

Złącze p-n: dioda

Półprzewodniki

Przewodnictwo półprzewodników

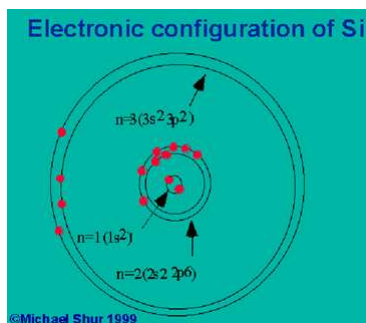
Dioda

Dioda: element nieliniowy

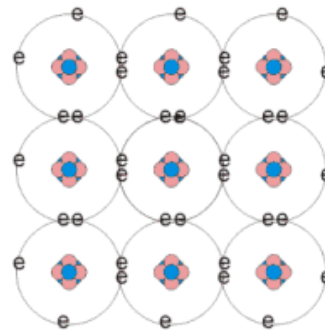
Przewodnictwo kryształów

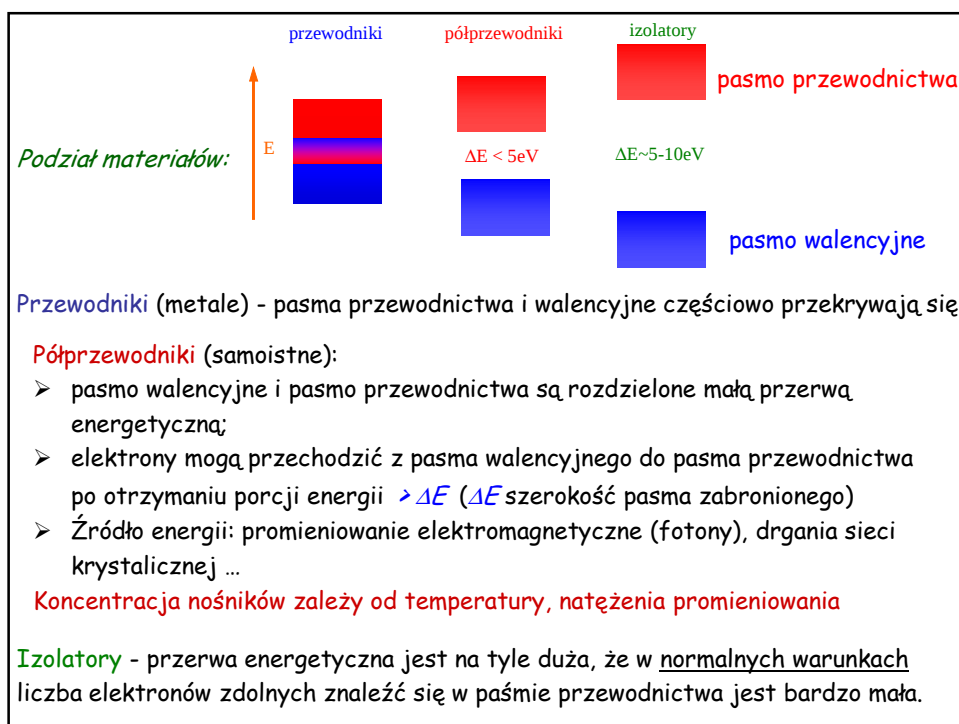
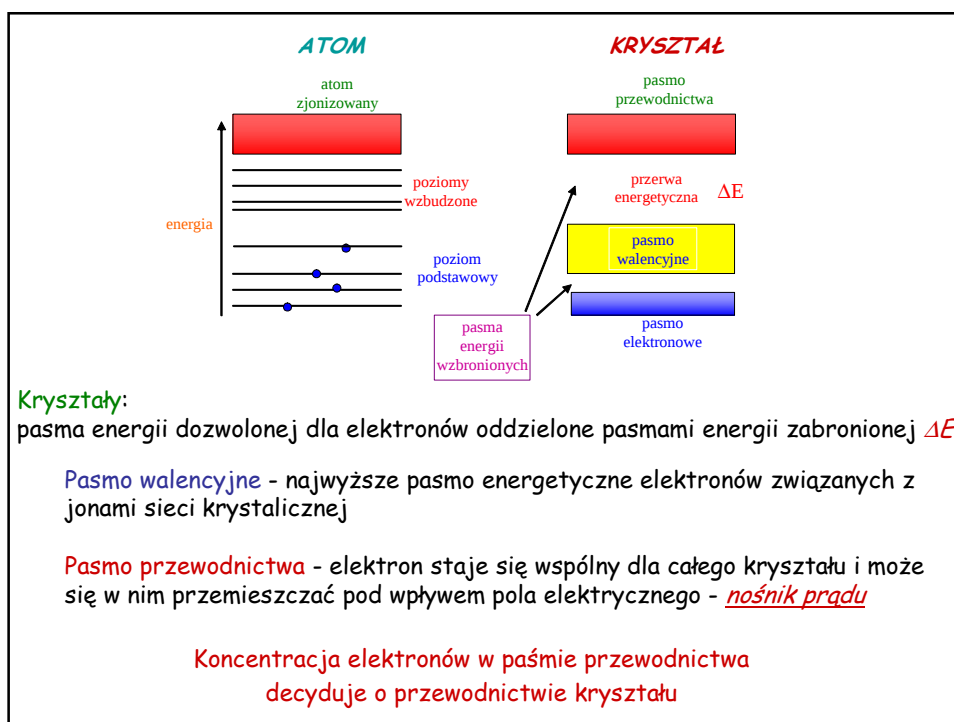
Atomy - dyskretne poziomy energetyczne (stany energetyczne);
określone energie elektronów

