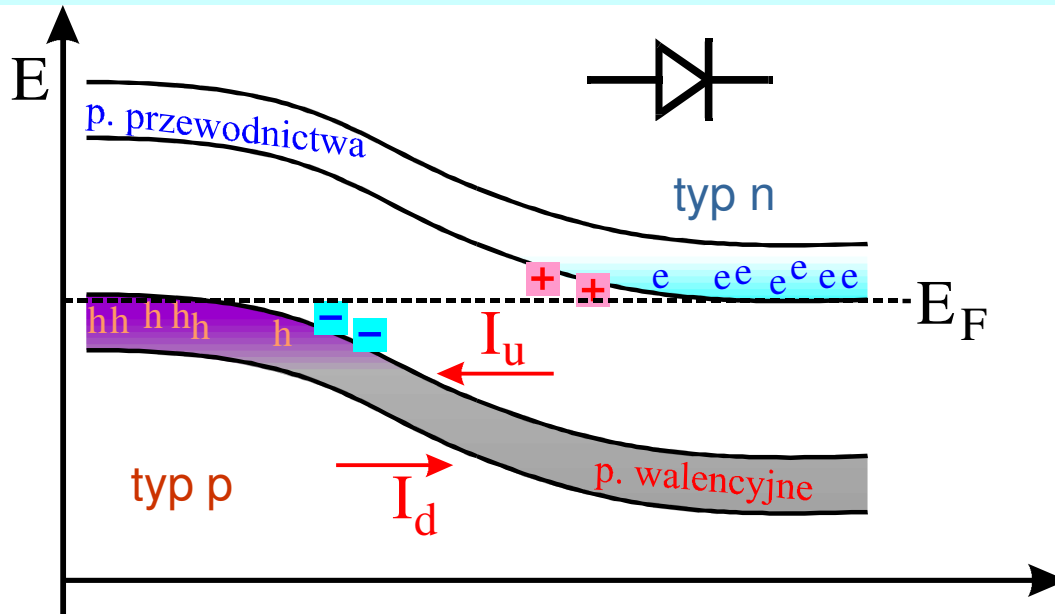
Przepływ prądu w kierunku przewodzenia oznacza konieczność rekombinacji elektronów i dziur w złączu.



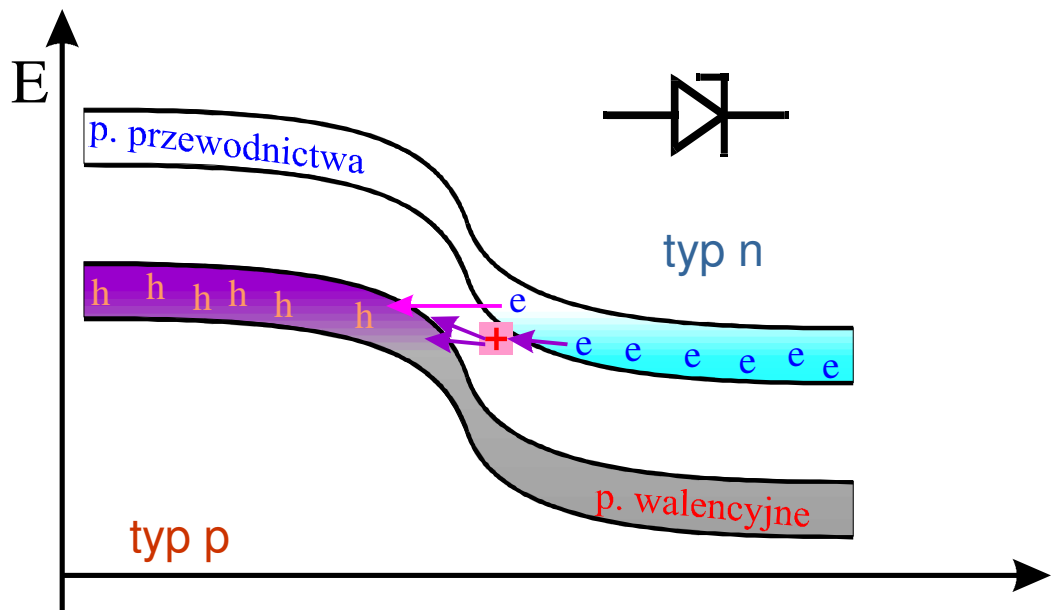
rekombinacja pary **elektron**-**dziura** → **emisja fotonu**

Dioda świecąca

# Dioda Zenera

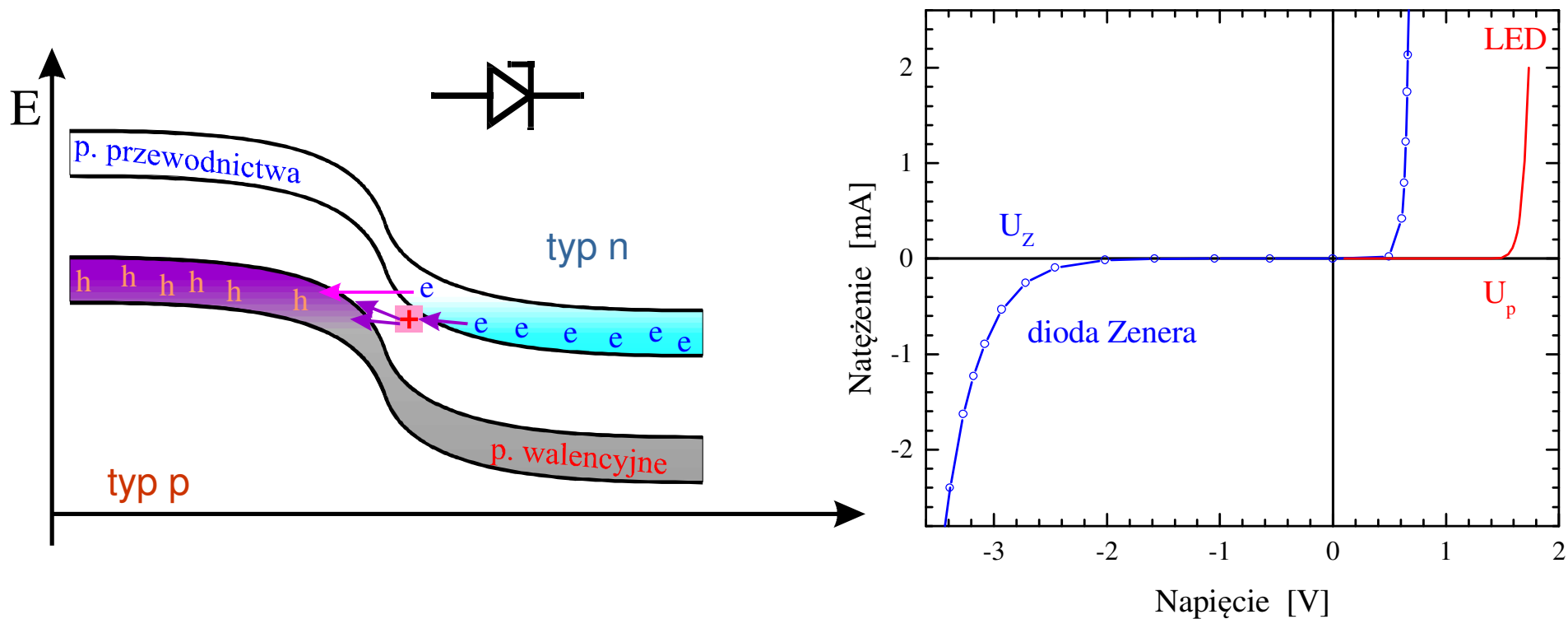


W przypadku słabo domieszkowanego złącza prąd wsteczny jest bardzo mały.



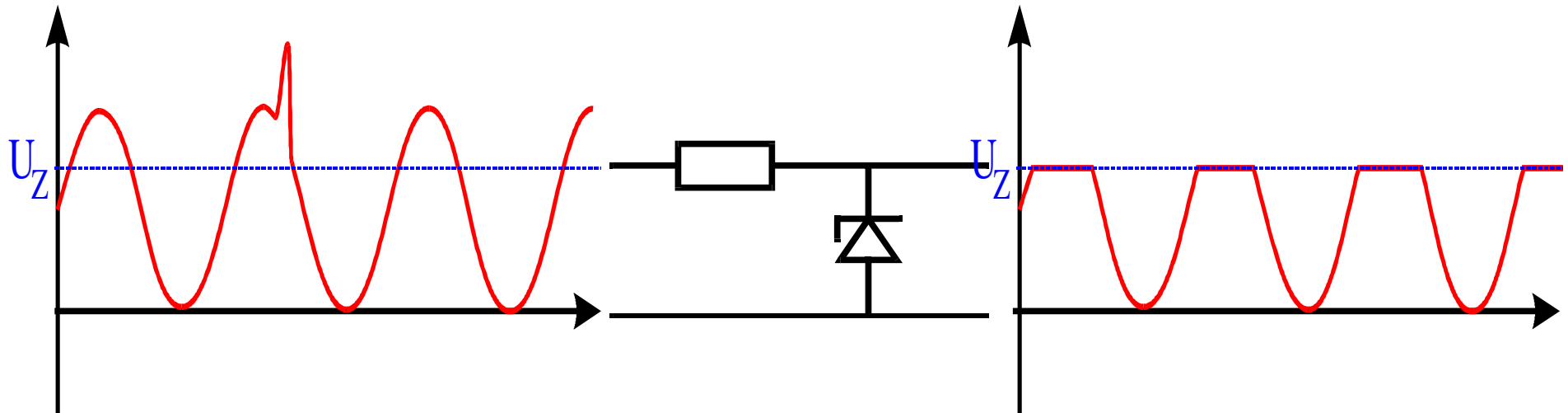
W silnie domieszkowanym złączu może nastąpić tunelowanie pomiędzy pasmami lub przebicie lawinowe. W tym drugim przypadku rozprędkzone elektrony wybijają kolejne nośniki z domieszek.

# Charakterystyka I-V diody Zenera

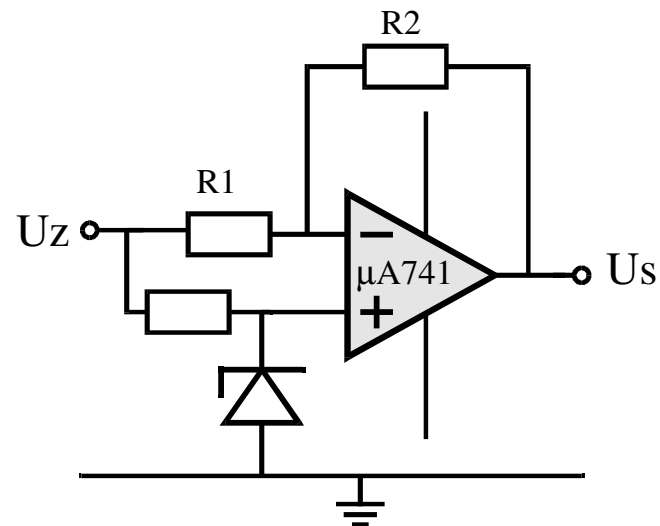


W silnie domieszkowanym złączu może nastąpić tunelowanie pomiędzy pasmami lub przebiecie lawinowe. W tym drugim przypadku rozpędzone elektrony wybijają kolejne nośniki z domieszek.

# Stabilizacja napięcia na diodzie Zenera



Diody Zenera wykorzystuje się jako zabezpieczenie przed przepięciami i do stabilizacji napięcia.

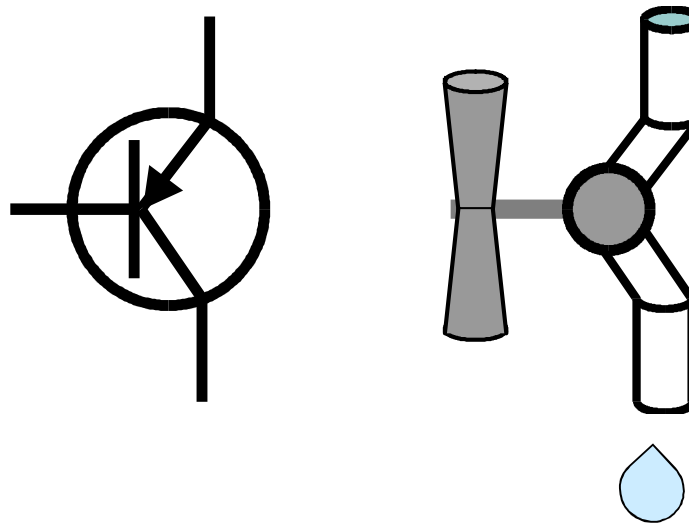


Stabilizator napięcia z diodą Zenera i wzmacniaczem operacyjnym.

