

Złącze p-n: dioda

Półprzewodniki

Przewodnictwo półprzewodników

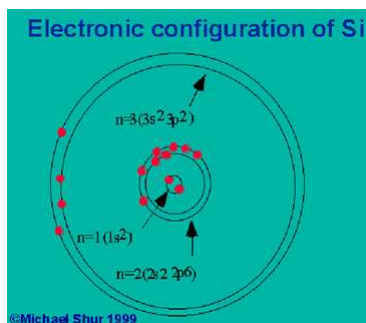
Dioda

Dioda: element nieliniowy

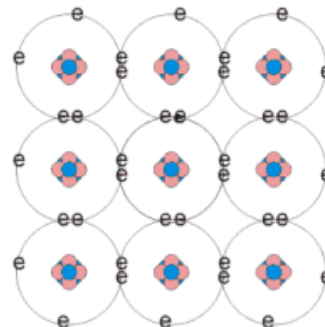
Przewodnictwo kryształów

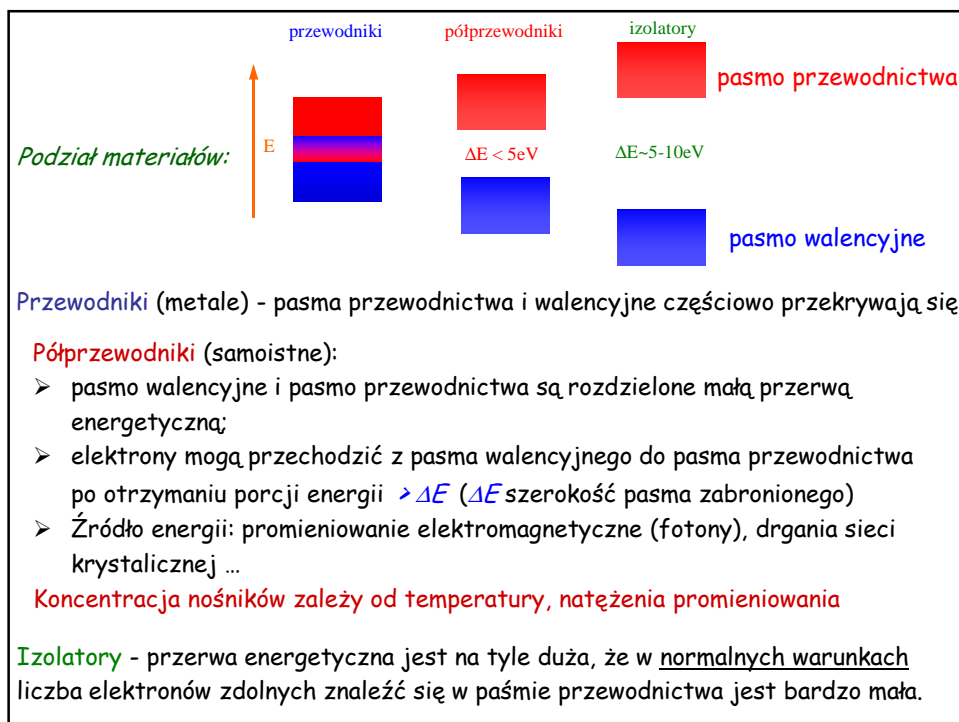
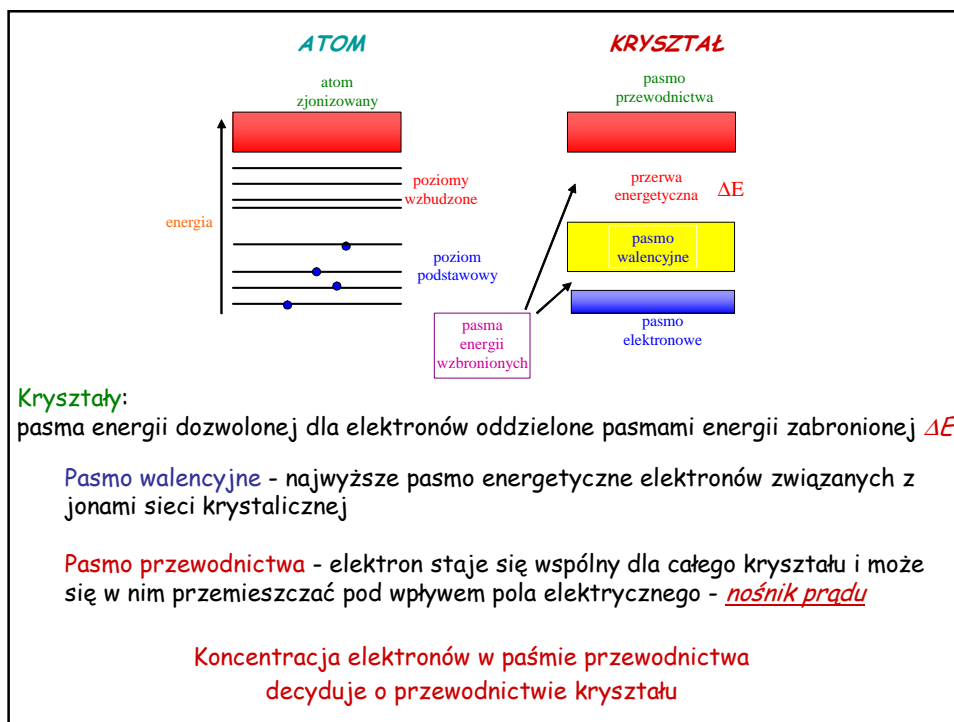
Atomy - dyskretne poziomy energetyczne (stany energetyczne);
określone energie elektronów

