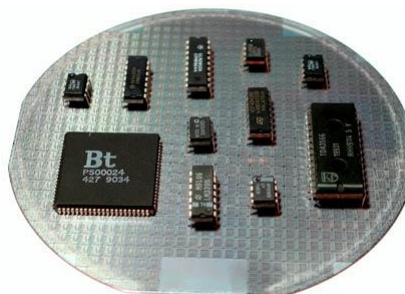
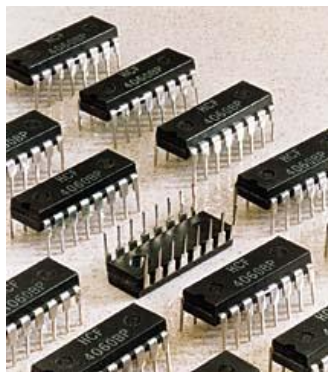


Indywidualna Pracownia Elektroniczna 2016



<http://pe.fuw.edu.pl/>

Wojciech DOMINIK

INDYWIDUALNA PRACOWNIA ELEKTRONICZNA

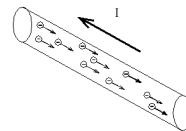
1. Plan zajęć Pracowni przewiduje 7(8) wykładów i 5 ćwiczeń. Wykład stanowi integralną część Pracowni.
2. Zajęcia w Pracowni odbywają się w grupach. Przydział do danej grupy obowiązuje podczas całego semestru.
3. Obecność na wszystkich zajęciach praktycznych Pracowni jest obowiązkowa.
4. Przed każdym ćwiczeniem przeprowadzany jest sprawdzian (na ocenę). Na każdym sprawdzianie wstępnym obowiązuje znajomość materiału podanego na wykładach do dnia sprawdzianu oraz materiału zawartego w instrukcjach do ćwiczeń.
5. Dwukrotne niezaliczenie sprawdzianu wstępnego do danego ćwiczenia powoduje definitywne skreślenie z listy uczestników Pracowni.
6. Podczas ćwiczeń studenci są oceniani z przygotowania do zajęć oraz z postawy w trakcie ćwiczeń.
7. Po zakończeniu ćwiczenia **student składa w ciągu jednego tygodnia krótki raport** zawierający opis przebiegu ćwiczenia, opracowane wyniki oraz wnioski. Raport podlega ocenie. **Nieterminowe dostarczenie raportu powoduje obniżenie oceny o 0.5 za każde 7 dni spóźnienia, a w skrajnej sytuacji odmowę przyjęcia raportu i niedopuszczenie do następnych zajęć.**
8. Ocena z ćwiczenia jest wypadkową ocen ze wstępnego sprawdzianu, z raportu oraz otrzymanej w trakcie zajęć. Wszystkie oceny cząstkowe muszą być pozytywne, aby ćwiczenie mogło być uznane za zaliczone.
9. **Warunkiem dopuszczenia do kolejnego ćwiczenia jest zaliczenie ćwiczenia poprzedniego.**
10. Zaliczenie Pracowni następuje po zdaniu kolokwium końcowego. **Do kolokwium dopuszczone będą tylko osoby, które otrzymały oceny pozytywne wszystkich ćwiczeń.**
11. Kolokwium końcowe ma charakter egzaminu ustnego i obejmuje cały materiał programu Pracowni.
12. Materiały Pracowni i informacje bieżące znaleźć można na stronach: pe.fuw.edu.pl

PPS - Pracownia Przyjazna Studentowi

Indywidualna Pracownia Elektroniczna 2016			
Wykłady, P116 (B0.21) lub 2.25, Pasteura		Ćwiczenia IV piętro, Pasteura	
Diody półprzewodnikowe	4.10.2016 11-14	Diody półprzewodnikowe	6.10.2016 13-16
Tranzystor bipolarny Wzmacniacz tranzystorowy	11.10.2016 11-14	Tranzystor bipolarny Wzmacniacz tranzystorowy	13.10.2016 13-16
Cyfrowe układy scalone	18.10.2016 11-14 20.10.2016 13-16	Cyfrowe układy scalone	25.10.2016 11-14 27.10.2016 13-16 3.11.2016 13-16
Wzmacniacze operacyjne Stabilizator napięcia	8.11.2016 11-14 10.11.2016 13-16	Wzmacniacze operacyjne Stabilizator napięcia	15.11.2016 11-14 17.11.2016 13-16
Zastosowanie układów FPGA w budowie aparatury pomiarowej	22.11.2016 11-14	Wzmacniacze operacyjne Stabilizator napięcia	24.11.2016 13-16
Aparatura pomiarowa	29.11.2016 11-14	Konsultacje	1.12.2016 13-16
		Zaliczenie – egzamin	6.12.2016 11-14

