



Elementy elektroniczne

dr inż. Piotr Ptaak

Politechnika Rzeszowska
Wydział Elektrotechniki i Informatyki
Katedra Podstaw Elektroniki

A-303, pptak@prz.edu.pl, tel. 178651113
konsultacje: pn. – cz. 11-12



Plan wykładu



Dioda prostownicza, zastosowania

- Złącze skokowe i liniowe
- Charakterystyka I-V złącza P-N
- Parametry małosygnałowe diod
- Modele diod
- Zastosowania diod



Równanie Shockleya

$$I = I_0 (e^{\frac{U}{U_T}} - 1)$$

I_0 – prąd nasycenia nośników mniejszościowych

$$U_T = \frac{kT}{q} \approx 26 \text{ mV } (T = 300 \text{ K}) \quad \text{– potencjał termiczny}$$

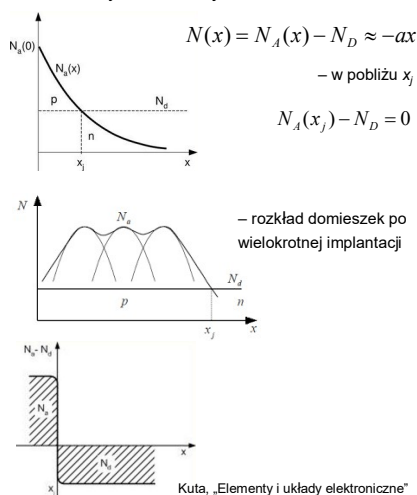


Złącze P-N

Metody wytwarzania złącz P-N

- Złącze dyfuzyjne – dyfuzja pierwiastka donorowego lub akceptorowego z fazy gazowej lub ciekłej – **złącze liniowe**.
- Złącze implantowane – bombardowanie kryształu jonami domieszki rozpędzonymi do dużej energii (~ 10-200 keV) – dokładne i precyzyjne domieszkowanie – **złącze skokowe**.
- Złącze epitaksjalne – nanoszenie warstwy epitaksjalnej półprzewodnika z fazy gazowej lub ciekłej wzbogaconej o pierwiastki domieszek – **złącze skokowe**.

Rozkłady koncentracji domieszek

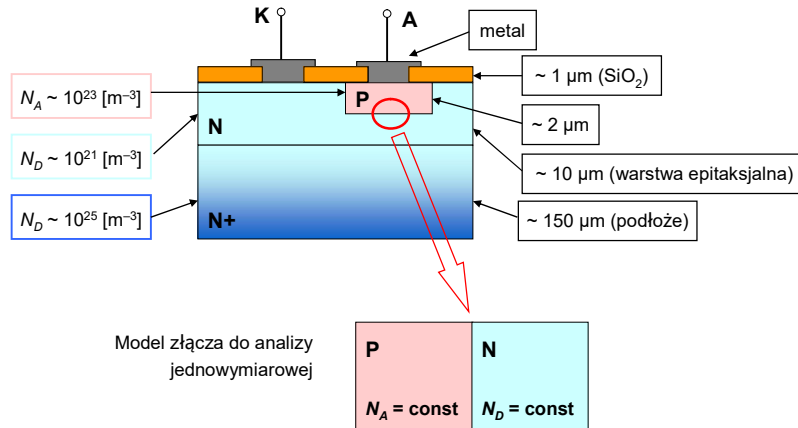




Złącze P-N



Złącze P-N wykonane metodą epitaksjalno-planarną (epiplanarną)