ATOM



KRYSTAŁ





Mechanizm przewodnictwa – przewodniki (metale)

Prąd elektryczny - ruch ładunków pod wpływem przyłożonego pola elektrycznego

Ruch elektronów w jednorodnym polu elektrycznym:

W próżni:

- ruch jednostajnie przyspieszony

W materiałach -

- spowalnianie elektronów w wyniku zderzeń fononami
- dryf chmury elektronów wzdłuż pola elektrycznego z prędkością v (~cm/s) znacznie mniejszą niż średnia prędkość pojedynczych elektronów w chmurze.

Fonony - centra rozpraszania; np. zanieczyszczenia lub oscylacje sieci

przewodnictwo materiału:

$$\sigma = \frac{n_e e^2 \tau_e}{2m_e}$$

Ze wzrostem temperatury rośnie koncentracja fononów (zwiększają się drgania sieci krystalicznej)

W metalach: - zwiększenie rozpraszania i zmniejszenie τ_e
- koncentracja elektronów zmienia się bardzo słabo ($n_e \approx \text{const}$)

SKUTEK: opór metali zwiększa się wraz ze wzrostem temperatury

Rozwój materiałów półprzewodnikowych:

German - 1947 - 1958
Era Krzemu - 1962
GaAs - 1970
Wide band gap semiconductors - 1990
Polimery (półprzewodniki organiczne),
materiały amorficzne,

Boron 10.811 B 5	Carbon 12.011 C 6	Nitrogen 14.007 N 7
Aluminum 26.982 Al 13	Silicon 28.086 Si 14	Phosphorus 30.974 P 15
Gallium 69.723 Ga 31	Germanium 72.64 Ge 32	Arsenic 74.922 As 33
Indium 114.818 In 49	Tin 118.710 Sn 50	Antimony 121.760 Sb 51

Półprzewodniki elementarne (samoistne):

przerwa energetyczna

Si - 1.12 eV
Ge - 0.661 eV
C (diament) - 5.46 eV
amorficzny Si - 1.71 eV

Popularne związki półprzewodnikowe:

przerwa energetyczna

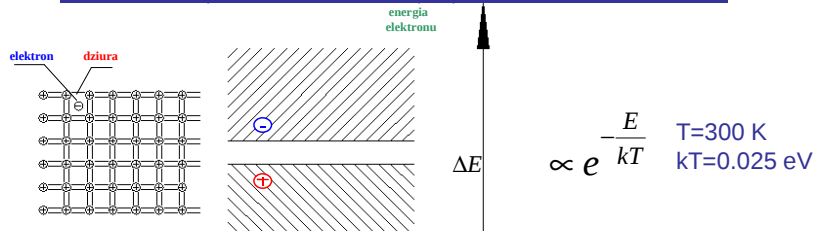
GaAs - 1.41 eV
GaP - 2.26 eV
GaSb - 0.661 eV
InAs - 0.354 eV
InP - 1.344 eV
InSb - 0.17 eV

Półprzewodniki o szerokiej przerwie energetycznej:

przerwa energetyczna

GaN - 3.4 eV
InN - 1.89 eV
AlN - 6.2 eV
SiC - 2.2 - 3.2 eV

Mechanizm przewodnictwa - półprzewodniki samoistne



- elektron w paśmie walencyjnym absorbuje porcję (kwant) energii $> \Delta E$,
- zerwanie wiązania w kryształ: uwolnienie **elektronu** do pasma przewodnictwa,
- **dziura** w paśmie walencyjnym - quasiładunek dodatni - może się przemieszczać

Swobodne elektrony i dziury są nośnikami prądu w półprzewodnikach

Równowaga dynamiczna gęstości nośników obu rodzajów.