Prąd elektryczny w obwodach; przypomnienie podstawowych pojęć i praw

Prąd: uporządkowany ruch ładunków elektrycznych

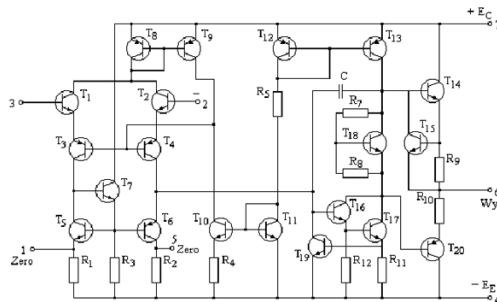


Natężenie prądu (prąd - I):
$$I = \frac{dQ}{dt}$$

ilość ładunku dQ przepływająca przez przewodnik w jednostce czasu dt

Napięcie elektryczne (U):

spadek potencjału na części obwodu elektrycznego nie zawierającej źródeł prądu



Prawo Ohma: $U = I \cdot R$

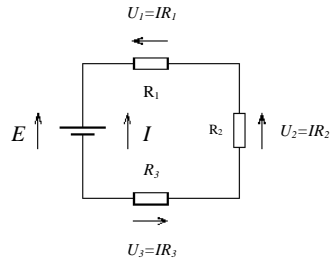
Współczynnik proporcjonalności R między napięciem i natężeniem:

→ **opór lub rezystancja**

Siła elektromotoryczna E : napięcie na odcinku obwodu zawierającego źródło prądu, a nie zawierającego rezystancji

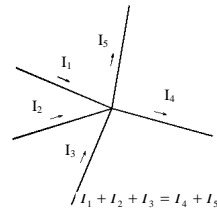
Drugie prawo Kirchhoffa:
dla obwodu zamkniętego

$$\sum_i IR_i = E$$






Pierwsze prawo Kirchhoffa:
dla dowolnego węzła sieci elektrycznej

$$\sum_i \vec{I}_i = 0$$



Układy złożone z elementów biernych

Bierne elementy elektroniczne to:

- opór (R) 
- indukcyjność (L) 
- pojemność (C) 

Uogólnienie prawa Ohma dla prądów zmiennych: $i = f(t)$

napięcie $u(t)$ jest liniowym funkcjonałem prądu $i(t)$

opór R: $u_R(t) = R \cdot i(t)$

indukcyjność L: $u_L(t) = L \frac{di(t)}{dt}$

pojemność C: $u_C(t) = \frac{q(t)}{C} = \frac{1}{C} \int i(t) dt$

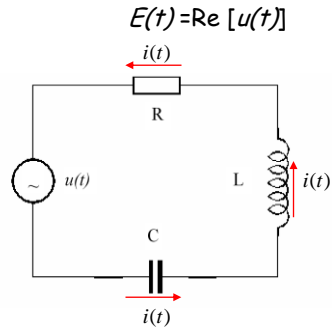
Prawa Kirchhoffa obowiązują !!!

Rezystancja $R \rightarrow \rightarrow \rightarrow$ Impedancja Z

Obwód szeregowy RLC zasilany ze źródła napięciowego o zmiennej sile elektromotorycznej:

Z drugiego prawa Kirchhoffa: $E = \sum_i U_i$

równanie ruchu ładunku elektrycznego



$$u = U_0 \cdot e^{j\omega t} \quad U_0 - \text{zespolona amplituda napięcia}$$

$$i = I_0 \cdot e^{j\omega t} \quad I_0 - \text{zespolona amplituda natężenia}$$

$$j = \sqrt{-1} \quad \omega = 2\pi\nu - \text{częstość kołowa}$$

Podstawiając wyrażenia na $i(t)$ i $u(t)$ otrzymujemy:

$$\frac{U_0}{I_0} = Z = R + j\omega L - \frac{j}{\omega C}$$

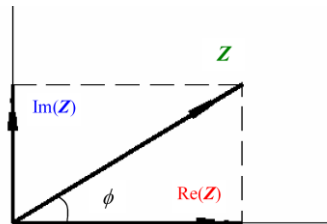
opór: $Z_R = R$
 Składowe impedancji Z : indukcyjność: $Z_L = j\omega L$
 pojemność: $Z_C = \frac{1}{j\omega C}$

Wielkość Z jest impedancją obwodu
 Impedancja jest wielkością zespoloną

Postać algebraiczna impedancji zastępczej obwodu złożonego zależy od kształtu obwodu !!!