# Złącze p-n, podsumowanie

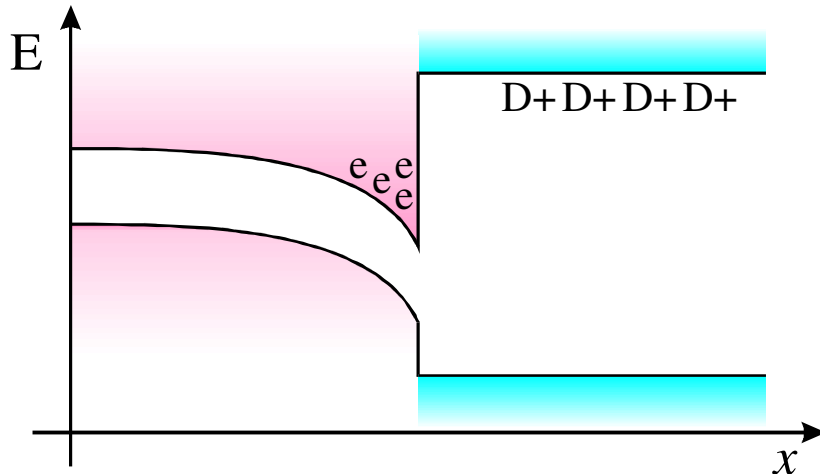
- W półprzewodniku typu n znacznie więcej jest nośników prądu o ładunku ujemnym (elektronów), niż nośników o ładunku dodatnim (dziur), w półprzewodniku typu p znacznie więcej jest dziur niż elektronów,
- **Złącze p-n (dioda) powstaje przez połączenie półprzewodników typu p i n.** 
- W obszarze bliskim granicy p-n nie ma ani dziur, ani elektronów, powstaje obszar zubożony, który stanowi warstwę o dużej oporności. W tym obszarze powstaje pole elektryczne dające różnicę potencjałów  $\Phi_b$ . Wytwarza się tam równowaga przepływów dyfuzyjnego i unoszenia obu rodzajów nośników (elektronów i dziur).
- Elektrony, aby dyfundować z obszaru typu n do obszaru p muszą pokonać barierę energii o wysokości  $\Phi_b$ . Podobnie dziury.
- **Przyłożenie do diody zewnętrznego napięcia w kierunku przewodzenia (+ do p, – do n)** powoduje obniżenie bariery energii dla elektronów i dziur. Zmniejsza się też szerokość obszaru zubożonego. **Powoduje to przepływ prądu.**
- **Przyłożenie zewnętrznego napięcia w kierunku zaporowym (– do p, + do n)**  podnosi wysokość bariery energii, **płyne wtedy jedynie bardzo niewielki prąd.**
- Zależność natężenia prądu od przyłożonego napięcia (umownie dodatniego w kierunku przewodzenia) opisuje wzór Shockley'a.
- Przyłożenie bardzo dużego napięcia w kierunku zaporowym może spowodować lawinową generację elektronów i dziur. Jest to wykorzystane w diodach Zenera, używanych jako wzorce napięcia.

# Tranzystory

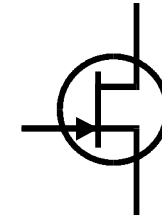


Tranzystor jest "zaworem" elektronicznym, dzięki któremu mały sygnał może sterować przepływem silnego prądu.

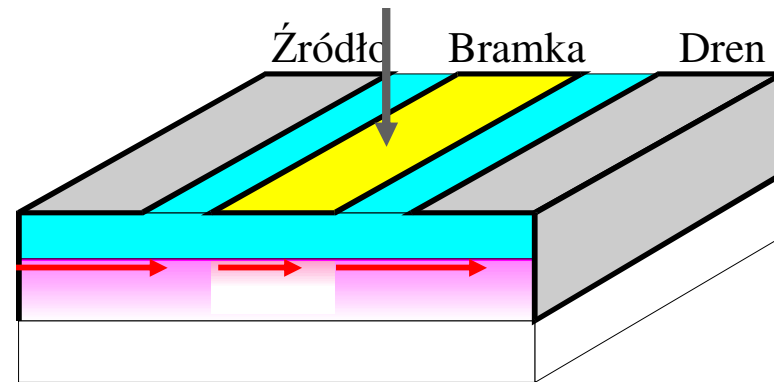
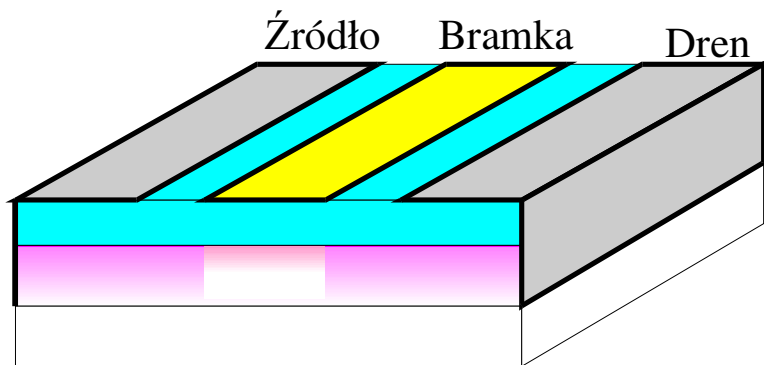
# Tranzystor polowy i HEMT



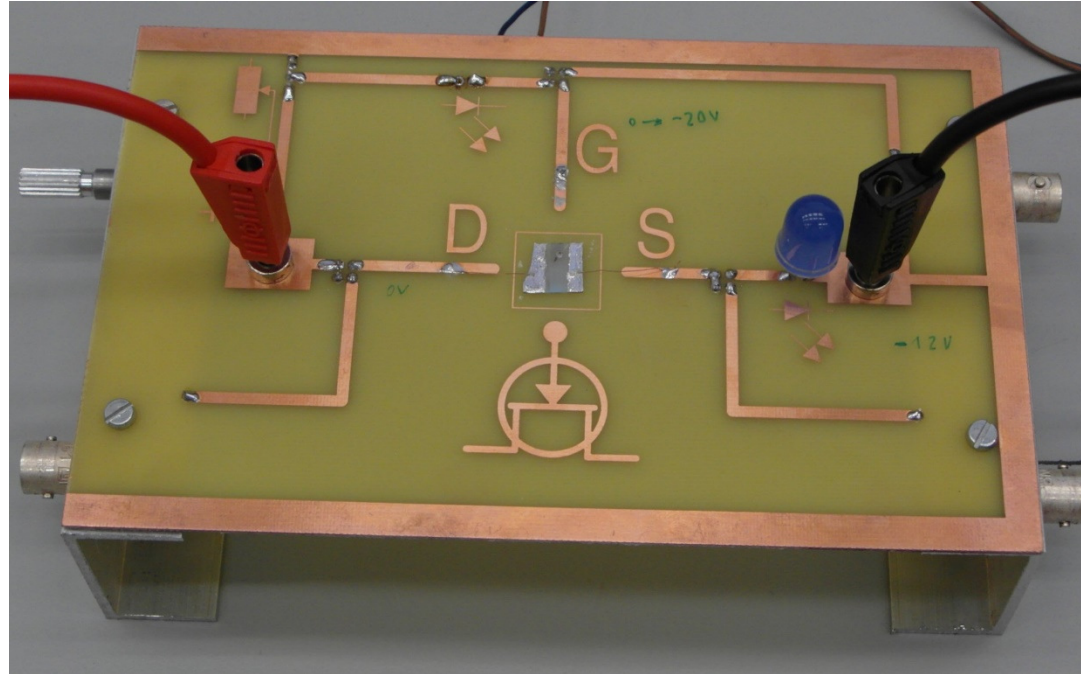
Struktura pasmowa złącza InAs/GaAs z elektronami odseparowanymi od donorów, co zapewnia wysoką ruchliwość.



HEMT - High Electron Mobility Transistor  
tranzystor z wysokoruchliwymi elektronami.  
Zastosowania: komunikacja satelitarna,  
telefonia komórkowa, urządzenia wysokiej mocy.

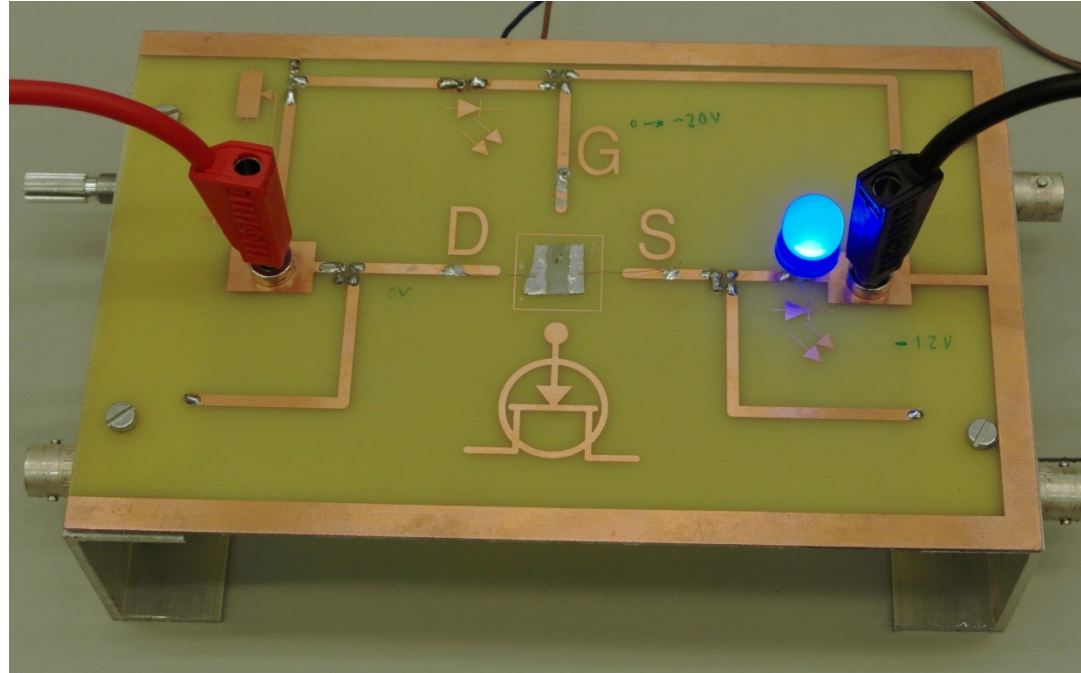


# Tranzystor polowy GaN



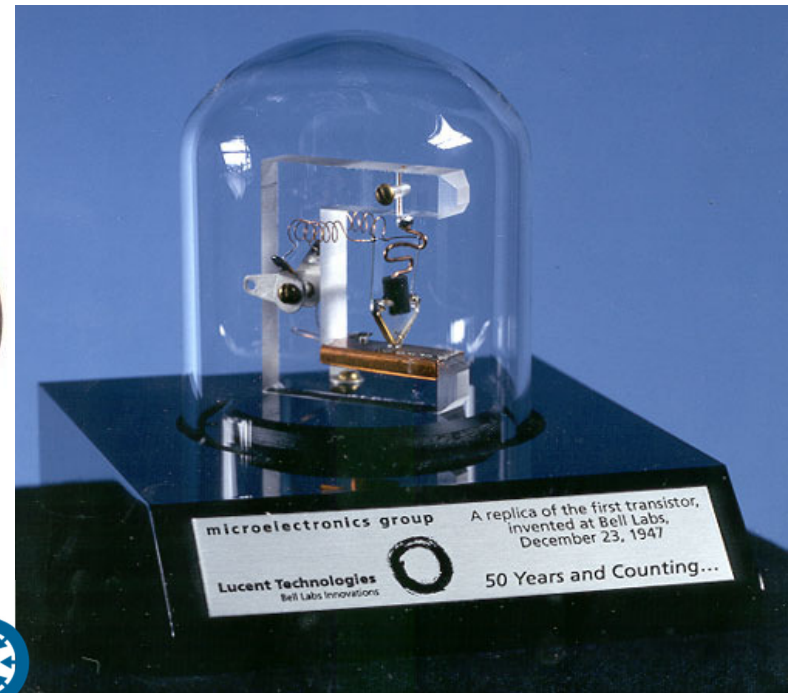
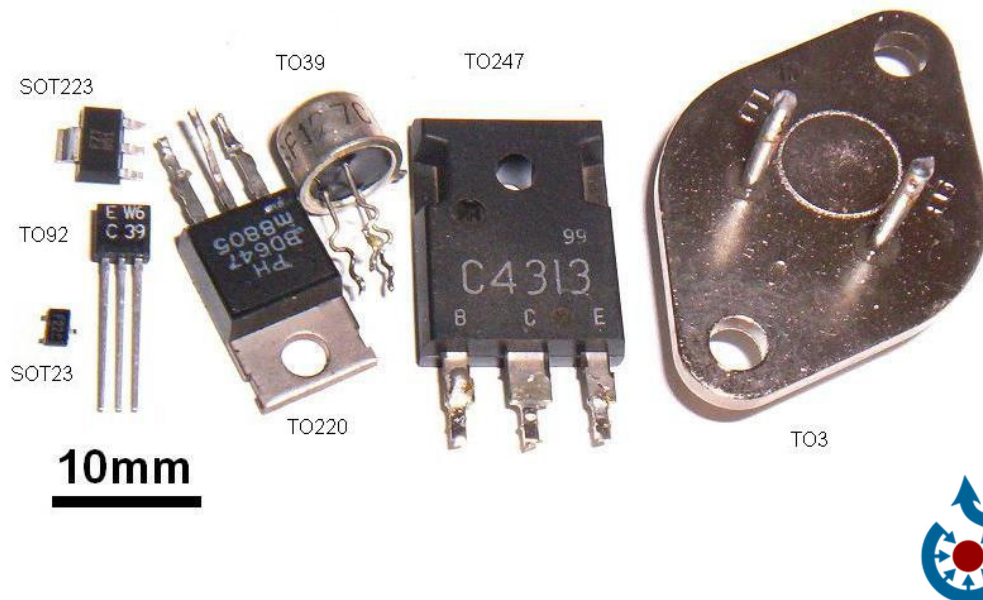
Tranzystor jest "zaworem" elektronicznym, dzięki któremu mały sygnał może sterować przepływem silnego prądu. Gdy na bramce mamy zerowe napięcie, to prąd nie płynie.