ATOM



KRYZTAŁ





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

Półprzewodniki elementarne (samoistne):

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

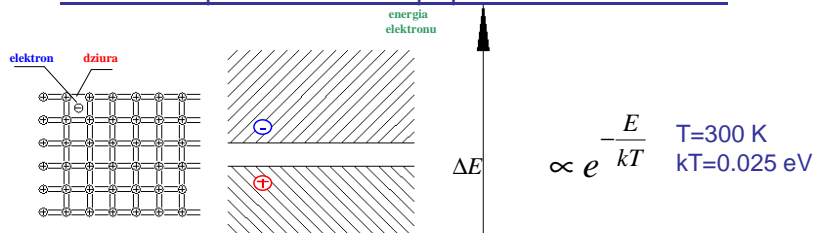
Popularne związki półprzewodnikowe:

	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 Boltzmann:

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

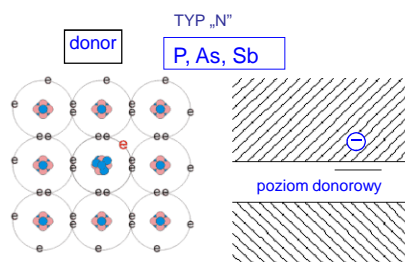
$k=8.62 \cdot 10^{-5} \text{ eV K}^{-1}$: stała Boltzmann, T : temperatura [K]

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**

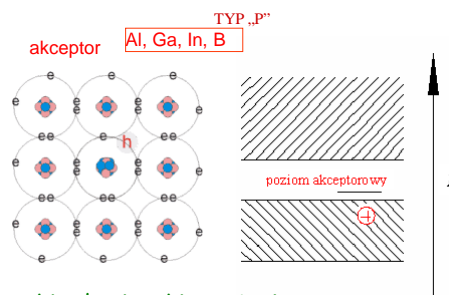
Półprzewodniki domieszkowane



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

Nośniki większościowe

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



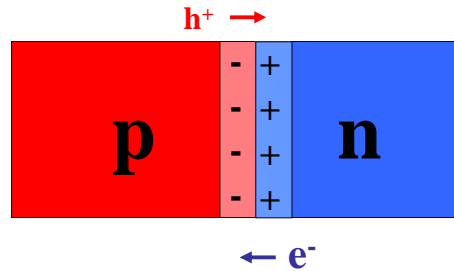
W temperaturze pokojowej prawie wszystkie domieszki są zjonizowane. Poprzez odpowiednie domieszkowanie można wytwarzać półprzewodniki o kontrolowanej, nadmiarowej koncentracji elektronów lub dziur