Rezystancja: część rzeczywista impedancji $\text{Re}(Z)$

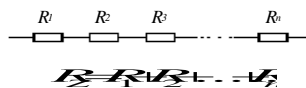
Reaktancja: część urojona impedancji $\text{Im}(Z)$



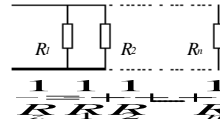
Reprezentacja impedancji na płaszczyźnie zespolonej:

$$\frac{\text{Im}(Z)}{\text{Re}(Z)} = \text{tg}(\phi) \text{ tangens kąta przesunięcia fazowego } \phi \text{ między napięciem i natężeniem prądu}$$

Z praw Ohma i Kirchhoffa wynikają prawa szeregowego i równoległego łączenia oporów, które pozwalają obliczać rezystancje zastępcze R_z



$$R_z = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

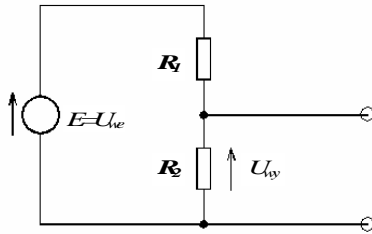


$$\frac{1}{R_z} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

Szeregowe połączenie impedancji: $Z = Z_1 + Z_2 + \dots + Z_n$

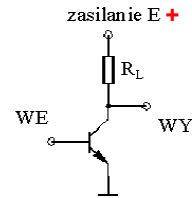
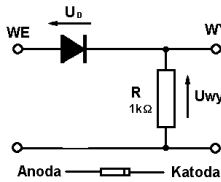
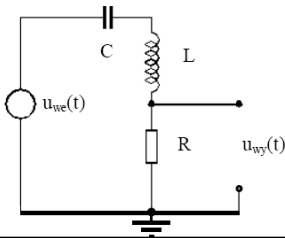
Równoległe połączenie impedancji: $\frac{1}{Z} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \dots + \frac{1}{Z_n}$

dzielnik napięcia - podstawowy obwód elektryczny



$$U_{wy} = U_{we} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Działanie większości obwodów elektrycznych można opisać jako układ jednego lub kilku dzielników napięcia



Wzmacniacz tranzystorowy o wspólnym emiterze

Obwód całkujący (filtr dolnoprzepustowy)

Dla sygnału harmonicznego: $u_{wy}(t) = \frac{u_{we}(t) \cdot Z_C}{Z}$

$$u_{we}(t) = U_{we} e^{j\omega t}$$

Stosunek napięć :

$$\frac{u_{wy}(t)}{u_{we}(t)} = \frac{1}{R + \frac{1}{j\omega C}}$$

Transmitancja:

$$\left| \frac{U_{wy}}{U_{we}} \right| = \frac{1}{\sqrt{\omega^2 R^2 C^2 + 1}}$$

Przesunięcie fazowe między napięciem wyjściowym a wejściowym:

$$tg \varphi = \frac{Im \frac{Z_C}{Z}}{Re \frac{Z_C}{Z}}$$

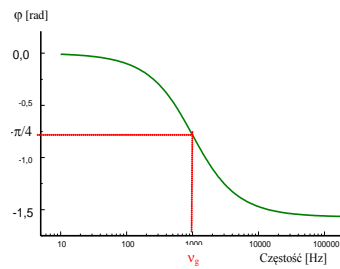
$$\varphi = \arctan(-\omega RC)$$

Pasmo transmisji filtra dolnoprzepustowego w skali częstości: od 0 do ν_g

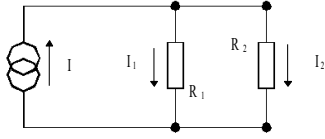
$$2\pi\nu_g = \omega_g = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{RC}$$

Dla częstości granicznej: $\left| \frac{U_{wy}}{U_{we}} \right| = \frac{1}{\sqrt{2}}$ $\varphi = -\frac{\pi}{4}$

dzielnik napięcia !!!



Analogicznym układem elektrycznym jest **dzielnik prądowy**



Prądy w poszczególnych gałęziach wynoszą:

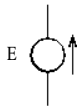
$$I_1 = \frac{G}{G+G_2} I \quad I_2 = \frac{G_2}{G+G_2} I$$

gdzie:

$$G_1 = \frac{1}{R_1} \quad G_2 = \frac{1}{R_2}$$

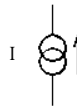
oznaczają **przewodności** gałęzi obwodu

Teoria obwodów rozważa dwa rodzaje idealnych źródeł energii elektrycznej:



Źródło napięciowe:

Napięcie E na jego zaciskach
(siła elektromotoryczna)
nie zależy od natężenia prądu
wyjściowego



Źródło prądowe:

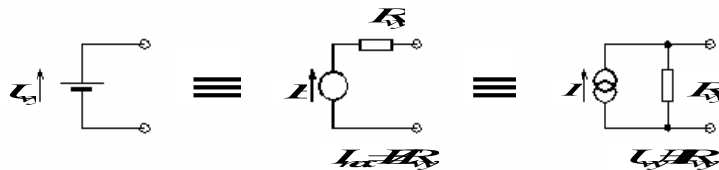
Prąd wyjściowy I nie zależy
od napięcia na zaciskach

Każde rzeczywiste źródło energii elektrycznej może być przedstawione jako:

- źródło napięciowe i szeregowo rezystancja wewnętrzna

lub

- źródło prądowe i bocznikująca je rezystancja wewnętrzna

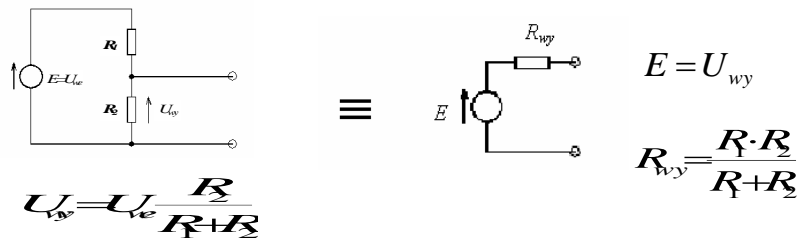


Zasada Thevenina:

Każdą sieć elektryczną można przedstawić w postaci obwodu zastępczego składającego się ze źródła napięciowego i szeregowej rezystancji wewnętrznej

Zasada Nortona:

Każdą sieć elektryczną można przedstawić w postaci obwodu zastępczego składającego się ze źródła prądowego zobocznikowanego rezystancją wewnętrzną



Znajomość rezystancji (impedancji) wewnętrznych układów elektrycznych oraz parametrów ich źródeł jest podstawą świadomego postępowania się urządzeniami elektrycznymi

Złącze p-n: dioda

Półprzewodniki

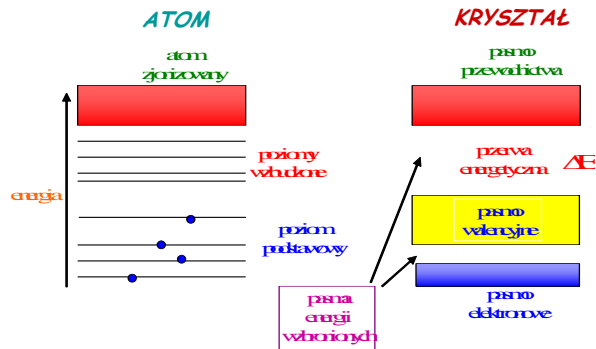
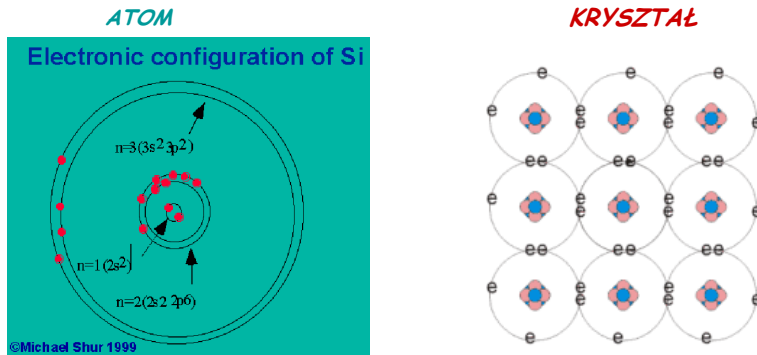
Przewodnictwo półprzewodników

Dioda

Dioda: element nieliniowy

Przewodnictwo kryształów

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



Kryształy:

pasma energii dozwolonej dla elektronów oddzielone pasmami energii zabronionej ΔE

Pasmo walecyjne - najwyższe pasmo energetyczne elektronów związanych z jonami sieci krystalicznej

Pasmo przewodnictwa - elektron staje się wspólny dla całego kryształu i może się w nim przemieszczać pod wpływem pola elektrycznego - **nośnik prądu**

Koncentracja elektronów w paśmie przewodnictwa
decyduje o przewodnictwie kryształu

przewodniki półprzewodniki izolatory

pasma przewodnictwa
pasma walencyjne

Podział materiałów:

Przewodniki (metale) - pasma przewodnictwa i walencyjne częściowo przekrywają się

Półprzewodniki (samoistne):

- pasmo walencyjne i pasmo przewodnictwa są rozdzielone małą przerwą energetyczną;
- elektrony mogą przechodzić z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa po otrzymaniu porcji energii ΔE (ΔE szerokość pasma zabronionego)
- Źródło energii: promieniowanie elektromagnetyczne (fotony), drgania sieci krystalicznej ...

Koncentracja nośników zależy od temperatury, natężenia promieniowania

Izolatory - przerwa energetyczna jest na tyle duża, że w normalnych warunkach liczba elektronów zdolnych znaleźć się w paśmie przewodnictwa jest bardzo mała.