# Tranzystor polowy GaN



Tranzystor jest "zaworem" elektronicznym, dzięki któremu mały sygnał może sterować przepływem silnego prądu. Gdy na bramce mamy dodatnie napięcie, to prąd płynie i zasila diodę świecącą.

# Wygląd tranzystorów

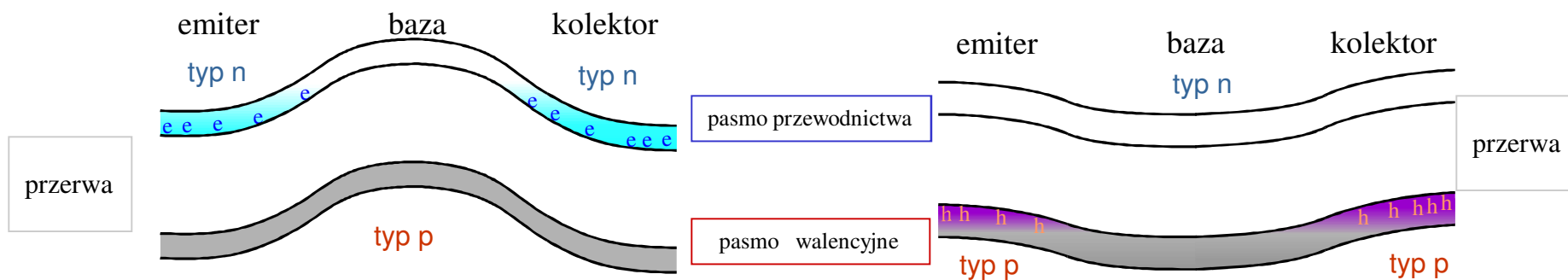
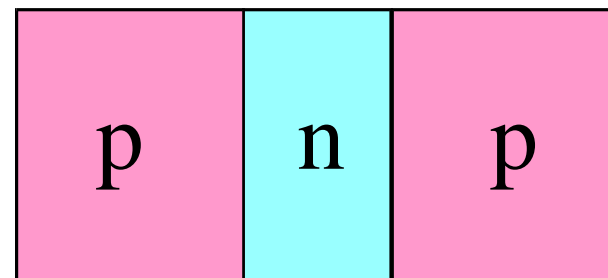
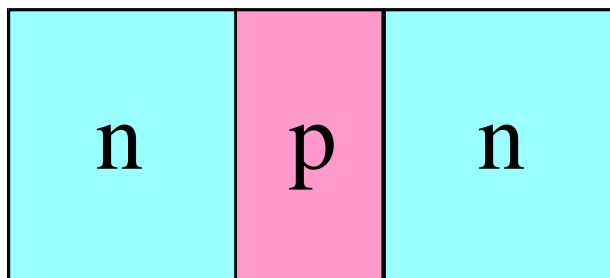
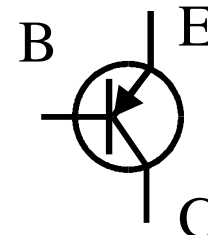
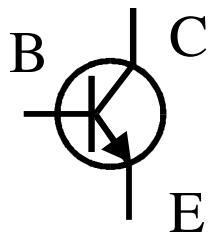


Pierwszy działający tranzystor został skonstruowany przez Johna Bardeena, Waltera Brattaina i Williama Shockleya w 1947 roku (nagroda Nobla 1956).

Procesor obliczeniowy Nvidia Kepler GK110 (2012) zawiera 7 mld tranzystorów w technologii 28 nm. GPU Nvidia H100 80 mld (rozdzielczość 5 nm).

Pendrive ma jeszcze więcej.

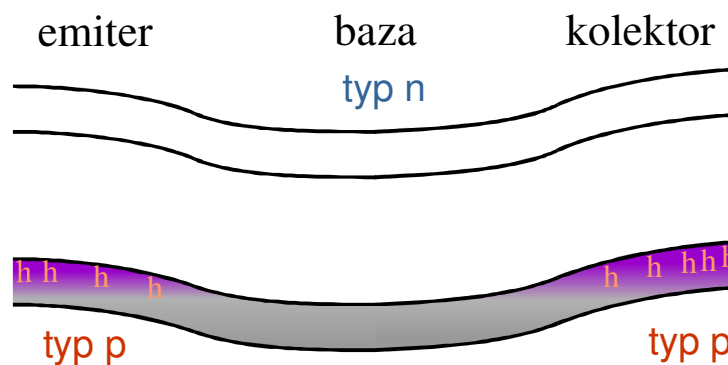
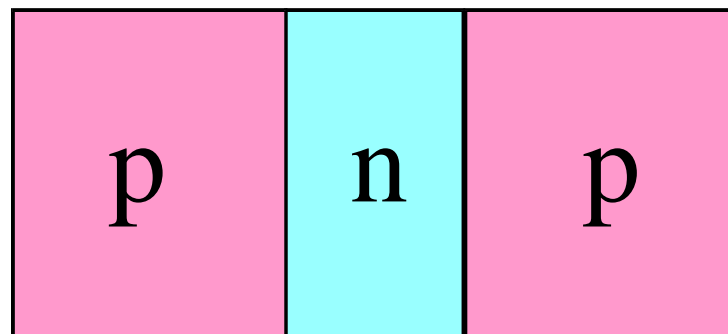
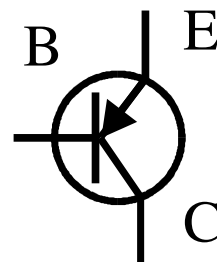
# Tranzystory bipolarne npn i pnp



# Tranzystor bipolarny pnp

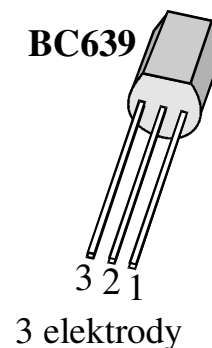
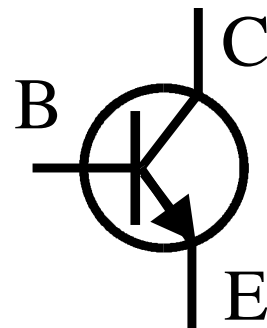
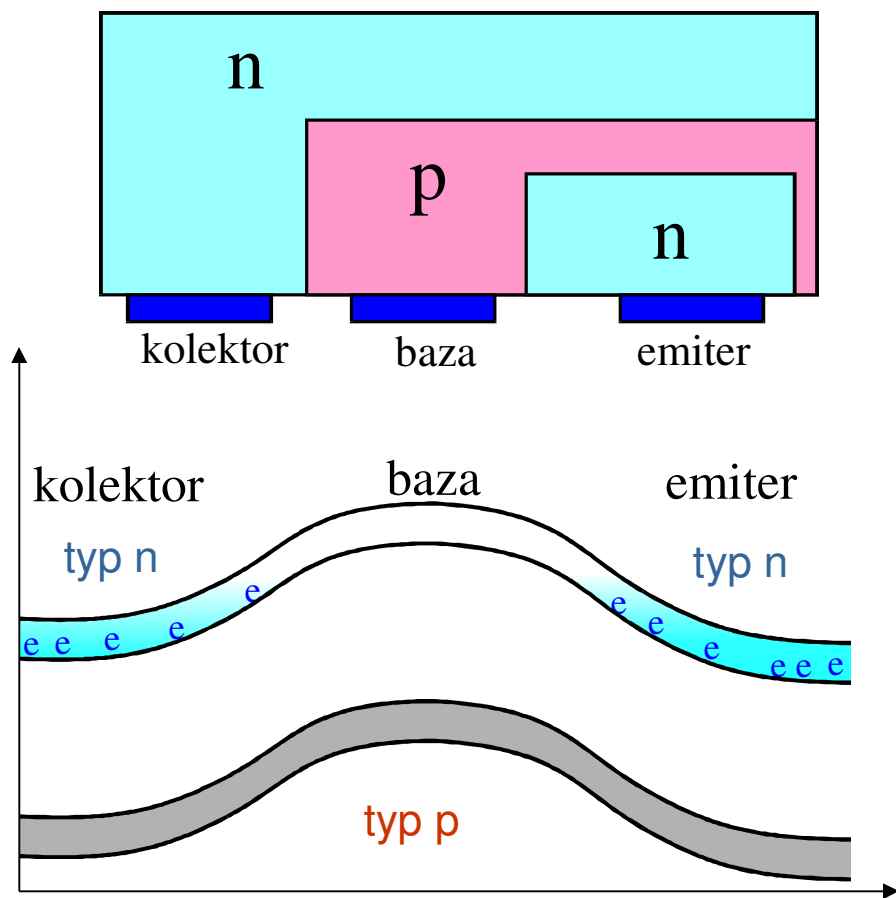
W tranzystorze pnp pomiędzy dwoma warstwami typu p znajduje się warstwa n-typu zwana bazą. Dopóki w bazie jest zerowe napięcie (względem emitera) to nie ma tam dziur i prąd nie może płynąć. Tranzystor jest zamknięty.

Gdy do bazy przyłożymy ujemne napięcie, dziury z emitera wpłyną do niej, a następnie popłyną dalej do kolektora. Tym samym tranzystor zostanie otwarty.