Rozkład energii E nośników $\rightarrow$ **rozkład Boltzmanna**:

$$n_e \propto \exp\left(-\frac{E}{kT}\right)$$

$k=8.62 \cdot 10^{-5} \text{ eV K}^{-1}$: stała Boltzmanna, T : temperatura [K]

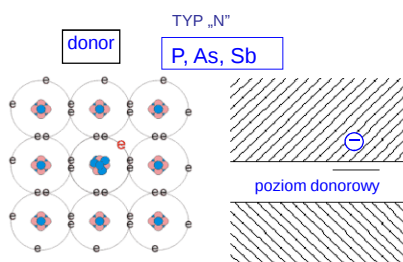
Para nośników elektron-dziura rekombinuje średnio po czasie $10^{-5} - 10^{-7} \text{ s}$

Ze **wzrostem temperatury** rośnie koncentracja nośników prądu $\rightarrow$

$\rightarrow$ **przewodność półprzewodników zwiększa się**

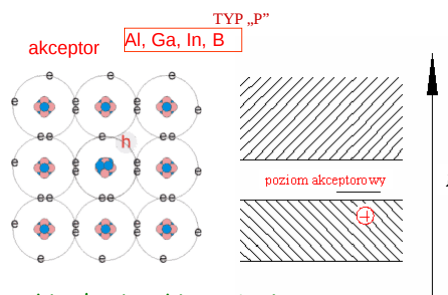
Półprzewodniki domieszkowane

Nośniki większościowe



Wtrącenie do sieci krystalicznej zbudowanej z atomów czterowartościowych **domieszki pięciowartościowej (donora)** powoduje wytworzenie elektronu słabo związanego z siecią

Wtrącenie do sieci krystalicznej zbudowanej z atomów czterowartościowych **domieszki trójwartościowej (akceptora)** powoduje wytworzenie dziury słabo związanej z siecią.



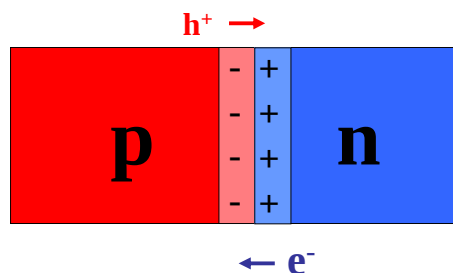
W temperaturze pokojowej prawie wszystkie domieszki są zjonizowane
Poprzez odpowiednie domieszkowanie można wytwarzać półprzewodniki o kontrolowanej, nadmiarowej koncentracji **elektronów** lub **dziur**

Złącze p-n

Doświadczenie „myślowne”:

dokonujemy zetknięcia
kryształu typu **p** z kryształem typu **n**

początkowo każdy z kryształów
jest elektrycznie obojętny



Różnica stężeń nośników powoduje dyfuzję:

dziury z obszaru **p** dyfundują do obszaru typu **n**,
elektrony obszaru **n** dyfundują do obszaru typu **p**,

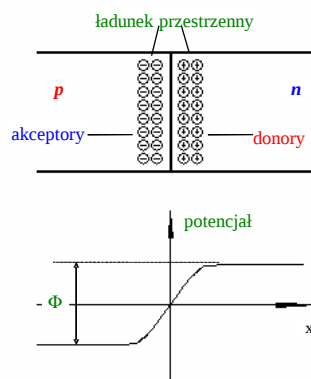
kryształ typu **n** naładował się dodatnio

kryształ typu **p** naładował się ujemnie

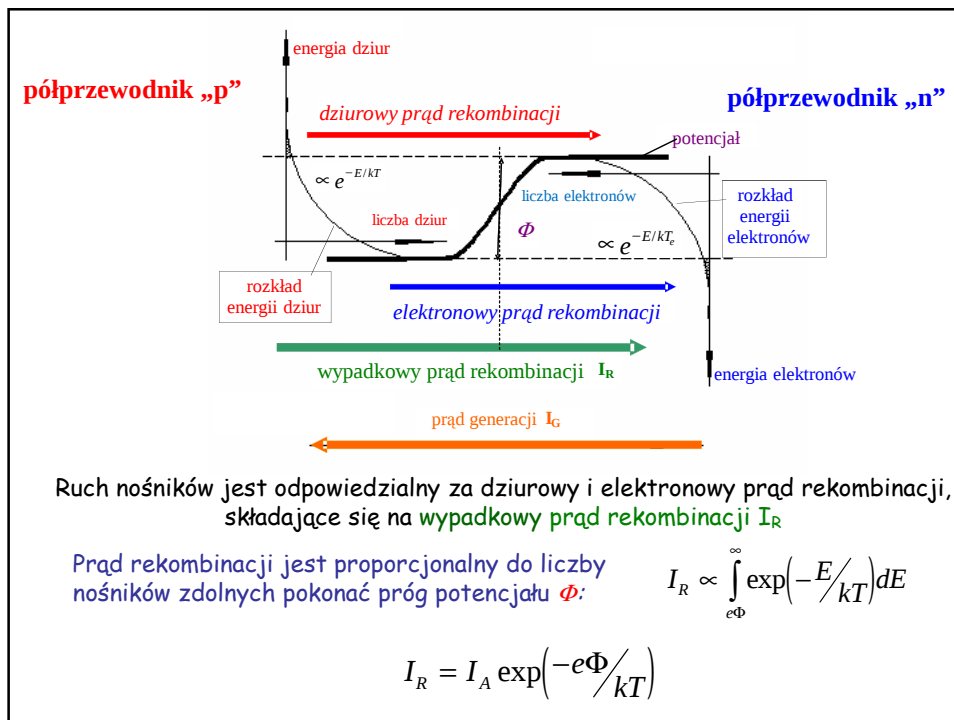
Złącze p-n c.d.