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 (\sim 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,

Baron 10.811 B	Carbon 12.011 C	Nitrogen 14.007 N
5	6	7
Aluminium 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

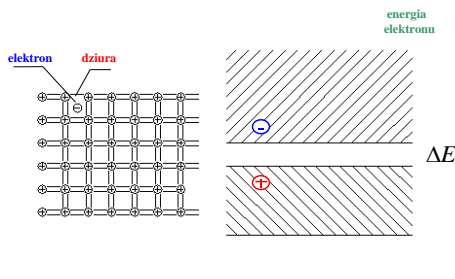
GaAs -	1.41 eV
GaP -	2.26 eV
GaSb -	0.661 eV
InAs -	0.354 eV
InP -	1.344 eV
InSb -	0.17 eV

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



$$\propto e^{-\frac{E}{kT}} \quad \begin{matrix} T=300 \text{ K} \\ kT=0.025 \text{ eV} \end{matrix}$$

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

Swobodne elektrony i dziury są nośnikami prądu w półprzewodnikach

Mechanizm przewodnictwa - półprzewodniki samoistne

Swobodne elektrony i dziury są nośnikami prądu w półprzewodnikach

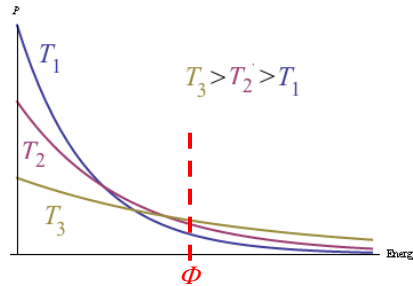
Równowaga dynamiczna gęstości nośników obu rodzajów.

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

Rozkład energii E nośników → rozkład Boltzmanna:

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

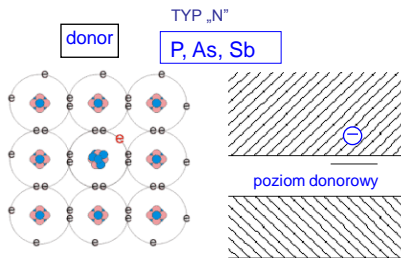
$$n_e(E) \propto \exp\left(-\frac{E}{kT}\right)$$



Ze wzrostem temperatury rośnie koncentracja nośników prądu →
→ przewodność półprzewodników zwiększa się

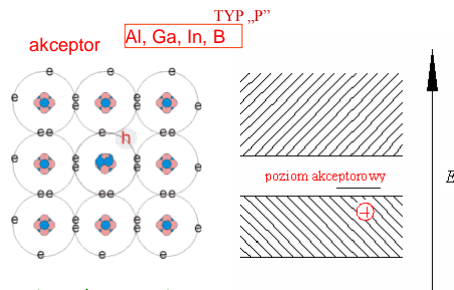
Półprzewodniki domieszkowane

Nośniki większościowe



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

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



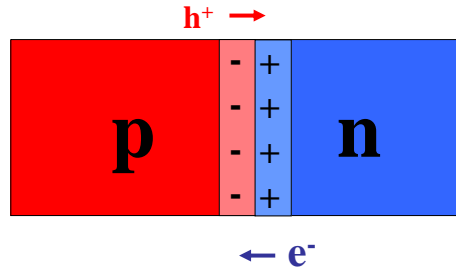
W temperaturze pokojowej prawie wszystkie domieszki są zjonizowane
Poprzez odpowiednie domieszkowanie można wytwarzać półprzewodniki o kontrolowanej, nadmiarowej koncentracji elektronów lub dziur

Złącze p-n

Doświadczenie „myślowe”:

dokonyjemy 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*,

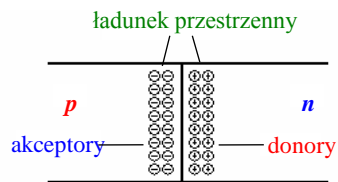
kryształ typu *p* naładował się ujemnie

kryształ typu *n* naładował się dodatnio

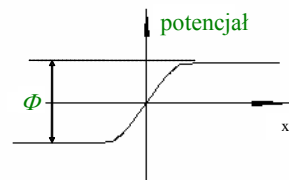
Złącze p-n c.d.