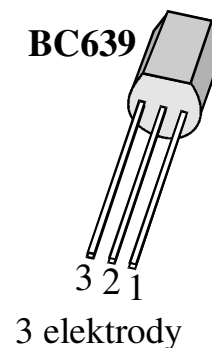
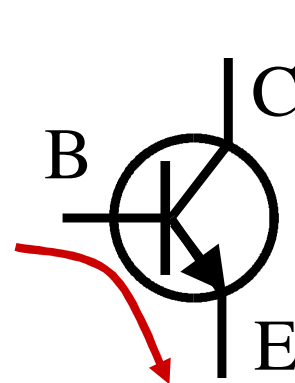
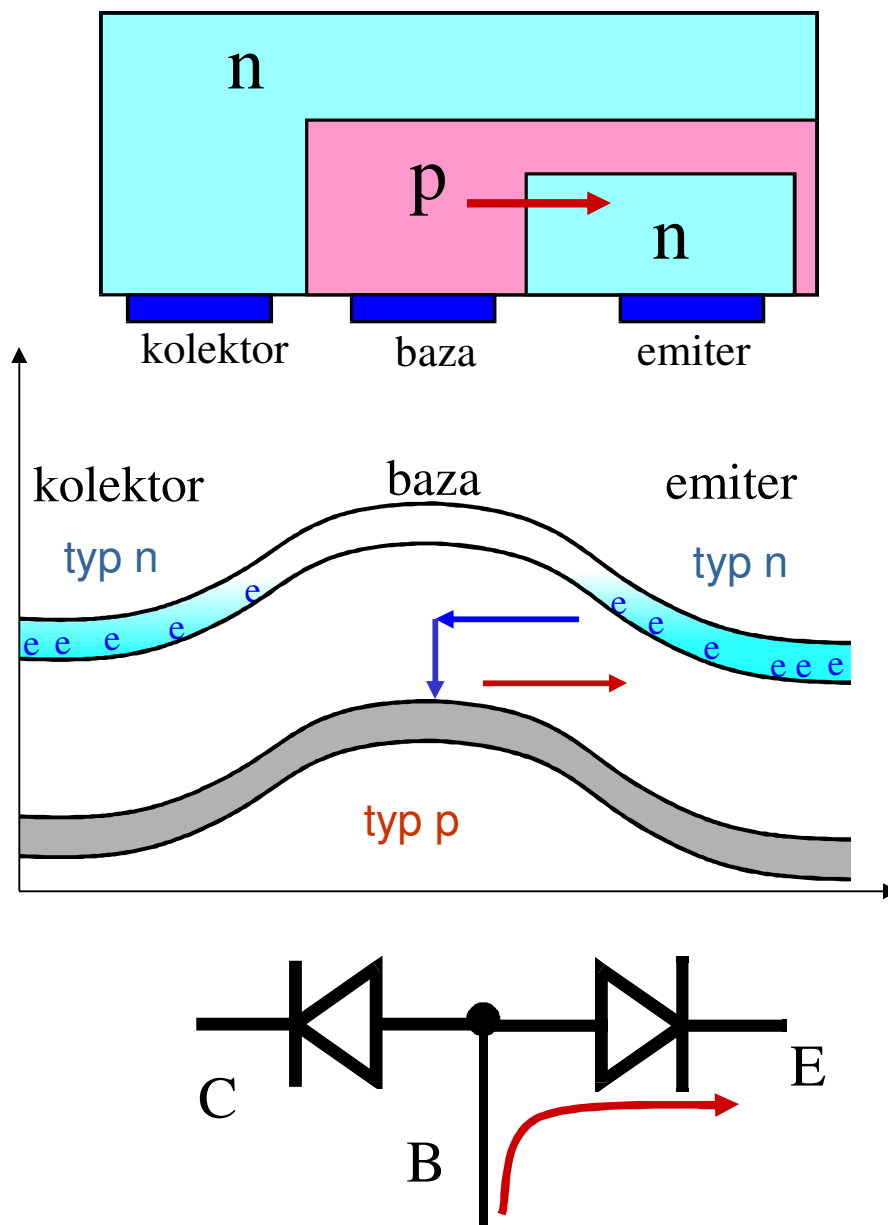
tranzystor bipolarny

# Tranzystor bipolarny npn



W tranzystorze npn pomiędzy dwoma warstwami typu n znajduje się warstwa p-typu czyli baza. Dopóki w bazie jest zerowe napięcie (względem emitera) to nie ma tam dziur i prąd nie może płynąć. Tranzystor jest zamknięty.

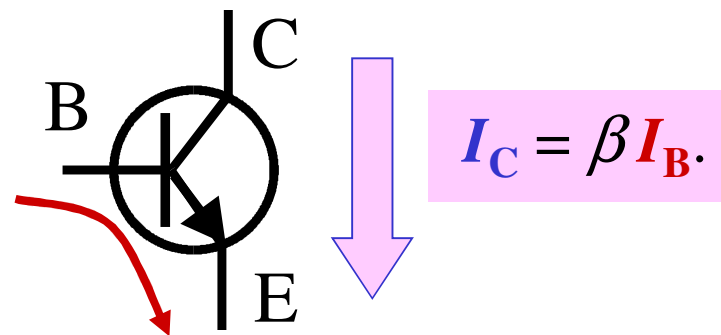
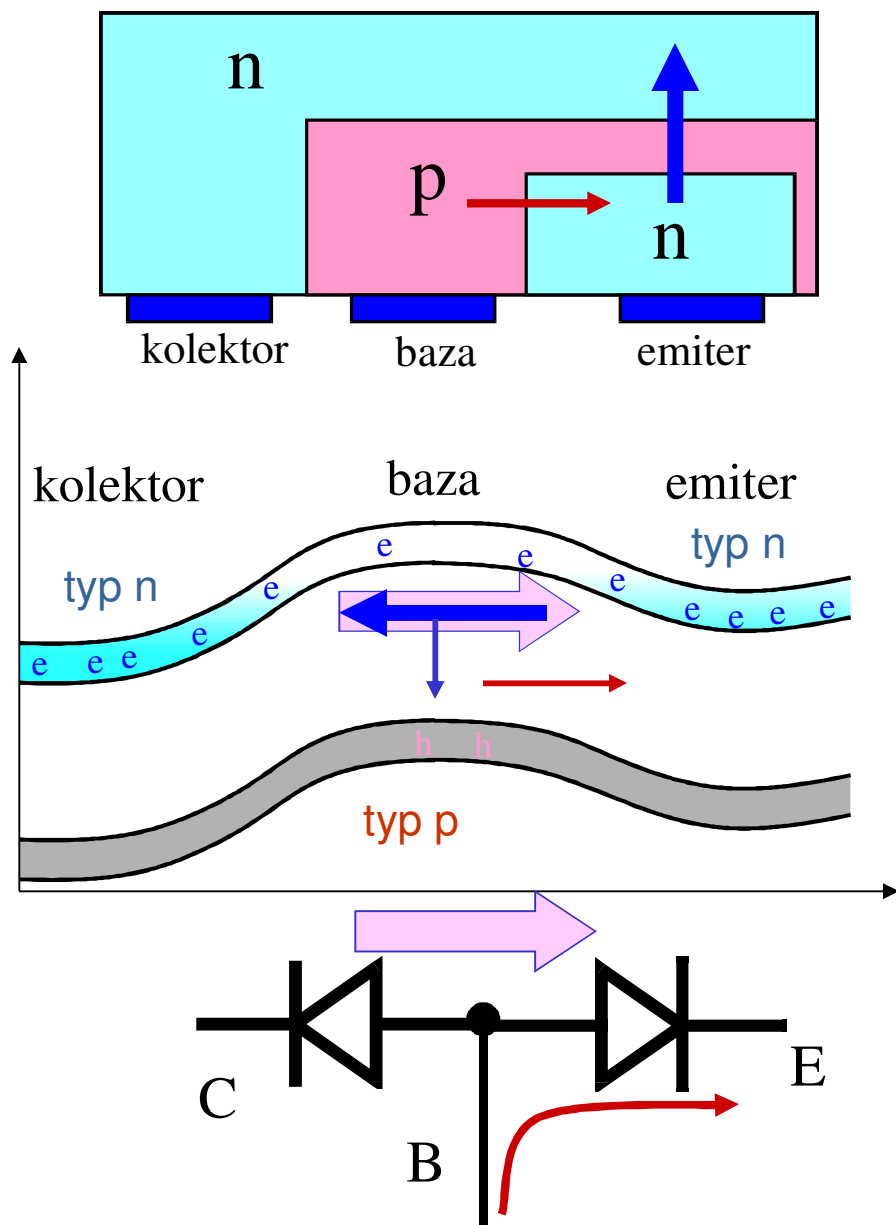
# Tranzystor bipolarny npn



Gdy do bazy przyłożymy dodatnie napięcie, wpłyną do niej dziury z elektrody i **elektrony** z emitera. Złącze baza-emiter będzie pracować jak zwykła dioda. **Natężenie prądu** będzie rosnąć wykładniczo, a więc bardzo szybko w funkcji napięcia. Można zatem zrobić przybliżenie napięcia przewodzenia. Zakładamy, że dla tranzystora krzemowego:

$$U_P = 0,65 \text{ V.}$$

# Tranzystor bipolarny npn



Do bazy wpłynie  $n$  elektronów, a zrekombinuje jedynie  $n/\beta$  elektronów. Oznacza to, że stracimy  $n/\beta$  dziur płynących do bazy z emitera.

Prąd baza-emiter wyniesie:

$$I_B = \frac{en}{\beta \Delta t}$$

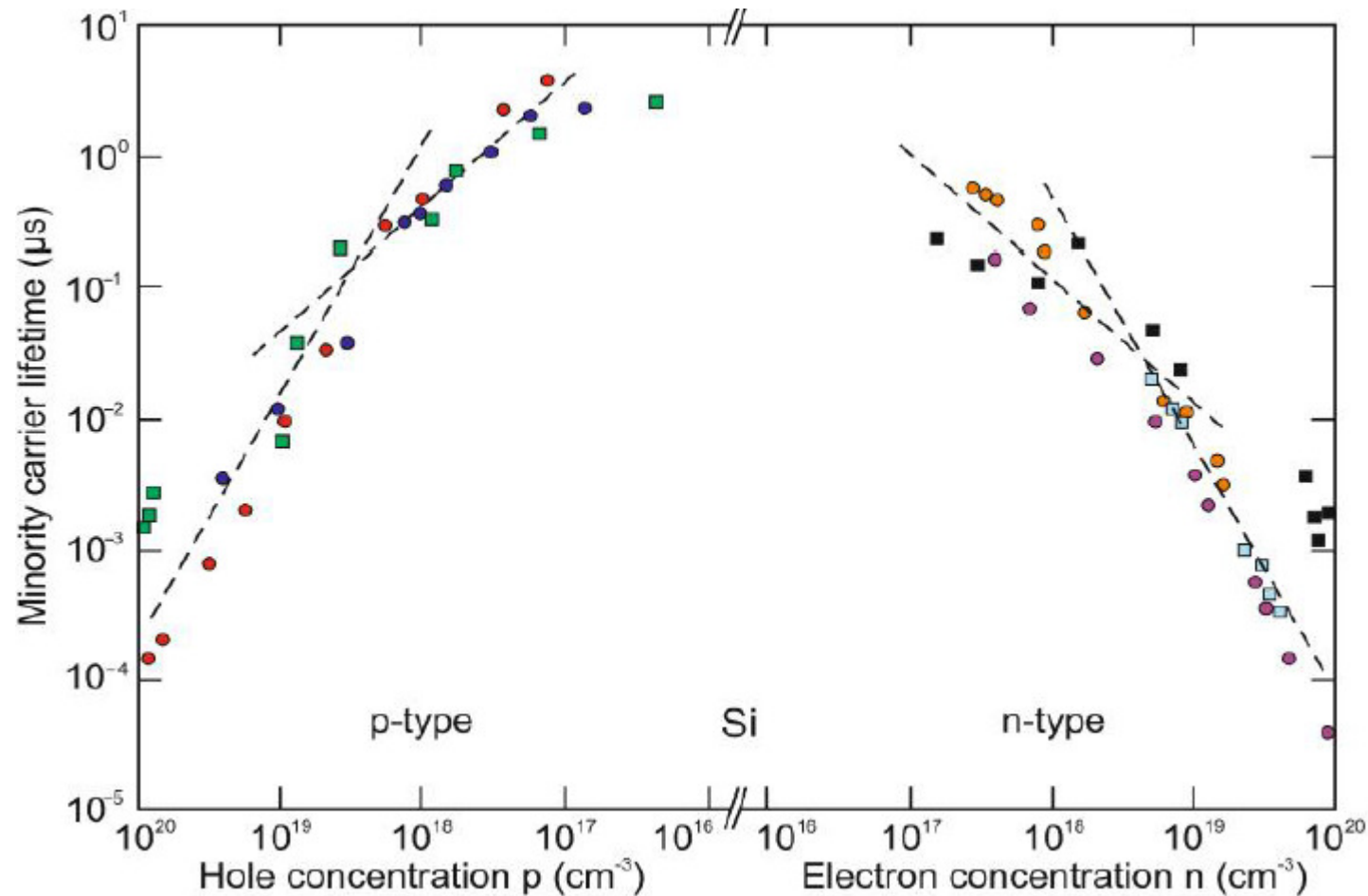
a prąd kolektor-emiter wyniesie:

$$I_C = \frac{en}{\Delta t}$$

otrzymamy zatem:  $I_C = \beta I_B$ .

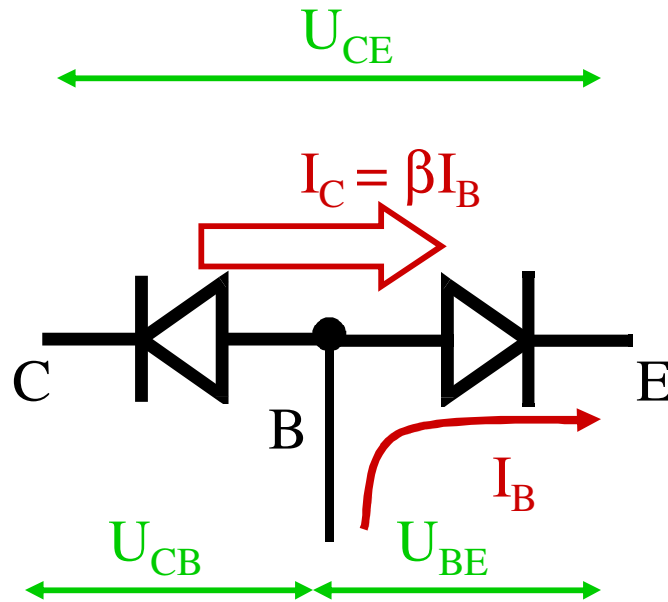
Stosowane jest też oznaczenie  $h_{FE} = \beta$ .