Na styku obu materiałów powstaje próg potencjału o wysokości Φ

Próg potencjału ogranicza dyfuzję nośników
i prowadzi do stabilizacji sytuacji w złączu.



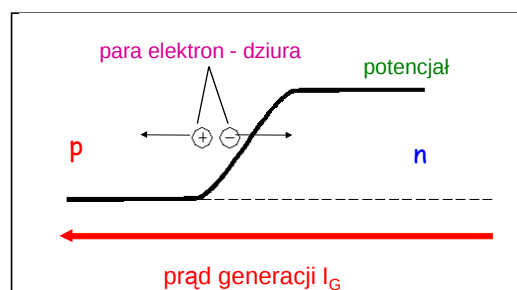
równowaga dynamiczna



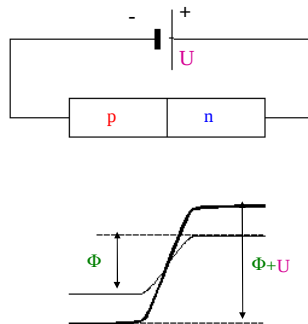
W złączu niespolaryzowanym całkowity prąd płynący przez złącze jest **równy zero**, gdyż prąd I_R jest równoważony przez prąd generacji I_G

$$I_R = I_G$$

Stąd **prąd generacji**: $I_G = I_A \exp\left(-\frac{e\Phi}{kT}\right)$



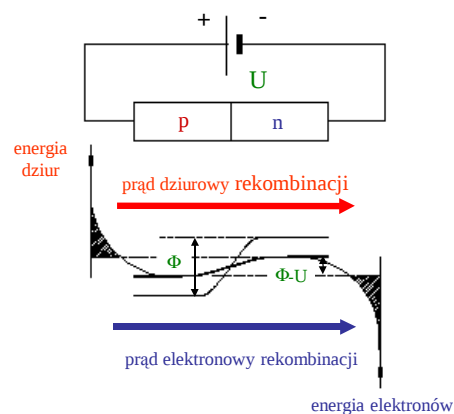
SPOLARYZOWANE złącze p-n c.d.