Złącze p-n

Doświadczenie „myślowe”:

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**,

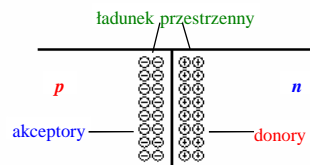
kryształ typu **n** naładował się dodatnio

kryształ typu **p** naładował się ujemnie

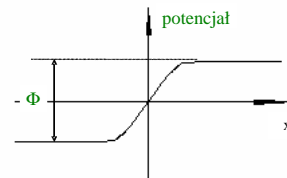
Złącze p-n c.d.

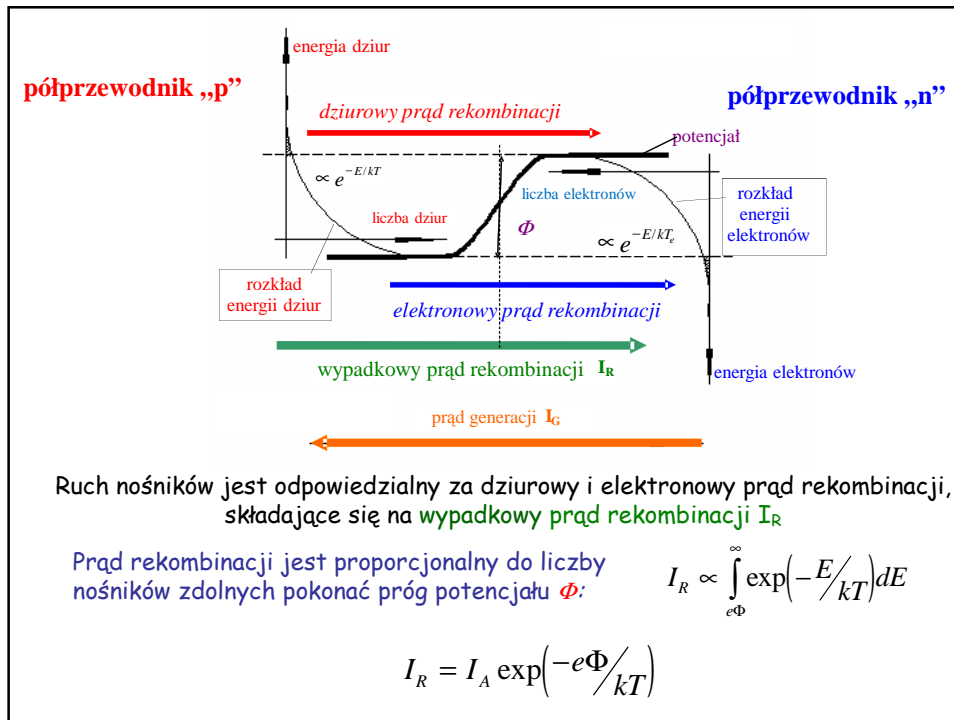
Na styku obu materiałów powstaje próg potencjału o wysokości ϕ

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



równowaga dynamiczna

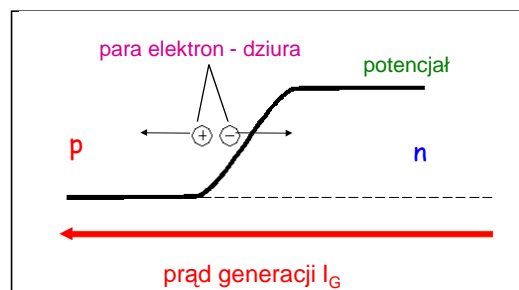




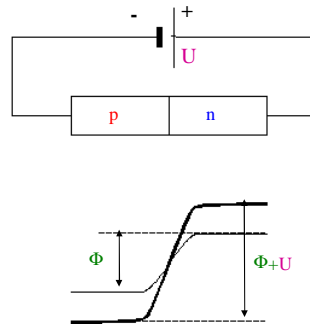
W złączu niespolaryzowanym całkowity prąd płynący przez złącze jest **równy zero**, gdyż prąd I_R jest równoważony przez prąd generacji I_G