Elementy elektroniczne I – złącze P-N

5

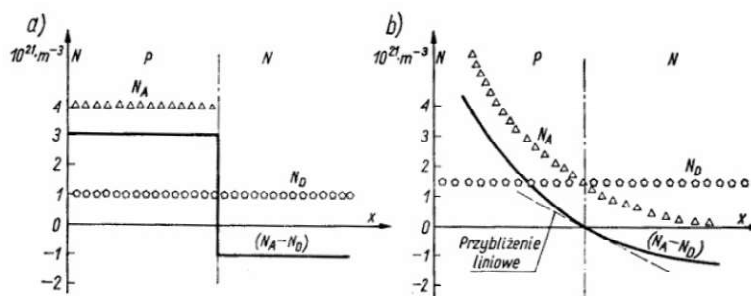


Złącze skokowe i liniowe



Efektywny rozkład koncentracji domieszek (decyduje o typie półprzewodnika):

$$(N_A - N_D)$$



Rys. 3.7. Rozkład koncentracji domieszek w złączu skokowym (a) i liniowym (b)

$$N(x) = N_A(x) - N_D \approx -ax$$

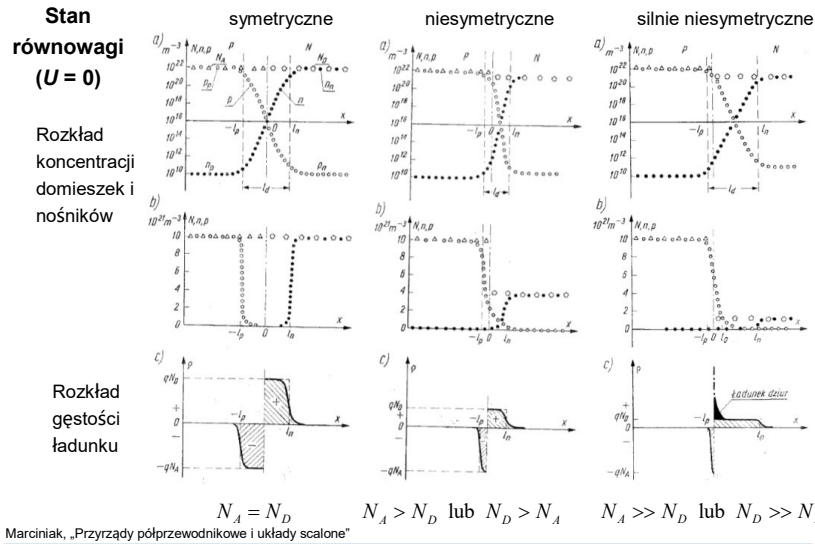
Marciniak, „Przyrządy półprzewodnikowe i układy scalone”

Elementy elektroniczne I – złącze P-N

6



Złącze skokowe

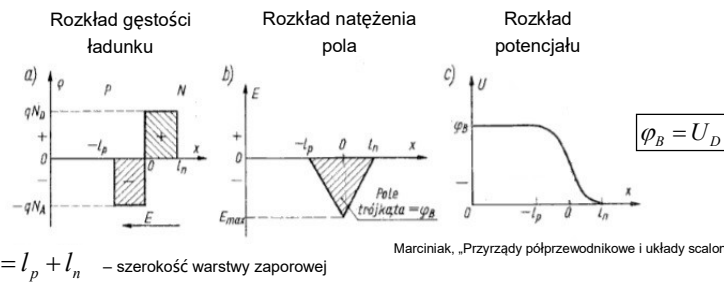


Elementy elektroniczne I – złącze P-N

7



Złącze skokowe symetryczne



Stan równowagi (brak polaryzacji $U = 0$)

$$l_d = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \frac{N_D + N_A}{N_D N_A} \varphi_B} \quad \varphi_B = U_T \ln \frac{N_D N_A}{n_i^2}$$

Stan nierównowagi (napięcie polaryzacji $U \neq 0$)

$$l_d = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \frac{N_D + N_A}{N_D N_A} (\varphi_B - U)}$$