1. Złącze spolaryzowane w kierunku zaporowym

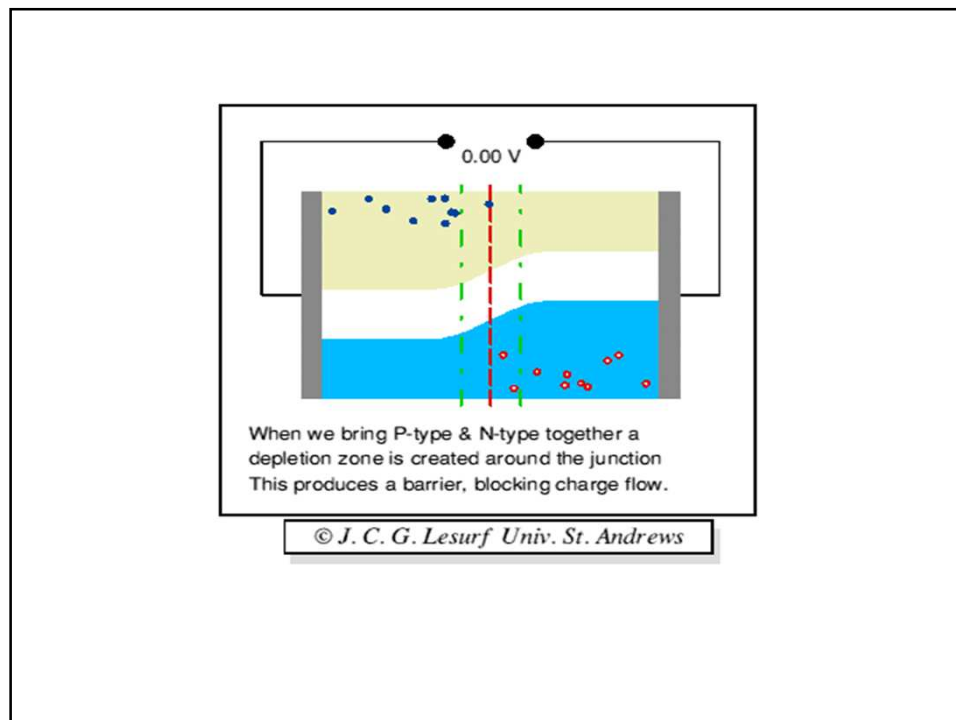
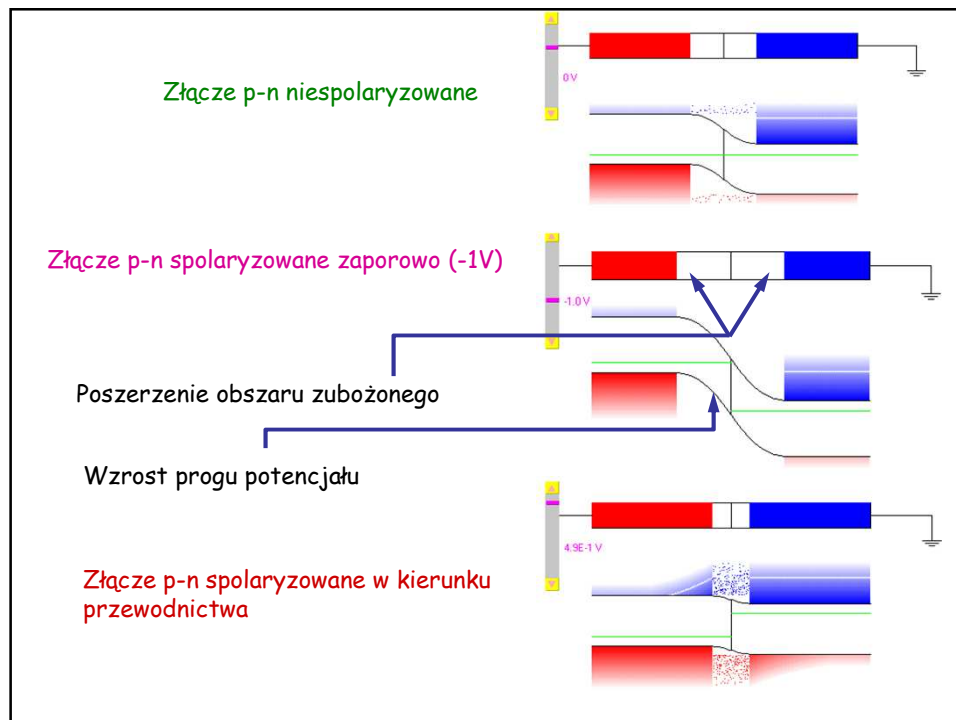
- Wysokość progu potencjału wzrasta do wartości $\Phi + U$
- Zmniejsza się liczba nośników zdolnych pokonać wyższy próg potencjału
- **Prąd rekombinacji maleje**

SPOLARYZOWANE złącze p-n



2. Napięcie zewnętrzne U przyłożone w kierunku przewodzenia

- Zmniejszenie wysokości progu potencjału Φ o wartość U
- **Rośnie liczba nośników, zdolnych pokonać próg potencjału $\Phi - U$**
- **Prąd płynący przez złącze wzrasta**



SPOLARYZOWANE złącze p-n c.d.

W ogólności prąd rekombinacji w złączu **p-n**:

$$I_R = I_A \exp\left[-e(\Phi - U)/kT\right]$$

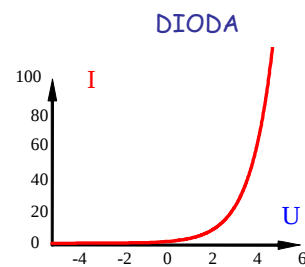
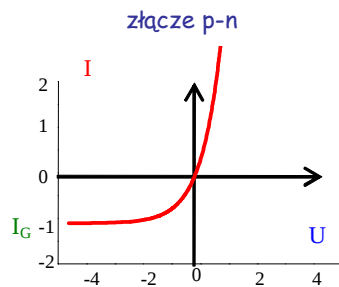
czyli:
$$I_R = I_G \exp\left[eU/kT\right]$$

Ponieważ prąd płynący przez złącze jest sumą prądu rekombinacji i generacji, to:

$$\vec{I} = \vec{I}_G + \vec{I}_R$$

$$I = I_G \left[\exp\left(eU/kT\right) - 1 \right]$$

równanie opisujące pracę złącza p-n,
(równanie Shockley'a)