$$I_R = I_G$$

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



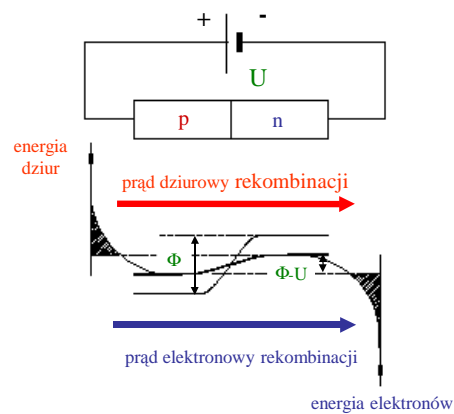
SPOLARYZOWANE złącze p-n c.d.



1. Złącze spolaryzowane w kierunku zaporowym

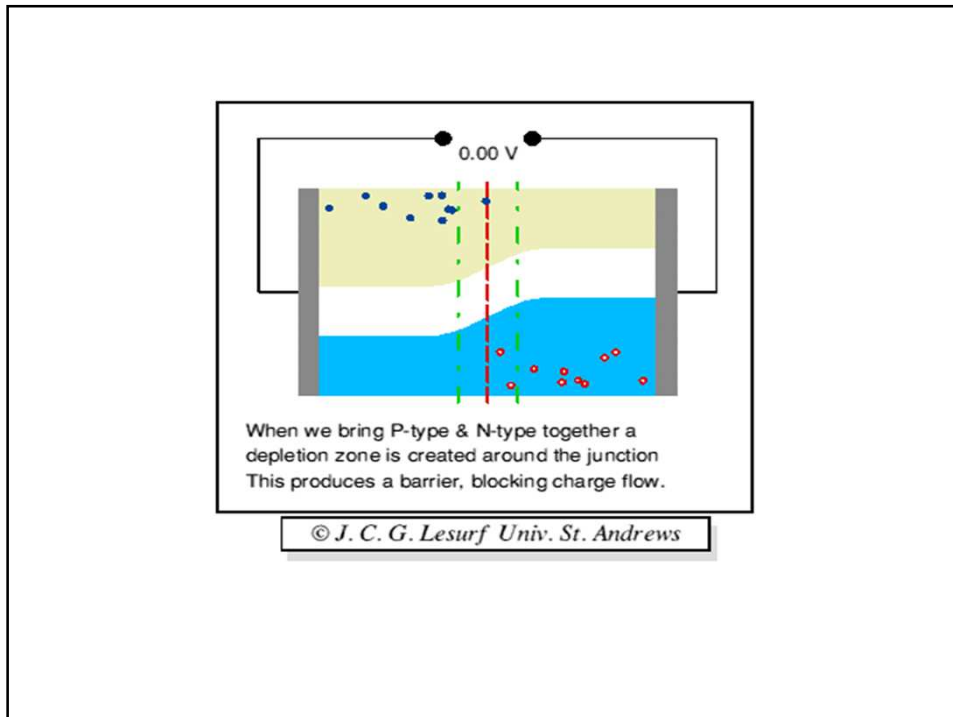
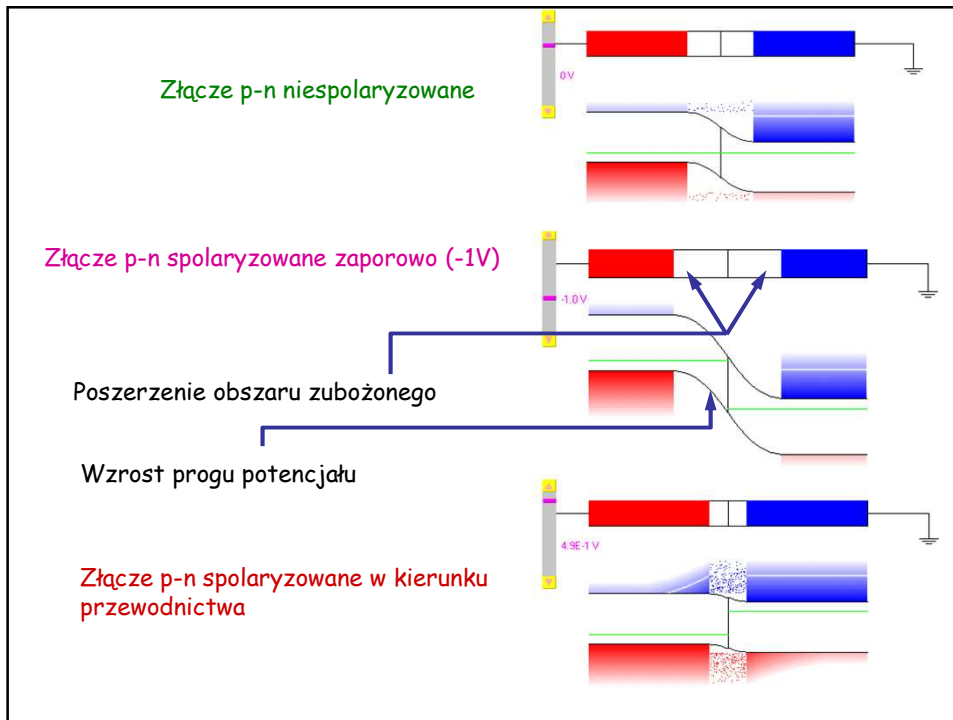
- Wysokość pręgu potencjału wzrasta do wartości $\Phi + U$
- Zmniejsza się liczba nośników zdolnych pokonać wyższy próg potencjału
- Prąd rekombinacji maleje