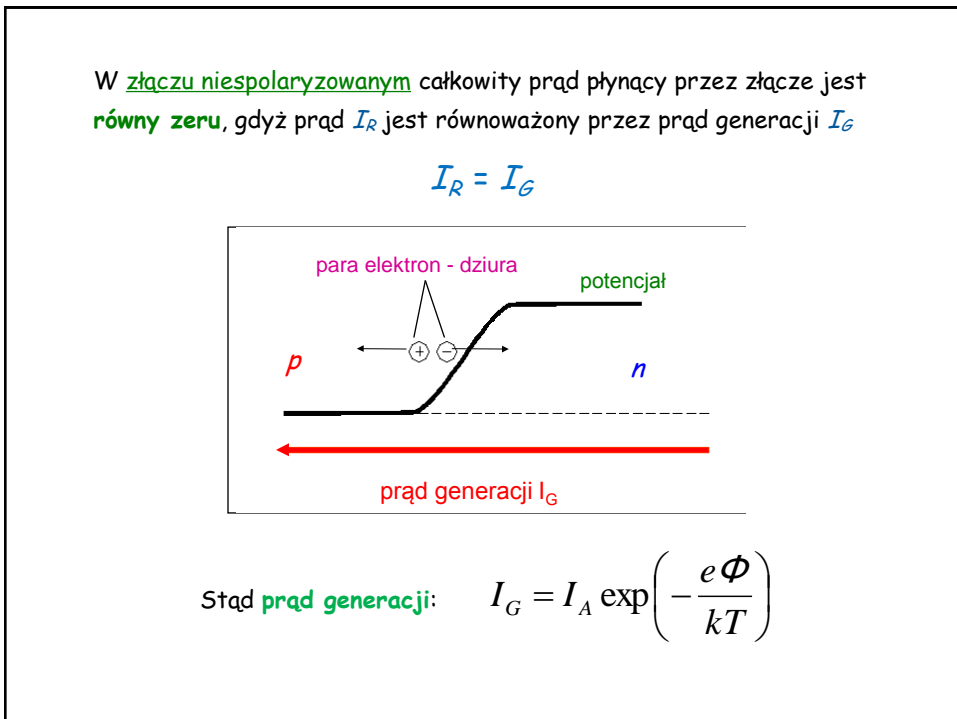
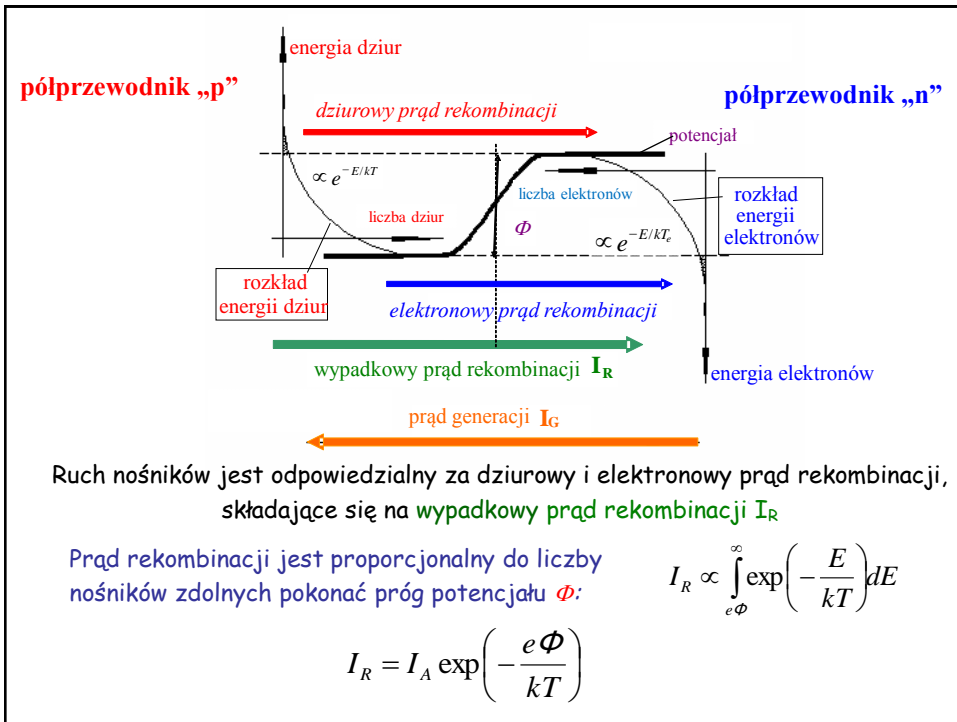
Na styku obu materiałów powstaje próg potencjału o wysokości Φ

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

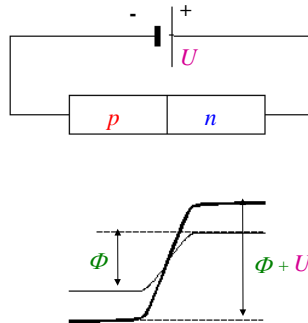


równowaga dynamiczna !