# Czas życia nośników w krzemie



Elektrony i dziury w krzemie mają stosunkowo długi czas życia. Nie rekombinują w bazie i płyną do kolektora.

# Natężenie prądu kolektor-emiter



$$I_E = I_B + I_C$$

$$I_E = (\beta + 1)I_B$$

Uproszczony model Ebersa-Molla

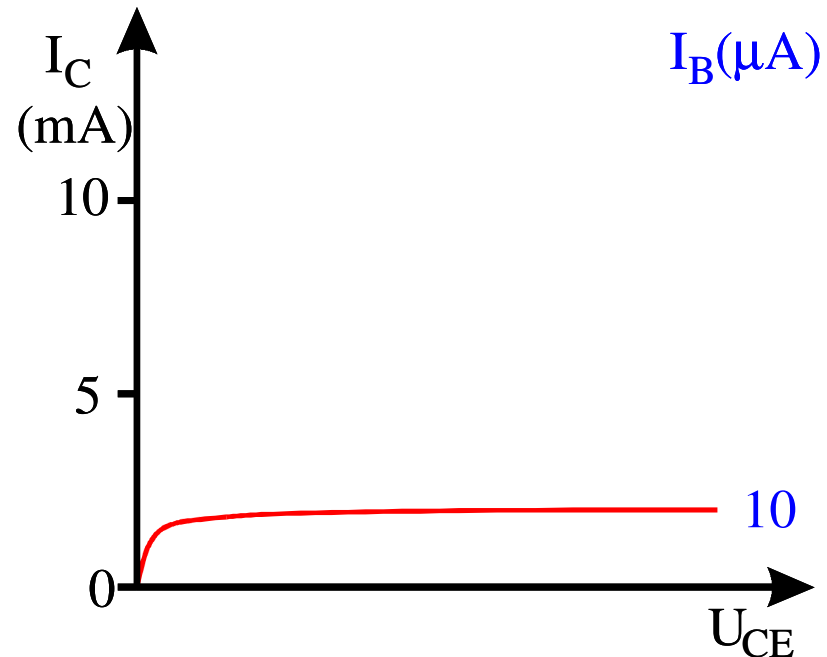
$$I_B = I_{B0}(\exp(U_{BE}/V_T) - 1)$$

$$I_C = -I_{C0}(\exp(-U_{CB}/V_T) - 1)$$

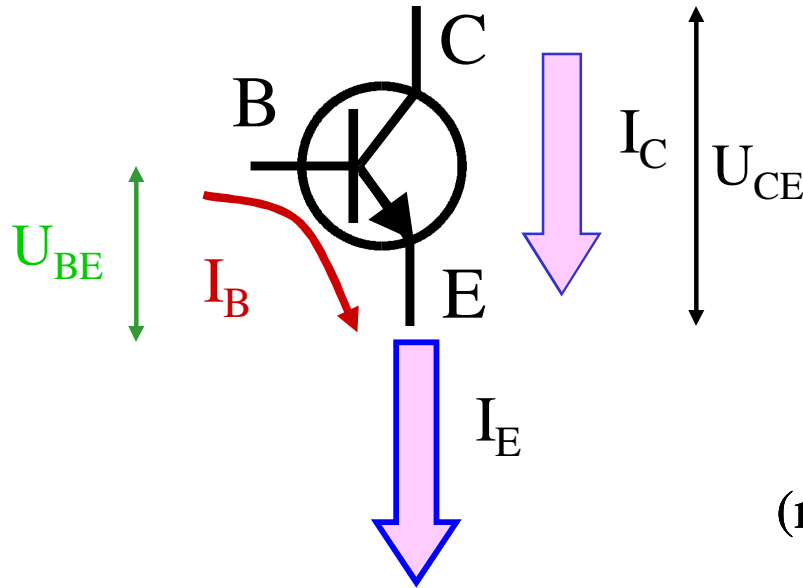
$$U_{CB} = U_{CE} - U_{BE}$$

$$I_E = I_{C0}(1 - \exp((U_{BE} - U_{CE})/V_T)) + I_{B0}(\exp(U_{BE}/V_T) - 1)$$

$$V_T = nk_B T$$



# Natężenie prądu kolektor-emiter

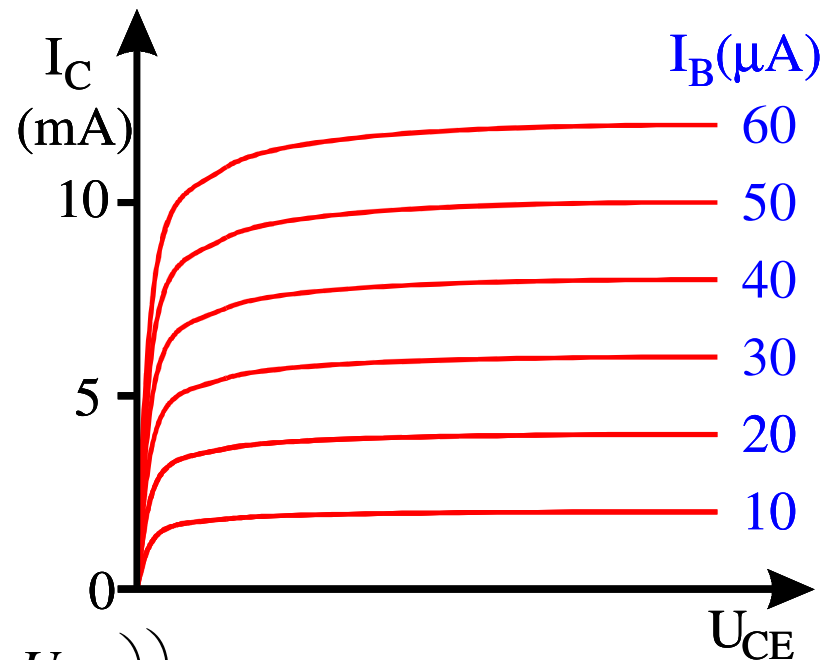


Uproszczony model Ebersa-Molla

$$I_C = \beta I_B$$

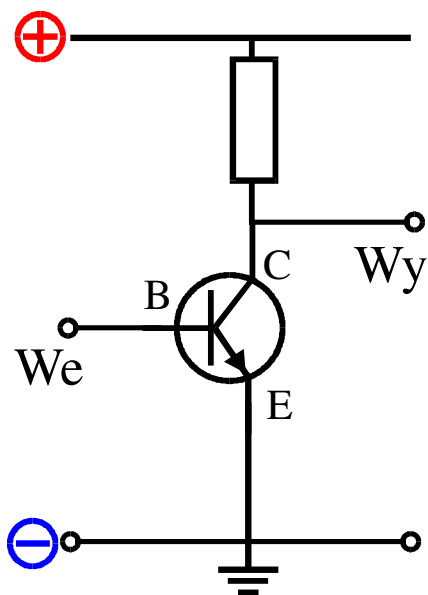
$$I_E = I_B + I_C$$

$$I_E = (\beta + 1)I_B$$



$$I_E \approx \beta I_{B0} \exp\left(\frac{U_{BE}}{V_T}\right) \left(1 - \exp\left(\frac{-U_{CE}}{V_T}\right)\right)$$

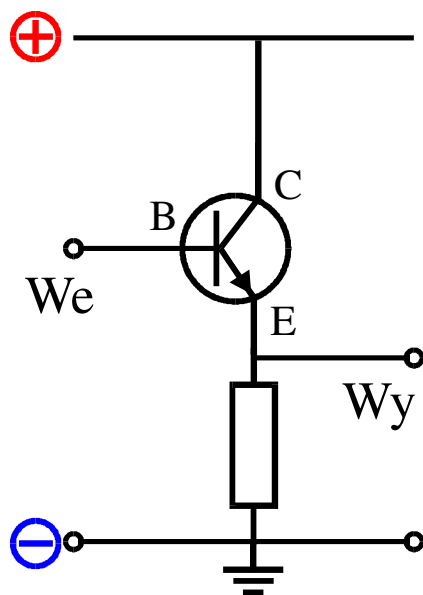
# Konfiguracje wzmacniaczy tranzystorowych



Układ ze wspólnym emiterem.

Odwraca fazę sygnału.

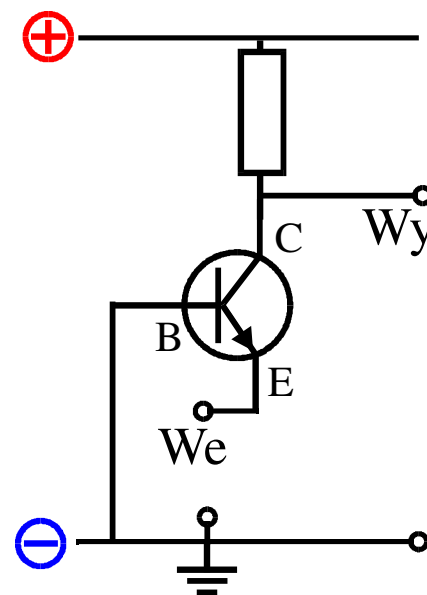
Duże wzmocnienie prądowe, napięciowe i mocy.



Układ ze wspólnym kolektorem.

Nie odwraca fazy sygnału.

Wzmocnienie napięciowe koło jedności (wtórnik napięciowy).  
Wzmocnienie prądu i mocy, zmniejszenie oporu wyjściowego w stosunku do wejściowego.

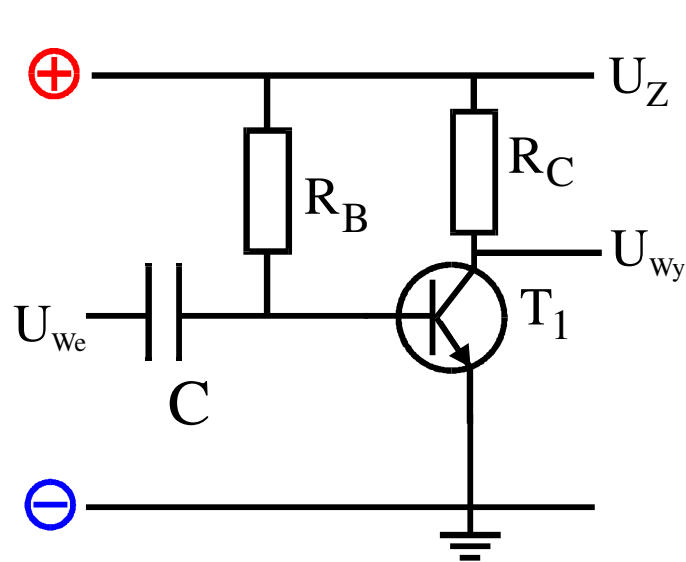


Układ ze wspólną bazą.

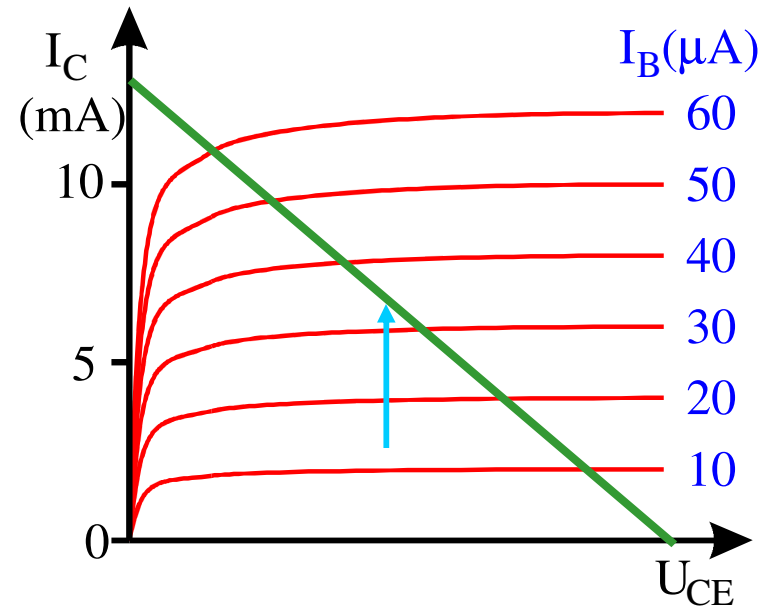
Nie odwraca fazy sygnału.