SPOLARYZOWANE złącze p-n



2. Napięcie zewnętrzne U przyłożone w kierunku przewodzenia

- Zmniejszenie wysokości pręgu 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: $I_R = I_A \exp\left[\frac{-e(\Phi - U)}{kT}\right]$

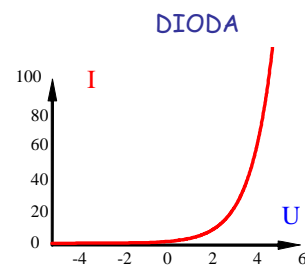
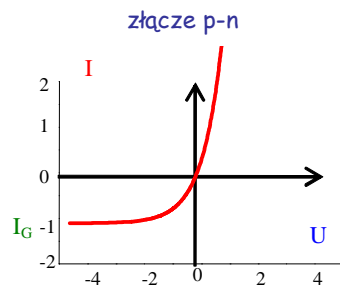
czyli: $I_R = I_G \exp\left[\frac{eU}{kT}\right]$

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

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

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

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



Dioda półprzewodnikowa (prostownicza)



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

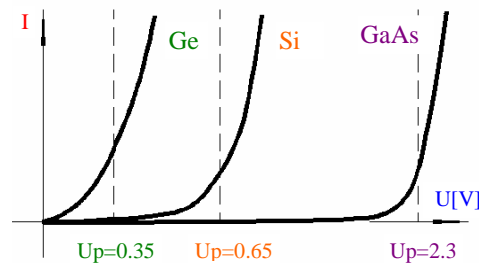
$$U = \frac{MkT}{e} \ln\left(\frac{I}{I_G} + 1\right) + Ir$$

gdzie:

r - rezystancja materiału diody (pasożytnicza),

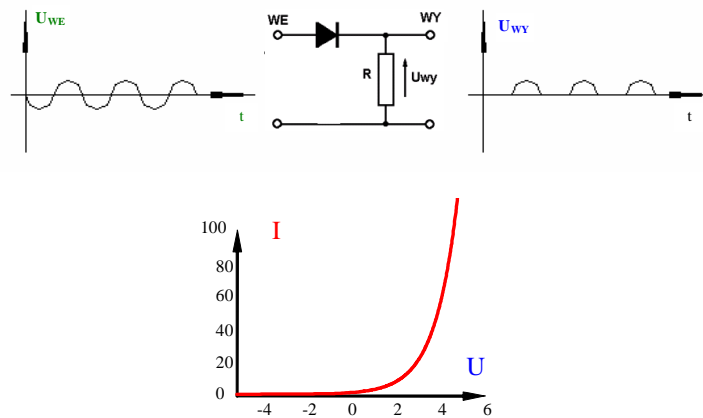
M - współczynnik związany z typem półprzewodnika $M \sim 1-2$