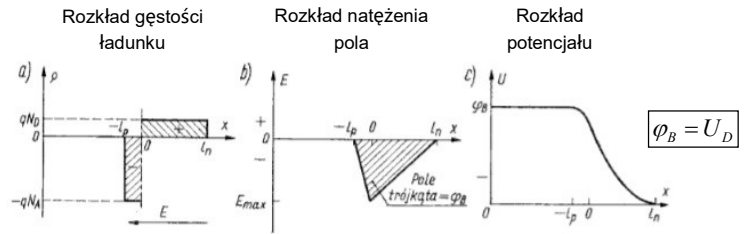
$U = -U$ – dla kierunku zaporowego
 $U = +U$ – dla kierunku przewodzenia

Elementy elektroniczne I – złącze P-N

8



Złącze skokowe niesymetryczne



$l_d = l_p + l_n$ – szerokość warstwy zaporowej

Stan równowagi (brak polaryzacji $U = 0$)

$$l_d \approx \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q} \frac{1}{N_D} \varphi_B} \quad \text{dla } N_A \gg N_D, \quad l_n \gg l_p \quad \mathbf{P^+-N}$$

$$l_d \approx \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q} \frac{1}{N_A} \varphi_B} \quad \text{dla } N_D \gg N_A, \quad l_p \gg l_n \quad \mathbf{N^+-P}$$

Elementy elektroniczne I – złącze P-N

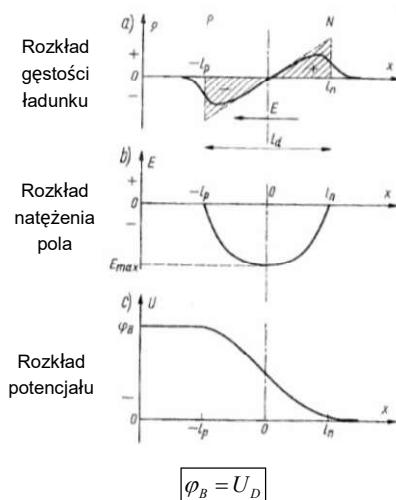
9



Złącze liniowe



Marciniak, „Przyrządy półprzewodnikowe i układy scalone”



$$N(x) = N_A(x) - N_D \approx -ax$$

$$l_p = l_n = l_d / 2 \quad \text{– szerokość warstwy zaporowej}$$

Stan równowagi (brak polaryzacji $U = 0$)

$$l_d \approx \sqrt[3]{\frac{12\varepsilon_s}{qa} \varphi_B}$$

$$\varphi_B = 2U_T \ln \frac{al_d}{2n_i}$$

Stan nierównowagi (napięcie polaryzacji $U \neq 0$)

$$l_d \approx \sqrt[3]{\frac{12\varepsilon_s}{qa} (\varphi_B - U)}$$

$U = -U$ – dla kierunku zaporowego

$U = +U$ – dla kierunku przewodzenia

Elementy elektroniczne I – złącze P-N

10



Charakterystyka I-V złącza P-N



Przybliżenie pierwsze

- pole elektryczne istnieje tylko w warstwie zaporowej (rezystancje obszarów obojętnych elektrycznie są równe zero),
- pomija się zjawiska generacji-rekombinacji w warstwie zaporowej,
- poziom wstrzykiwania nośników jest mały,
- pomija się zjawisko przebicia.

$$J = J_S (e^{\frac{U}{\phi_r}} - 1), \quad J_S = q \left(\frac{D_n n_{p0}}{L_n} + \frac{D_p p_{n0}}{L_p} \right) = q n_i^2 \left(\sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} \frac{1}{N_A} + \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \frac{1}{N_D} \right)$$

W przypadku złącza niesymetrycznego jeden ze składników można pominąć, np.:

$$\text{dla } N_A \gg N_D: \quad J_S = q \frac{D_p p_{n0}}{L_p} = q n_i^2 \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \frac{1}{N_D}$$



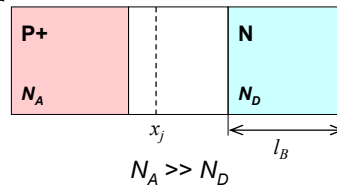
Złącze niesymetryczne



$$\text{dla } N_A \gg N_D: \quad J_S = q \frac{D_p p_{n0}}{L_p} = q n_i^2 \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \frac{1}{N_D}$$

Charakterystyka I-V złącza niesymetrycznego jest określona właściwościami nośników mniejszościowych (D_p , τ_p) w warstwie słabiej domieszkowanej i koncentracją domieszek w tej warstwie.