Mała rezystancja wejściowa, większa wyjściowa.  
Względnie duże wzmocnienie napięciowe, brak wzmocnienia prądowego.

# Punkt pracy dla układu ze wspólnym emiterem.



$$I_C = \beta I_B$$



Napięcie wyjściowe  $U_{wy} = U_Z - I_C R_C (= U_{CE})$ , może się zmieniać od 0 do  $U_Z$ .  
Dla napięcia stałego, czyli przy braku sygnału zmiennego optymalna wartość  $U_{wy}$  wynosi  $U_{wy} = U_{CE} = U_Z/2$ .

Czyli:  $I_C = U_Z/2R_C$ ,  $I_B = U_Z/2\beta R_C$ .

Aby ustalić prąd  $I_B$  musimy dobrać opornik  $R_B$ . Panuje na nim napięcie  $U_Z - U_B$  ( $U_B$  - napięcie na bazie). Przyjmujemy, że  $U_B = 0,65$  V. Otrzymujemy zatem:

$$I_B R_B = U_Z - 0,65 \text{ V.}$$

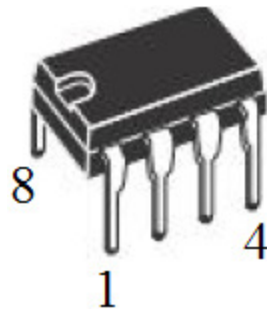
Opór  $R_B$  dla optymalnego punktu pracy wynosi:

$$R_B = 2\beta R_C \frac{U_Z - 0,65 \text{ V}}{U_Z}$$

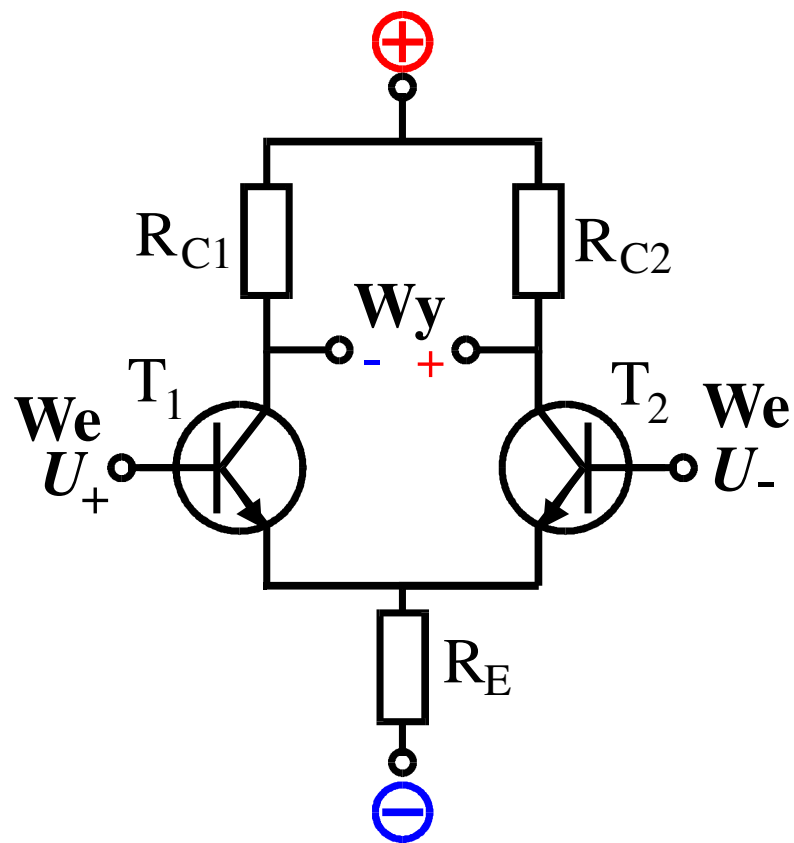
# Podsumowanie tranzystorów

- Tranzystor (bipolarny) to dwa złącza pn w jednej płytce kryształu utworzone w przeciwnych kierunkach, przy czym obszar środkowy (p w tranzystorze npn oraz n w pnp) jest bardzo cienki.
- Takie dwa złącza mogą wzmacniać sygnały elektryczne (małe zmiany mocy sygnału zmiennego na wejściu mogą wywołać duże zmiany mocy sygnału wyjściowego).
- **Tranzystor ma trzy elektrody: emiter, bazę i kolektor, oznaczane odpowiednio: E, B i C.**
- Złącze pn emiter-baza jest polaryzowane w kierunku przewodzenia, napięcie złącza pn E-B wytwarza prąd emitera  $I_E$ . Obszar bazy jest na tyle cienki, że większość wstrzykniętych do bazy nośników przelatuje przez bazę i dociera do kolektora. Nośniki te tworzą prąd kolektora. Czyli prąd kolektora zależy głównie od napięcia E-B, jest prawie niezależny od napięcia B-C. Prąd kolektora jest  $\beta$  razy (około 100) większy od prądu bazy. **Dzięki temu mały prąd bazy wywołuje przepływ dużego prądu kolektora, czyli wzmocnienie prądowe. Parametr  $\beta$  nazywa się współczynnikiem wzmocnienia prądowego tranzystora.**
- Zależność prądu kolektora od napięcia CE nazywa się charakterystyką  $I_C(U_{CE})$  tranzystora.
- Podstawowym układem wzmacniacza tranzystorowego jest układ ze wspólnym emiterym, to znaczy sygnał wejściowy jest podawany między E i B, zaś sygnał wyjściowy jest odbierany między E i C,
- Warunki pracy tranzystora, czyli wartości napięć stałych polaryzujących złącza EB i BC bez obecności zmiennego sygnału wejściowego tranzystora, określają, jak tranzystor będzie reagował na wejściowy sygnał zmienny. **Układ tych napięć nosi nazwę punktu pracy tranzystora.**

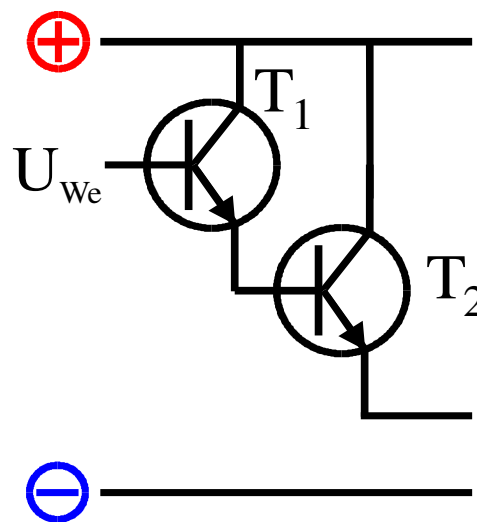
# Wzmacniacze operacyjne



# Wzmacniacz różnicowy i układ Darlingtona



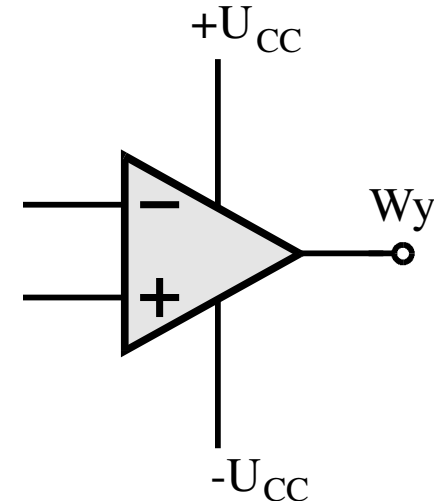
Dwa tranzystory w układzie wspólnego emitera dają na wspólnym wyjściu wzmocnioną różnicę sygnałów wejściowych. Układ ma własne 'zero', niezależne od zasilania.



W układzie Darlingtona połączone kaskadowo tranzystory (emiter 1 do bazy 2) dają bardzo silne wzmocnienie prądowe,  $\beta^2$ .

# Idealny wzmacniacz operacyjny

- 1) Wzmacniacz operacyjny posiada dwa wejścia. Jedno z wejść nazywa się odwracającym (oznaczane  $U_-$ ) a drugie – nieodwracającym (oznaczane  $U_+$ ).
- 2) Układ zasilany jest dwoma napięciami: dodatnim względem masy  $+U_{CC}$  oraz ujemnym  $U_{EE}$  (zazwyczaj  $U_{EE} = -U_{CC}$ ).
- 3) Napięcie wyjściowe  $U_{wy}$  może zmieniać się w granicach od  $-U_{CC}$  do  $+U_{CC}$ .



- 4) Wzmacniacz operacyjny daje napięcie:

$$U_{wy} = A_U \cdot (U_+ - U_-),$$

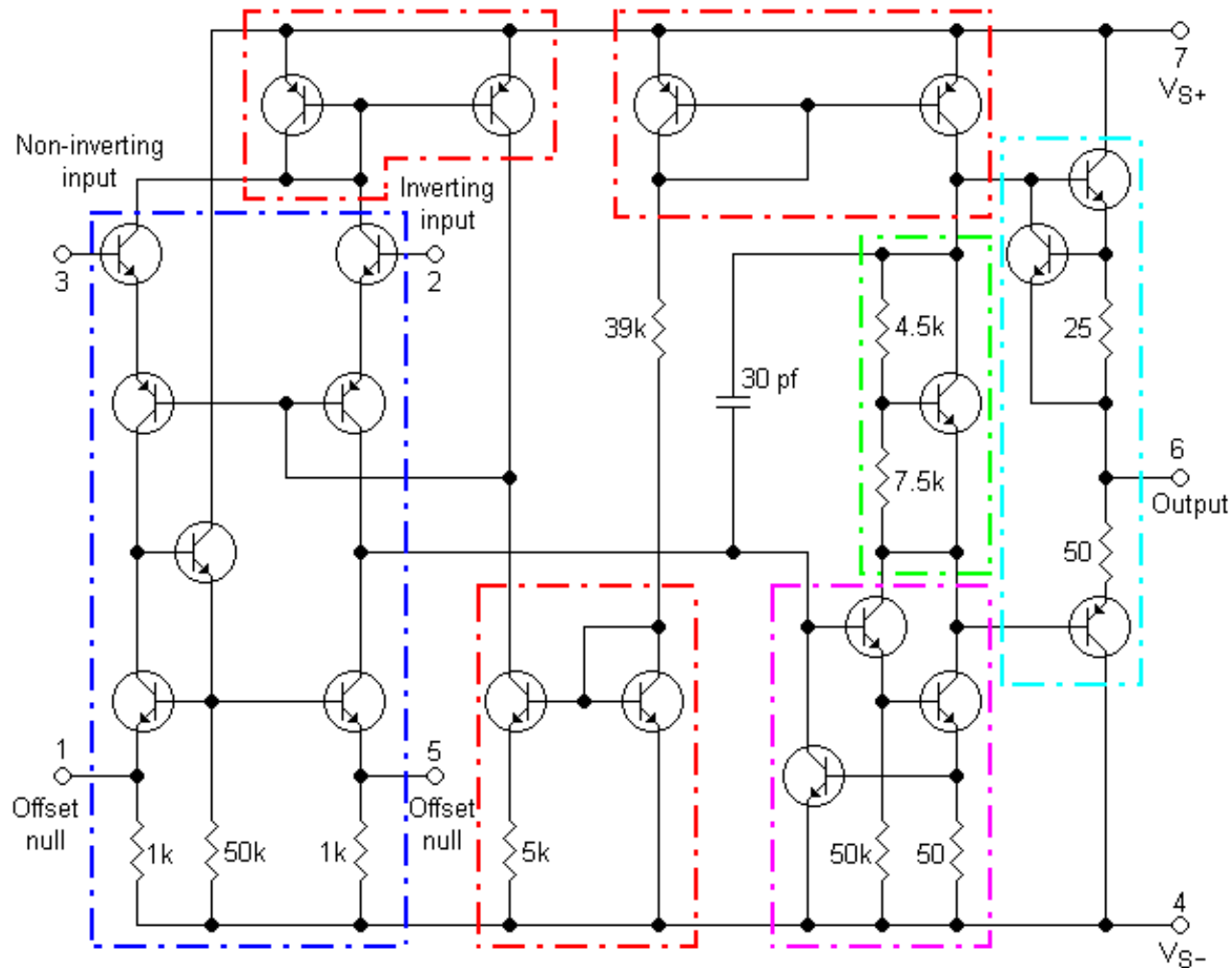
gdzie współczynnik  $A_U$  nosi nazwę wzmocnienia napięciowego, a  $U_+$  i  $U_-$  to wartości napięć podawanych na wejścia nieodwracające i odwracające.