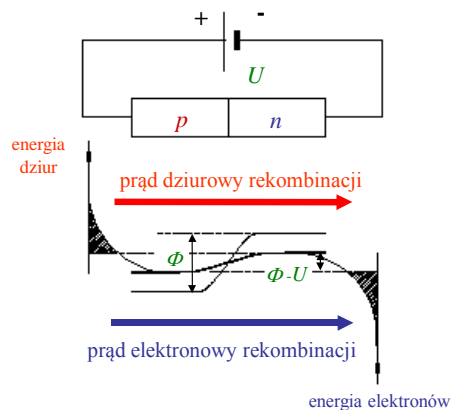
SPOLARYZOWANE złącze p-n



1. Złącze spolaryzowane w kierunku zaporowym

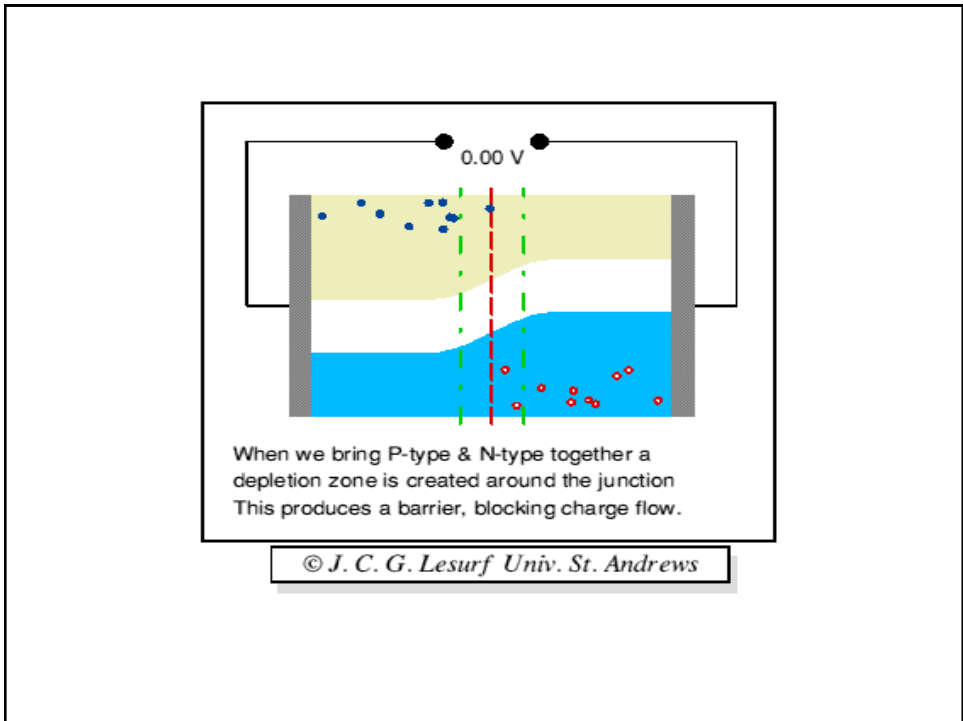
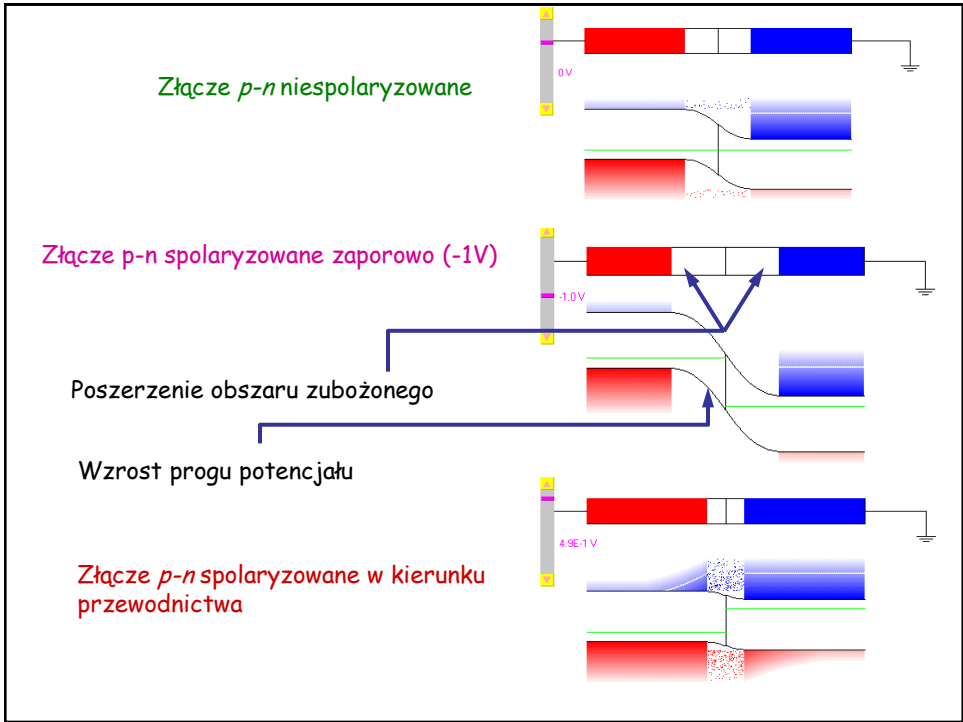
- Wysokość proggu potencjału wzrasta do wartości $\Phi + U$
- Zmniejsza się liczba nośników zdolnych pokonać wyższy próg potencjału
- Prąd rekombinacji maleje

SPOLARYZOWANE złącze p-n c.d.