Emiter złącza –
warstwa silniej
domieszkowana



Baza złącza –
warstwa słabiej
domieszkowana

Złącze z krótką bazą: $l_B < L_n$

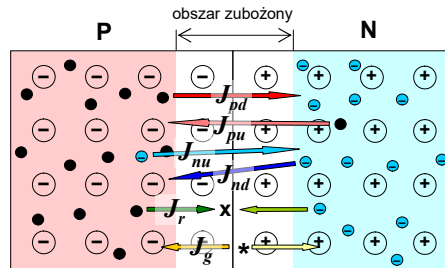


Charakterystyka I-V złącza P-N



Przybliżenie drugie

- uwzględnia się zjawiska generacji-rekombinacji w warstwie zaporowej – przez złącze płyną dodatkowe prądy:
 - prąd generacji J_g ,
 - prąd rekombinacji J_r .



- Zmniejsza się ilość nośników większościowych (rekombinacja).
- Wzrasta liczba nośników mniejszościowych (generacja).

Elementy elektroniczne I – złącze P-N

13



Charakterystyka I-V złącza P-N



Przybliżenie drugie – polaryzacja zaporowa

- generacja przeważa nad rekombinacją.

$$J_g = \frac{1}{2} q \frac{n_i}{\tau} \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \frac{N_D + N_A}{N_D N_A} (\phi_B - U)}$$

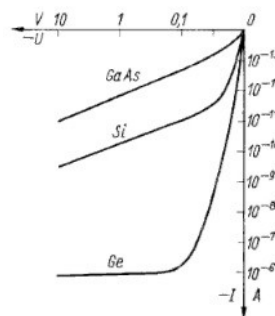
τ – czas życia nośników mniejszościowych

Dla złącza niesymetrycznego ($N_A \gg N_D$):

$$\frac{J_g}{J_s} = \frac{1}{2} \frac{N_D}{n_i} \frac{l_d}{L_p}$$

$$n_i \searrow \rightarrow J_g \nearrow$$

Marciniak, „Przyrządy półprzewodnikowe i układy scalone”



dla GaAs: $J_g > J_s$

dla Si: $J_g > J_s$

dla Ge: $J_s > J_g$

Elementy elektroniczne I – złącze P-N

14



Charakterystyka I-V złącza P-N



Przybliżenie drugie – polaryzacja w kierunku przewodzenia

– rekombinacja przeważa nad generacją.

Marciniak, „Przrządy półprzewodnikowe i układy scalone”

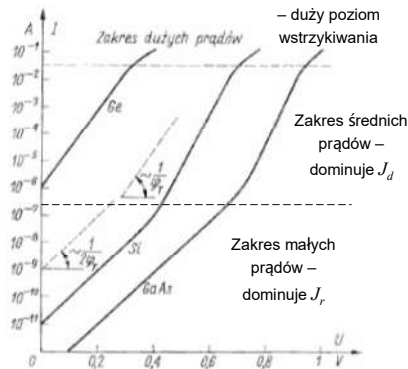
$$J_r = \frac{1}{2} q \frac{n_i}{\tau} l_d e^{U/2U_T}$$