- 5) Wzmocnienie napięciowe wzmacniacza operacyjnego jest w założeniach nieskończone. W praktyce osiąga wartości  $A_U = 10^5 - 10^7$ , co oznacza, że wystarczy napięcie wejściowe 1 - 100  $\mu V$ , aby osiągnąć napięcie wyjściowe 10 V.
- 6) Wzmacniacz posiada bardzo dużą oporność wejściową, rzędu  $10^6 - 10^{13} \Omega$ , to znaczy prąd wpływający przez wejścia  $U_+$  oraz  $U_-$  jest bardzo mały, nawet poniżej pikoampera.
- 7) Wzmacniacz posiada bardzo mały opór wyjściowy, to znaczy napięcie wyjściowe  $U_{wy}$  prawie nie zależy od prądu wypływającego z wyjścia.

# Wzmacniacz operacyjny $\mu A741$

źródła prądowe  
ustawiające punkty pracy

wejście,  
wzmacniacz  
różnicowy



wyjściowy  
wzmacniacz  
mocy  
(wzmacniacz  
prądu)

wzmacniacz  
napięcia



# Wzmacniacz operacyjny $\mu A741$

Zasilanie  $\pm 18$  V (niektóre wersje 22 V).

Wzmocnienie napięciowe  
sygnału różnicowego:

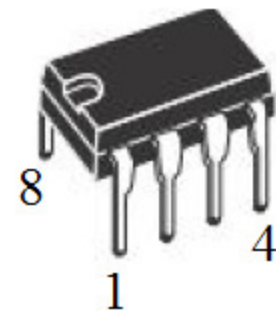
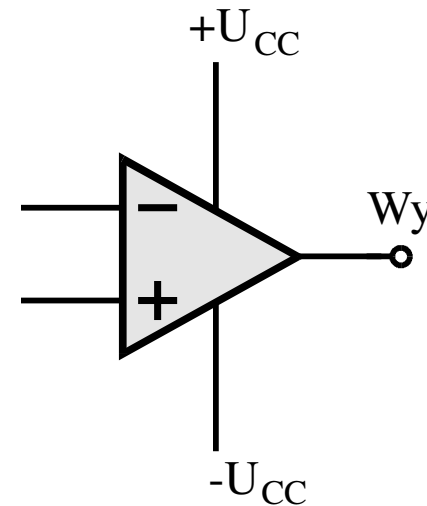
$$A = 2 \cdot 10^5;$$

Impedancja wejściowa  $2 \text{ M}\Omega$ ,  
impedancja wyjściowa  $75 \Omega$  ( $I_{SC} = 25 \text{ mA}$ ).

Prąd na wejściu  $0,02 \mu\text{A}$ .

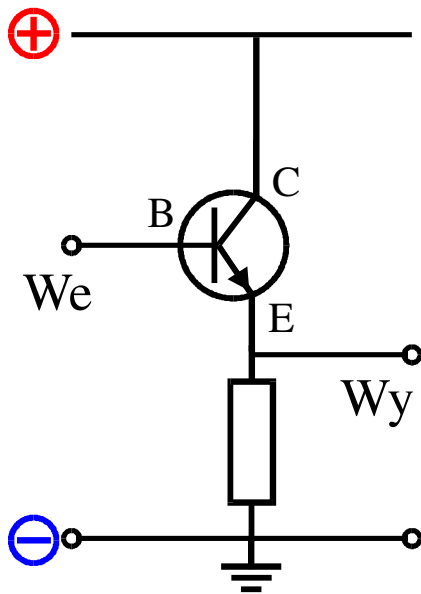
Napięcie niezrównoważenia na wejściu  $1 \text{ mV}$ .

Pasmo przenoszenia  $1 \text{ MHz}$ .

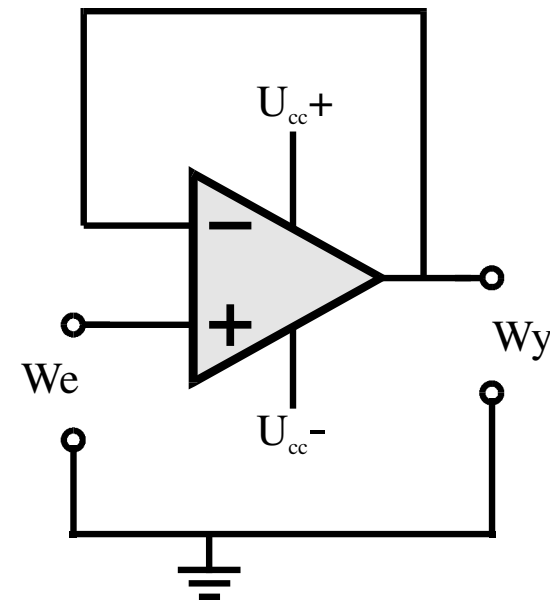


# Sprężenie zwrotne

Sprężenie zwrotne to przekazanie części sygnału wyjściowego do wejścia układu. Jest to konstrukcja bardzo często wykorzystywana do stabilizowania własności układu (w elektronice, mechanice ..).

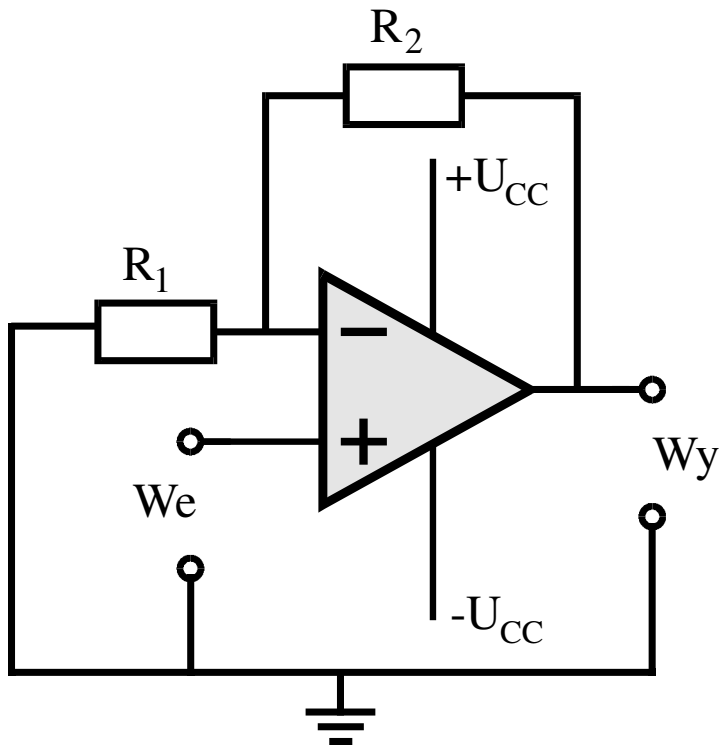


Układ ze wspólnym kolektorem ma ujemny sprzężenie zwrotne dzięki opornikowi na wyjściu emitery.



Podając sygnał wyjściowy na wejście odwracające otrzymujemy ujemne sprzężenie zwrotne.

# Układ z wejściem nieodwracającym



$$K = \frac{U_{wy}}{U_{we}}$$

Napięcia  $U_+$  i  $U_-$  powinny być równe z dokładnością do mikrowoltów. Jeżeli na wejściu  $U_+$  pojawi się jakiegolwiek inne napięcie, to wyjście natychmiast zareaguje podając takie napięcie, aby przywrócić równowagę  $U_- = U_+$ .

Wtedy napięcie na wejściu odwracającym będzie równe  $U_{we}$ . Zatem równanie na prąd będzie miało postać:

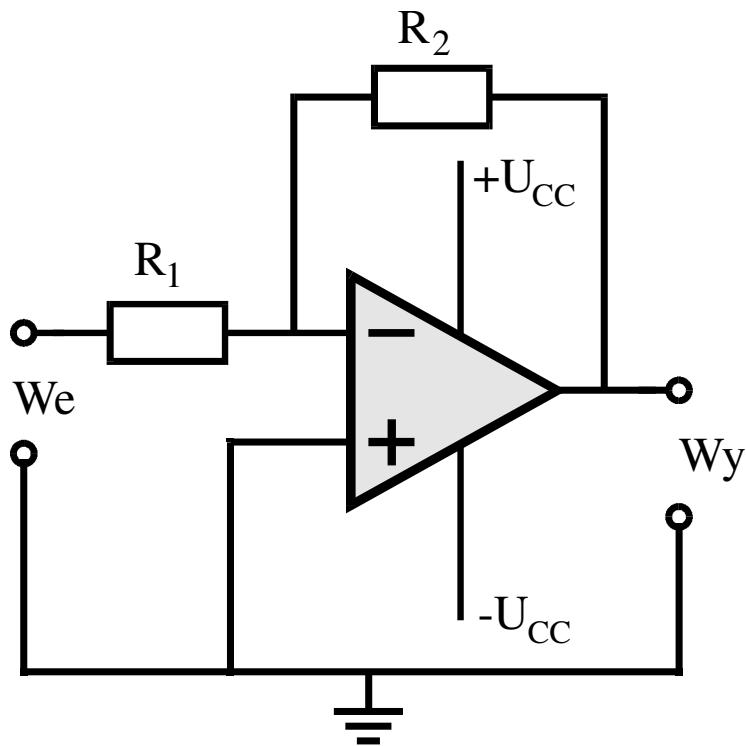
$$I = U_{we}/R_1 = (U_{wy} - U_{we})/R_2.$$

Tak więc wzmacnienie napięciowe wynosi:

$$K = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Napięcie wyjściowe układu ma taki sam znak jak napięcie wejściowe zatem ten układ nie odwraca fazy.

# Układ z wejściem odwracającym



$$K = \frac{U_{wy}}{U_{we}}$$

Jeżeli na wejściu  $U_-$  pojawi się jakiegokolwiek napięcie, to wyjście natychmiast zareaguje podając napięcie przeciwnego znaku, takie aby napięcie  $U_-$  spadło do zera. W efekcie napięcia  $U_+$  i  $U_-$  będą równe z dokładnością do mikrowoltów, czyli praktycznie zerowe, bo napięcie wejścia  $U_+$  jest równe 0 V.

Zatem spadek napięcia na oporniku  $R_1$  równy jest  $U_{we}$ , a na oporniku  $R_2$  odpowiada  $U_{wy}$ . Ponieważ do wejścia wzmacniacza nie wpływa żaden znaczący prąd, więc przez oba oporniki płynie ten sam prąd:

$$I = U_{we}/R_1 = U_{wy}/R_2.$$

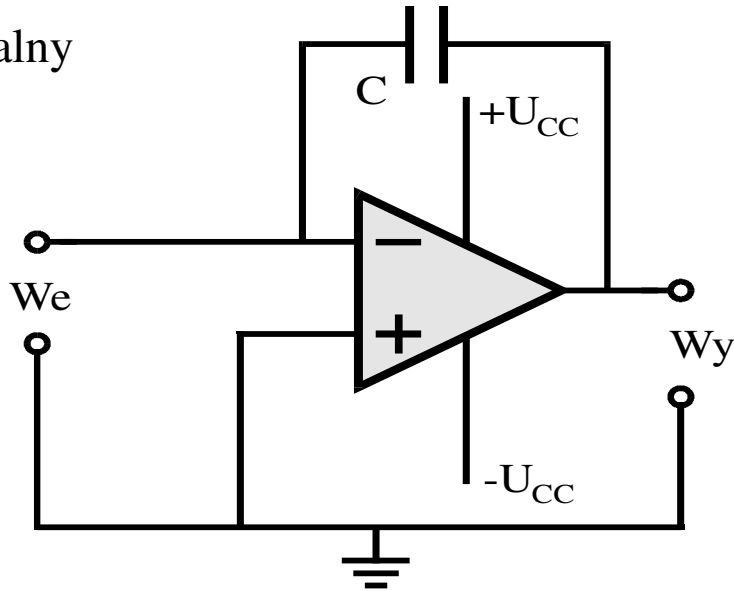
A zatem wzmocnienie napięciowe wynosi:

$$K = -\frac{R_2}{R_1}$$

Napięcie wyjściowe układu ma przeciwny znak niż napięcie wejściowe (zero przy wejściu odwracającym) zatem ten układ odwraca fazę.