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

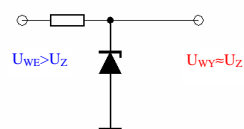


Podstawowe zastosowanie nieliniowych własności złącza p-n
prostowanie prądów elektrycznych

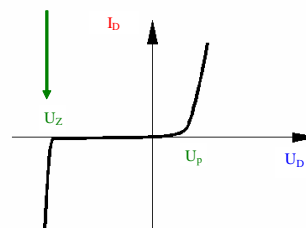
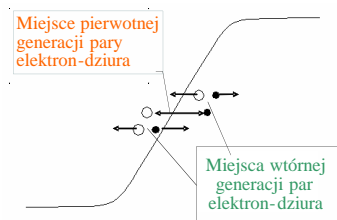
Prostownik jednopółkowy



Dioda Zenera Zastosowanie: stabilizacja napięć



Dzielnik napięcia z diodą Zenera = stabilizator napięcia

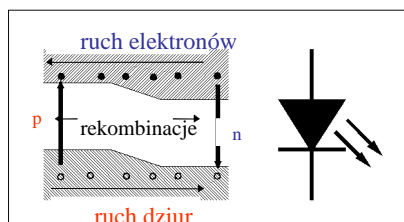


Lawinowe powielanie nośników prądu w złączu w silnym polu elektrycznym

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

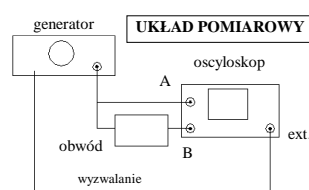
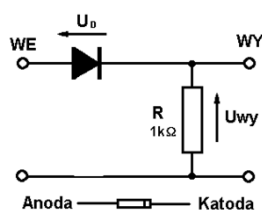
Rekombinacja dziury i elektronu jest związana z emisją kwantu promieniowania o energii równej w przybliżeniu szerokości przerwy energetycznej

Charakterystyka prądowo-napięciowa podobna do charakterystyki diody prostowniczej

Ćwiczenie: „Badanie diod półprzewodnikowych”

1. Cel ćwiczenia.

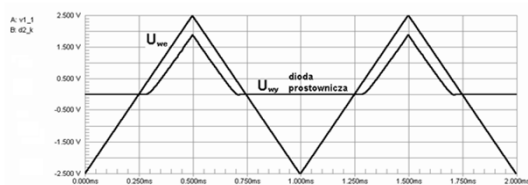
Zapoznanie się z różnymi rodzajami diod półprzewodnikowych: dioda prostownicza krzemowa, dioda świecąca (LED) oraz dioda Zenera



Zbudować układ pomiarowy

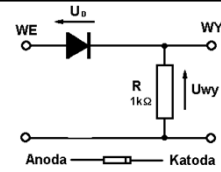
Wejście: przebieg trójkątny o napięciach szczytowych od -2.5V do +2.5 V i częstotliwości 1000 Hz

Dioda prostownicza



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

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

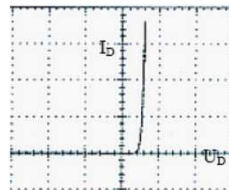
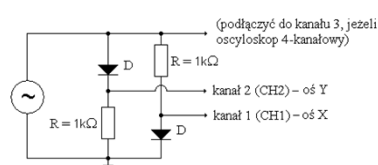


Wykreślić wyniki dla dodatnich napięć, stosując na osi prądów skalę logarytmiczną
Dopasować charakterystykę diody używając zmodyfikowanego równania Shockley'a

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

- 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