Dioda półprzewodnikowa (prostownicza)



Dla większych prądów równanie Shockley'a modyfikuje się do postaci:

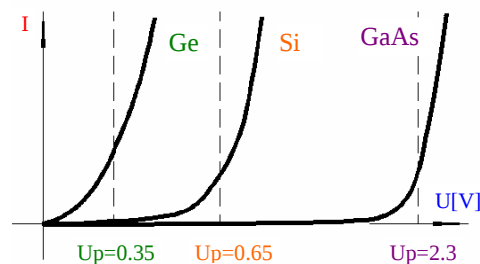
$$U = \frac{MkT}{e} \ln\left(\frac{I}{I_G} + 1\right) + Ir$$

gdzie:

r - rezystancja materiału diody (pasożytnicza),

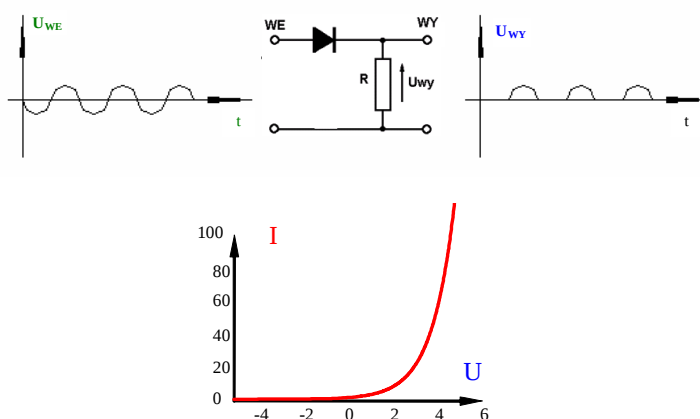
M - współczynnik związany z typem półprzewodnika $M \sim 1-2$

U_p - **napięcie przewodzenia złącza** to napięcie w kierunku przewodzenia, dla którego prąd diody osiąga umownie dużą wartość

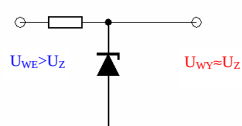


Podstawowe zastosowanie nieliniowych własności złącza p-n
prostowanie prądów elektrycznych

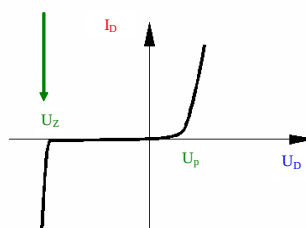
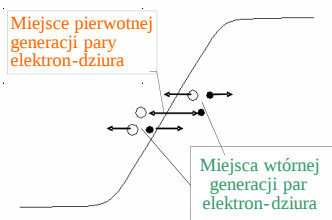
Prostownik jednopółwkowy



Dioda Zenera Zastosowanie: stabilizacja napięć



**Dzielnik napięcia z diodą Zenera
 = stabilizator napięcia**

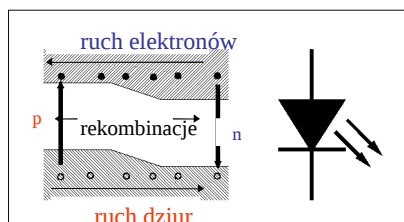


**Lawinowe powielanie nośników
 prądu w złączu w silnym polu
 elektrycznym**

**Zachodzi dla napięć zaporowych
 większych od U_Z**

**Dopuszczalne napięcie wsteczne (zaporowe) diody jest ograniczone
 przez napięcie przebicia, zwane napięciem Zenera (U_Z)**

Dioda świecąca (elektroluminescencyjna - LED)



złącze p-n spolaryzowane w kierunku przewodzenia

w złączu następują intensywne spontaniczne procesy rekombinacyjne

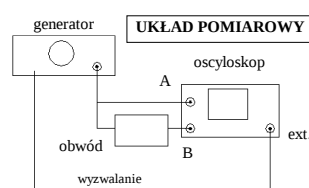
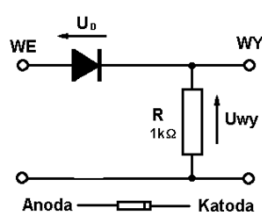
Rekombinacja dziury i elektronu jest związana z emisją kwantu promieniowania o energii równej w przybliżeniu szerokości przerwy energetycznej

Charakterystyka prądowo-napięciowa podobna do charakterystyki diody prostowniczej

Ćwiczenie: „Badanie diod półprzewodnikowych”

1. Cel ćwiczenia.

Zapoznanie się z różnymi rodzajami diod półprzewodnikowych:
dioda prostownicza krzemowa, dioda świecąca (LED) oraz dioda Zenera