# Układ całkujący

idealny



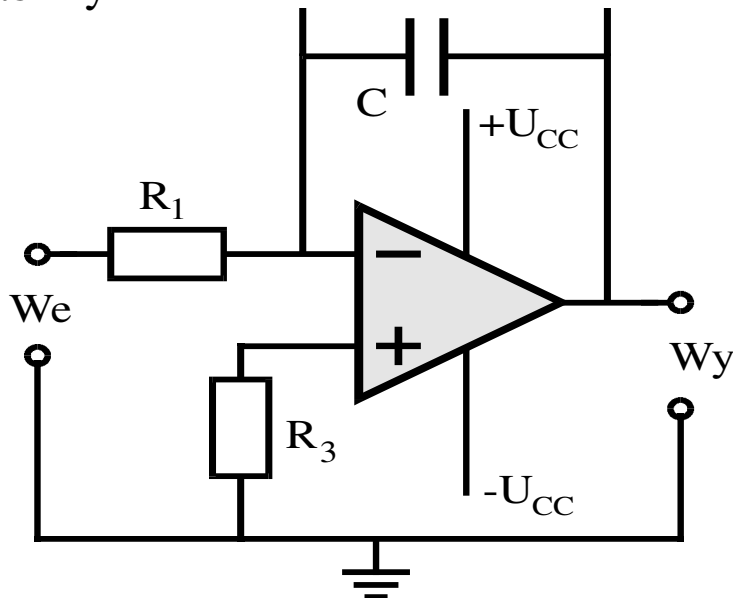
Układ całkujący gromadzi na kondensatorze C ładunek prądu płynącego przez opornik  $R_1$ :

$$U_{wy}(t) \approx \frac{1}{CR_1} \int_0^t U_{we}(x) dx$$

Do stabilnej pracy potrzebny jest opornik  $R_2$ . Wtedy:

$$U_{wy}(t) = \frac{1}{C} \int_0^t \left( \frac{U_{we}(x)}{R_1} - \frac{U_{wy}(x)}{R_2} \right) dx$$

stabilny



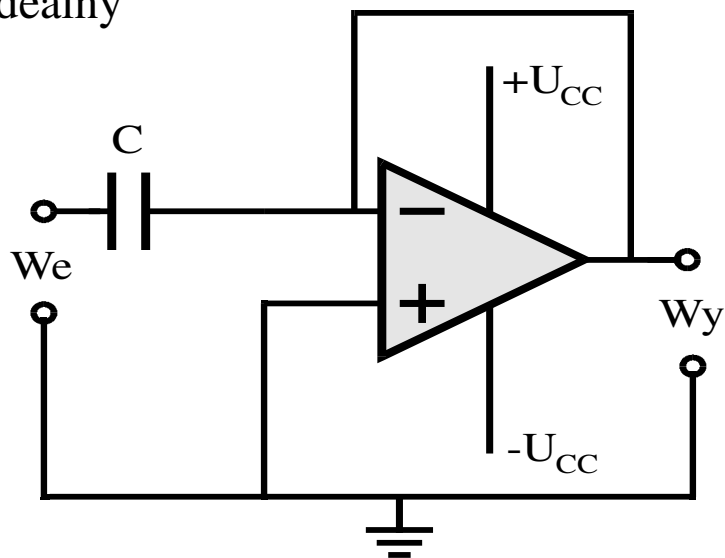
Równanie to powraca do idealnego dla  $R_1 \ll R_2$  lub  $t \ll R_2 C$ :

Aktywny filtr dolnoprzepustowy, dający stosunek napięć:

$$\frac{U_{wy}}{U_{we}} = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{1 + i\omega CR_2}$$

# Układ różniczkujący

idealny



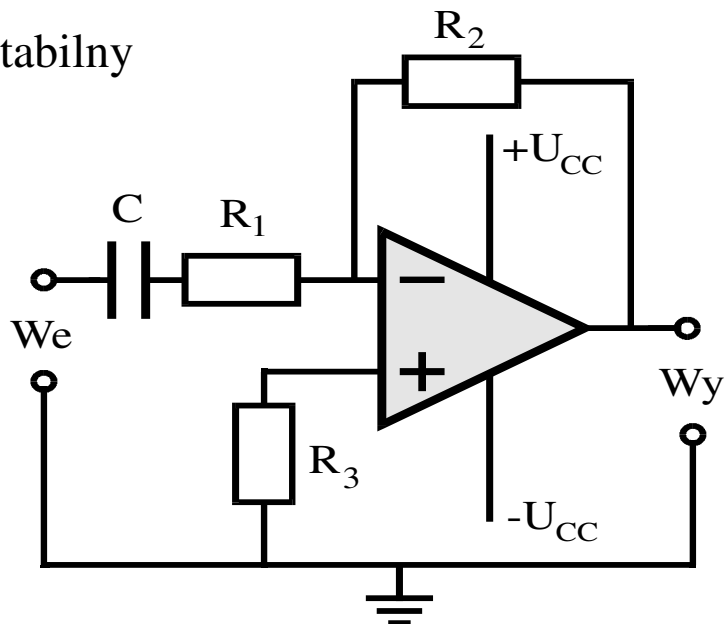
Układ różniczkujący dający na oporniku  $R_2$  napięcie proporcjonalne do prądu będącego pochodną ładunku na kondensatorze C:

$$U_{wy}(t) \approx CR_2 \frac{dU_{we}(t)}{dt}$$

Do stabilnej pracy potrzebny jest opornik  $R_2$ . Wtedy:

$$U_{wy}(t) = CR_2 \frac{d(U_{we}(t) - I_C(t)R_1)}{dt}$$

stabilny



Równanie to powraca do idealnego dla  $R_1 \ll R_2$  lub  $t \gg R_1 C$ .

Aktywny filtr górnoprzepustowy, dający stosunek napięć:

$$\frac{U_{wy}}{U_{we}} = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{i\omega CR_1}{1 + i\omega CR_1}$$

# Układ logarytmujący

Napięcie  $U_-$  powinno być równe zero, więc na oporniku  $R$  mamy napięcie  $U_{We}$ . Będzie zatem płynął prąd:

$$I = \frac{U_{We}}{R}$$

Takie samo musi być natężenie prądu płynącego przez diodę  $D$ , dane równaniem Shockleya:

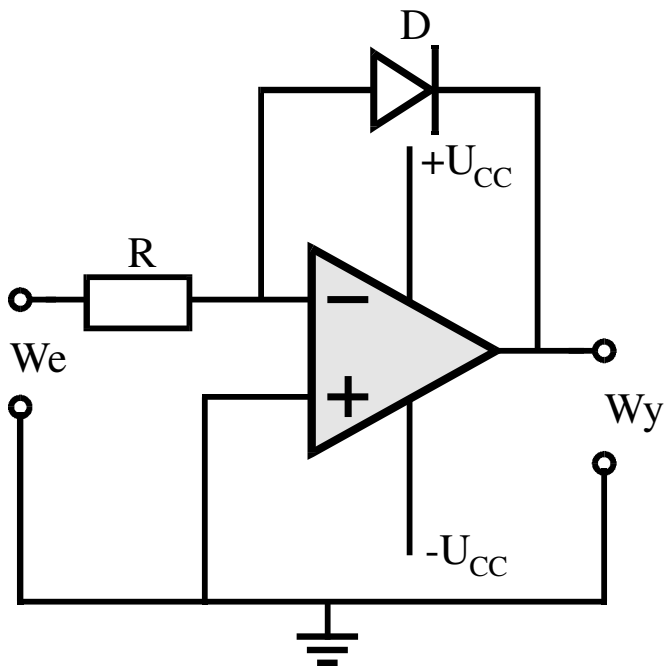
$$I = I_0 \left( \exp \left( \frac{U_{Wy}}{k_B T} \right) - 1 \right)$$

Przekształcając równanie Shockleya otrzymamy napięcie wyjściowe:

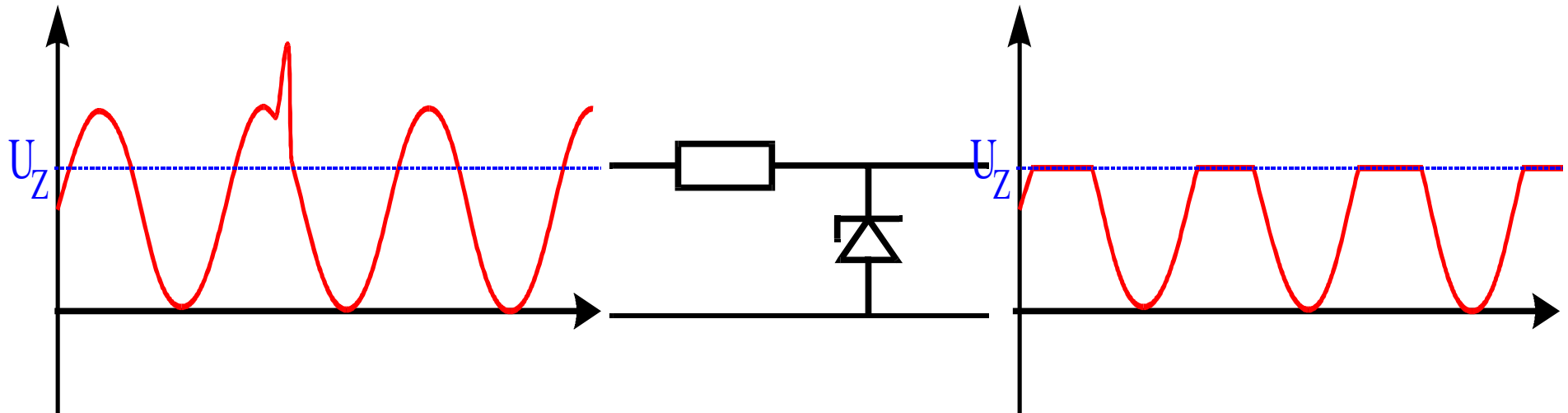
$$U_{Wy} = k_B T \ln \left( \frac{I}{I_0} + 1 \right) \approx k_B T \ln \left( \frac{I}{I_0} \right)$$

Zatem jest to układ podający logarytm napięcia wejściowego:

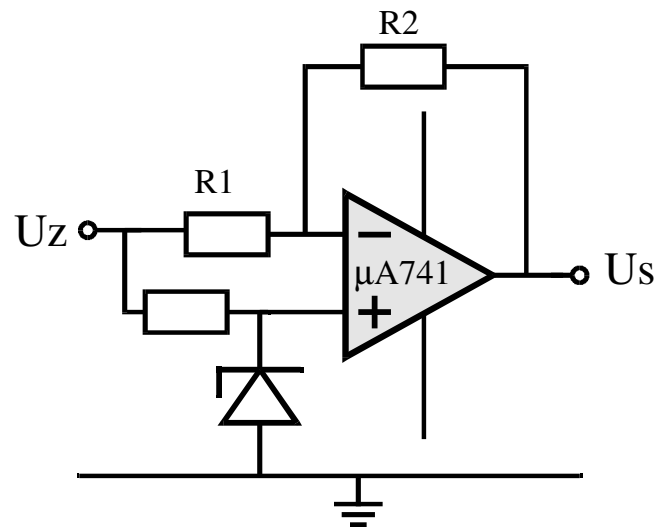
$$U_{Wy} \approx k_B T \ln \left( \frac{U_{We}}{I_0 R} \right)$$



# Stabilizacja napięcia na diodzie Zenera



Diody Zenera wykorzystuje się jako zabezpieczenie przed przepięciami i do stabilizacji napięcia.



Stabilizator napięcia z diodą Zenera i wzmacniaczem operacyjnym.

# Podsumowanie wzmacniacza operacyjnego

- 1) Wzmacniacz operacyjny to układ scalony, silnie wzmacniający, o bardzo uniwersalnych zastosowaniach.
- 2) Posiada dwa wejścia: nieodwracające i odwracające, oznaczane  $U_+$  i  $U_-$ .
- 3) Wzmacniacz operacyjny daje napięcie:

$$U_{wy} = A_U \cdot (U_+ - U_-),$$

gdzie współczynnik  $A_U$  nosi nazwę wzmocnienia napięciowego.

- 4) Wzmocnienie napięciowe wzmacniacza operacyjnego jest w założeniach nieskończone. W praktyce osiąga wartości  $10^5 - 10^7$ .
- 5) Warunki pracy wzmacniacza operacyjnego ustala się poprzez stosowanie „sprzężenia zwrotnego”, czyli gałęzi obwodu łączącej wyjście z wejściem (przeważnie odwracającym), która podaje część sygnału wyjściowego na wejście wzmacniacza. Rodzaj obwodu użytego jako sprzężenie zwrotne wyznacza, jakie funkcje realizuje układ ze wzmacniaczem operacyjnym,
- 6) W oparciu o wzmacniacze operacyjne buduje się wzmacniacze odwracające fazę lub nieodwracające, filtry RLC (filtry aktywne), które są równocześnie układami różniczkującymi lub całkującymi, ponadto można budować: układy sumujące, źródła napięciowe (np. z diodą Zenera) i prądowe, wzmacniacze pomiarowe, generatory sygnałów i wiele innych.