2. Napięcie zewnętrzne U przyłożone w kierunku przewodzenia

- Zmniejszenie wysokości proggu 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:

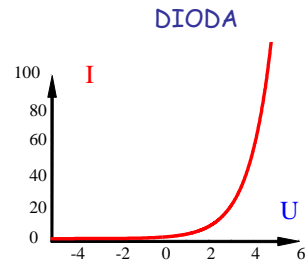
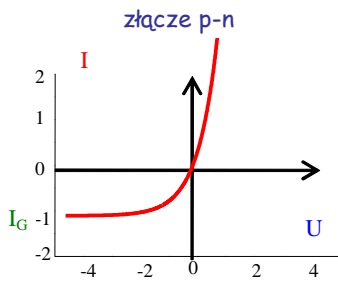
$$I_R = I_G \exp\left[\frac{eU}{kT}\right]$$

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:

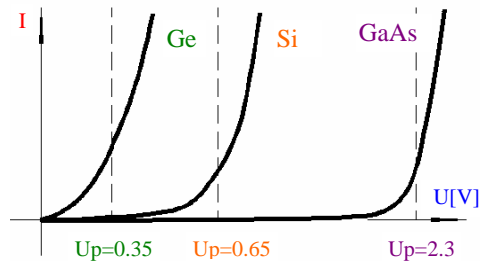
$$U = \frac{MkT}{e} \ln\left(\frac{I}{I_G} + 1\right) + Ir$$

gdzie:

r - rezystancja materiału diody (pasożytnicza),

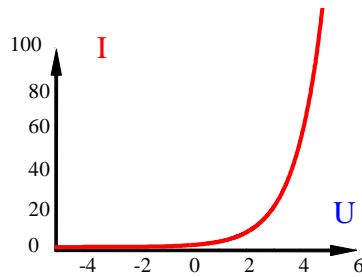
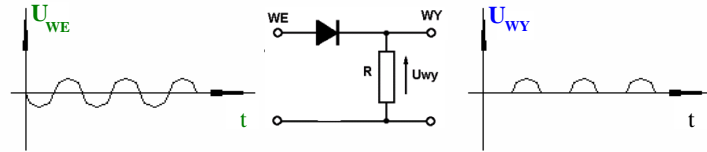
M - współczynnik związany z typem półprzewodnika $M \sim 1-2$

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

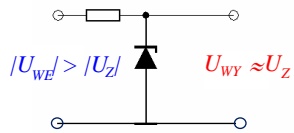


Podstawowe zastosowanie nieliniowych własności złącza p-n
prostowanie prądów elektrycznych

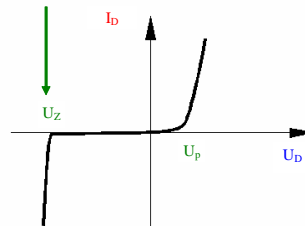
Przestownik jednopółkowy



Dioda Zenera Zastosowanie: stabilizacja napięć

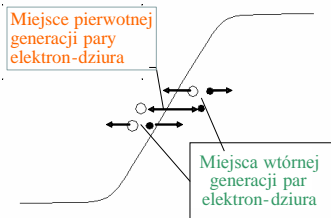


Dzielnik napięcia z diodą Zenera = stabilizator napięcia



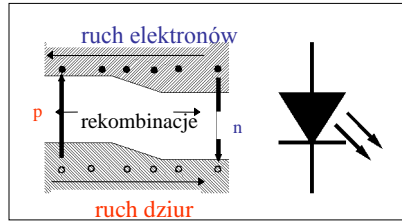
Lawinowe powielanie nośników prądu w złączu w silnym polu elektrycznym

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)

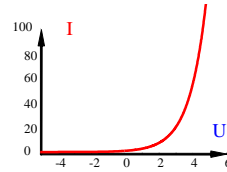


złącze p-n spolaryzowane w kierunku przewodzenia

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

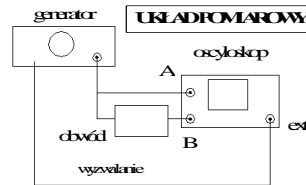
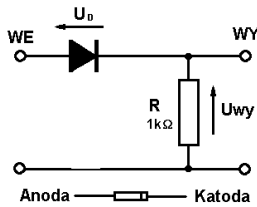
Charakterystyka prądowo-napięciowa podobna do charakterystyki diody prostowniczej



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

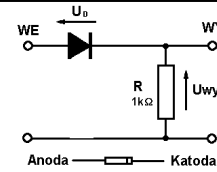
Wejście: przebieg trójkątny o napięciach szczytowych od -2.5V do +2.5 V i częstotści 1000 Hz

Dioda prostownicza



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

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

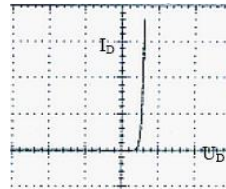
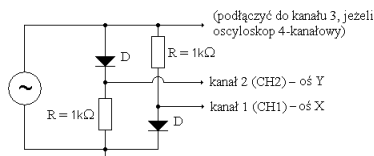


Wykreślić wyniki dla dodatnich napięć, stosując na osi prądów skalę logarytmiczną
Dopasować charakterystykę diody używając zmodyfikowanego równania Shockley'a

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

- 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