Zbudować układ pomiarowy

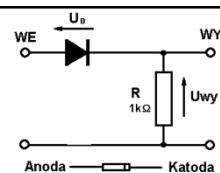
Wejście: **przebieg trójkątny** o napięciach szczytowych od -2.5V do +2.5 V i częstotliwości 1000 Hz

Dioda prostownicza



Dokonać pomiaru charakterystyki diody $I_D = f(U_D)$

Dzielnik napięcia: $U_{WE} = U_D + U_{WY}$, $I_D = U_{WY} / R$

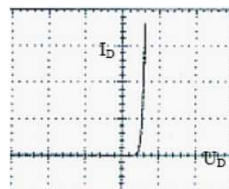
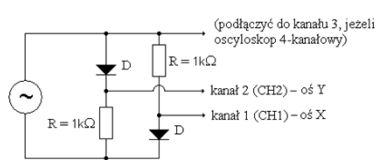


Wykreślić wyniki dla dodatnich napięć, stosując na osi prądów skalę logarymiczną.
Dopasować charakterystykę diody używając zmodyfikowanego równania Shockley'a

$$U_D = \frac{MkT}{e} \ln \left(\frac{I_D}{I_G} + 1 \right) + I_D r$$

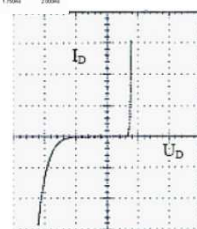
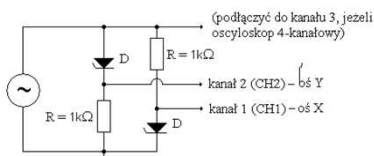
- pomijamy człon $I_D r$ (niewielki prąd)
- pomijamy składnik „1” (ponieważ $I_D \gg I_G$)
- dopasowywanie charakterystyki będzie równoważne dopasowywaniu prostej:

$$U_D = \frac{MkT}{e} (\ln I_D - \ln I_G)$$



Zastąpić diody prostownicze diodami świecącymi LED i wyznaczyć tą samą metodą napięcie przewodzenia. Czy przekroczenie napięcia przewodzenia powoduje świecenie diody?

W tym samym obwodzie wykonać pomiar charakterystyki dla diody Zenera (BZX55, niebieska). Wyznaczyć napięcie Zenera i napięcie U_p



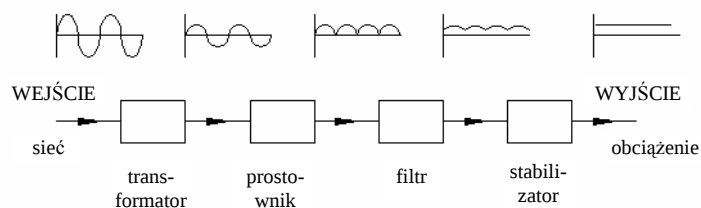
Zasilacze

Źródło energii elektrycznej dla układu wykonawczego:

- źródło napięciowe,
- źródło prądowe (ogranicznik prądu),
- zabezpieczenie przed przegrzaniem, zapaleniem, porażeniem itp.

Zasilacz przetwarza energię elektryczną pobieraną z sieci

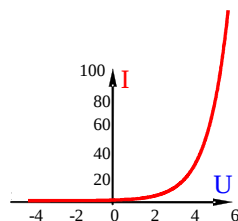
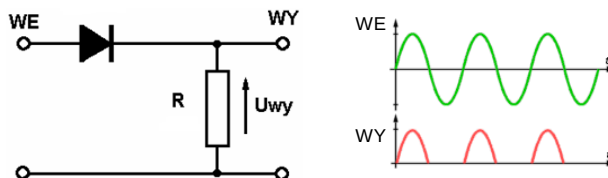
Standardowy schemat blokowy zasilacza:

**Transformator:**

- dopasowanie przemiennego napięcia sieci do napięcia wyjściowego zasilacza
- galwaniczna izolacja układu elektronicznego od sieci

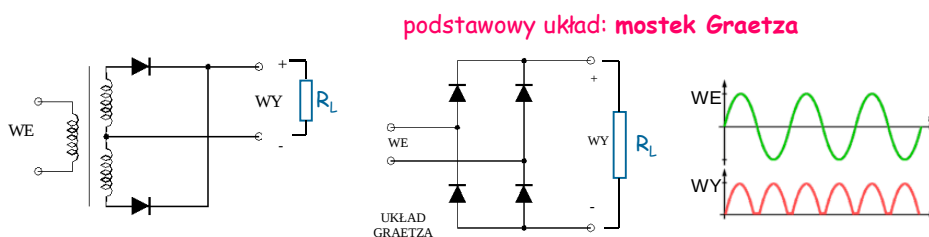
Prostownik:

przekształcenie prądu przemiennego na prąd zmienny płynący w jednym kierunku
 najprostszy prostownik jednopółkowy: dzielnik napięcia z diodą prostowniczą

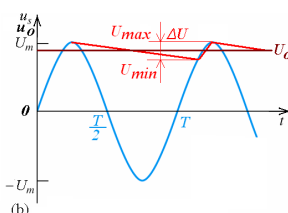
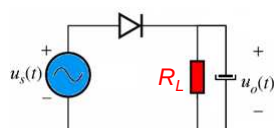
Prostownik jednopółkowy

Prostownik dwupołówkowy:

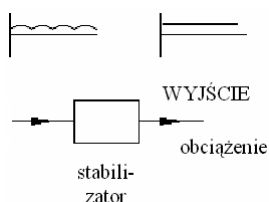
większa wydajność, większa zawartość składowej stałej w widmie wyjściowym, podstawowa składowa pulsacji wynosi 100 Hz.



Karol Pollak
prostowniczy układ
mostkowy
patent - 1895

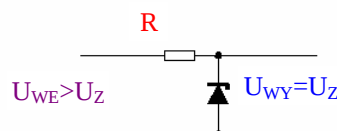
Filtry dolnoprzepustowe:

typu RC lub typu RL (dla dużych prądów wyjściowych) do wyeliminowania pulsacji

Stabilizatory napięcia

Zasada działania: dzielnik napięciowy

Najprostszy: **stabilizator z diodą Zenera**,
 $U_{wy} \approx U_Z$



Półprzewodnikowe stabilizatory napięć standardowych
(5V, 9V, 12V, 15V, 24V itd,) zabezpieczone termicznie i prądowo

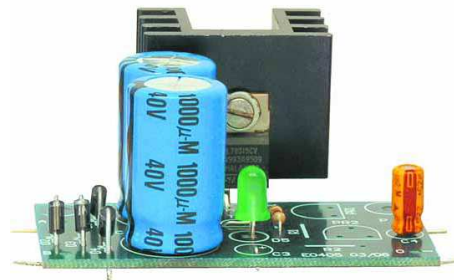
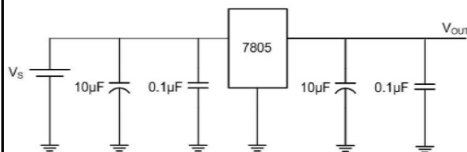
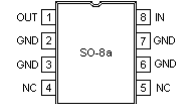
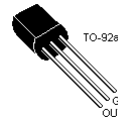
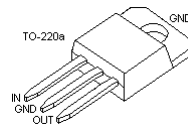
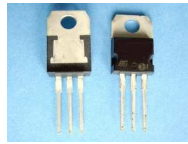
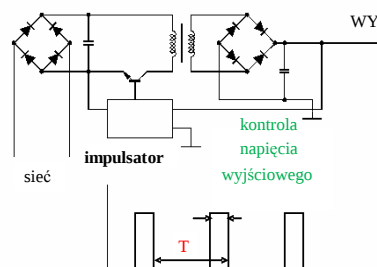


Foto: Piotr Górecki

Przetwornice - stabilizatory impulsowe o dużej sprawności

- napięcie sieciowe jest prostowane,
- modulowane z wysoką częstotliwością
- impulsy wysokiej częstotliwości transformowane
- prostowanie i filtrowanie
- na wyjściu wytwarzane jest napięcie stałe



Stabilizacja napięcia wyjściowego: automatyczna regulacja szerokości impulsów modulujących w stosunku do okresu ich powtarzania (τ/T)

Przy wysokiej częstotliwości (10 - 20 kHz): miniaturyzacja transformatora, niewielkie pojemności filtrujące, **wysoka sprawność zasilacza**

„inteligentne” zasilacze sterowane mikroprocesorem

Powielacz napięcia

Zastosowanie:

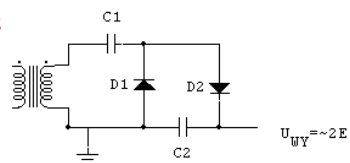
źródła wysokiego napięcia stałego o niewielkiej (ok. 1 mA) wydajności prądowej

Diodowo - pojemnościowe powielacze napięcia

Przykład - „podwajacz” napięcia:

- wejście: źródło napięcia zmiennego
- wyjście: stałe napięcie

Wydajność prądowa zależy od częstości impulsów ze źródła



Przy wysokich stopniach powielenia, napięcia wyjściowe mogą przekraczać **dziesiątki tysięcy woltów dla układów zbudowanych z elementów niskonapięciowych!**

Voltage Multiplier x6