τ – czas życia nośników mniejszościowych

Dla złącza niesymetrycznego ($N_A \gg N_D$):

$$\frac{J_r}{J_d} = \frac{1}{2} \frac{N_D}{n_i} \frac{l_d}{L_p} e^{-U/2U_T}$$

$$\text{dla } U \approx 0: \quad \frac{J_r}{J_d} \approx \frac{J_g}{J_s}$$



dla Ge: $J_d > J_r$

dla Si i GaAs: $J_r \gg J_{rGe}$

Elementy elektroniczne I – złącze P-N

15



Charakterystyka I-V złącza P-N



Przybliżenie trzecie – zakres dużych prądów

- duży poziom wstrzykiwania nośników – modulacja konduktywności półprzewodnika w obszarze bazy,
- pole elektryczne istnieje również poza obszarem zubożonym (ze względu na wzrost koncentracji nośników).

$$J \sim e^{U/2U_T}$$

Charakterystyka dla całego zakresu przewodzenia:

$$J \sim e^{U/\eta U_T} \quad \text{gdzie } 1 \leq \eta \leq 2$$

- | | | |
|---------|---------------------------|--|
| Dla Si: | – zakres małych prądów: | $\eta = 2$ (prąd rekombinacji) |
| | – zakres średnich prądów: | $\eta = 1$ (prąd dyfuzji) |
| | – zakres dużych prądów: | $\eta = 2$ (duży poziom wstrzykiwania) |

Elementy elektroniczne I – złącze P-N

16



Charakterystyka I-V złącza P-N

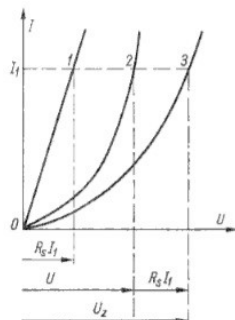


Przybliżenie czwarte – rezystancja szeregową

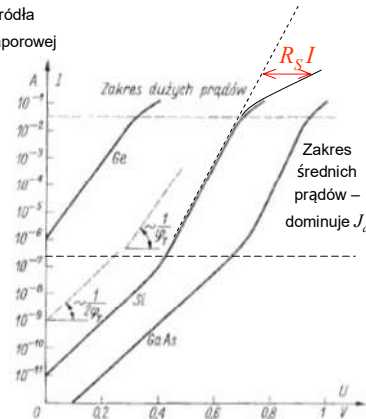
- rezystancja obszarów obojętnych oraz rezystancja styków i wyprowadzeń,
- dla dużych prądów płynących przez złącze.

$$U_Z = U + R_S I$$

E – napięcie zewnętrznego źródła
 U_Z – napięcie na warstwie zaporowej



- 1 – charakterystyka rezystancji R_S
- 2 – charakterystyka złącza idealnego (1. przybliżenie)
- 3 – charakterystyka wypadkowa



Marciniak, „Przyrządy półprzewodnikowe i układy scalone”

Elementy elektroniczne I – złącze P-N

17



Charakterystyka I-V złącza P-N



Przybliżenie piąte

- przebicie złącza,
- złącze silnie domieszkowane.

Elementy elektroniczne I – złącze P-N

18



Pomiar charakterystyki diody



Elementy elektroniczne I – złącze P-N

19



Parametry dynamiczne diody



Elementy elektroniczne I – złącze P-N

20

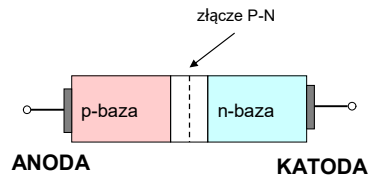


Dioda złączowa

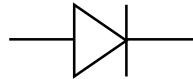


Dioda to złącze p-n zamknięte w obudowie.

Budowa diody:



Symbol diody:



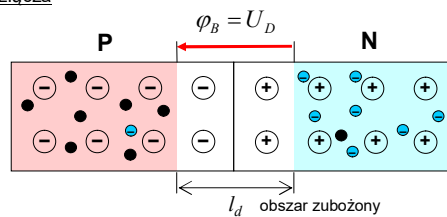
Pojemność złącza



Pojemność złączowa – powstaje w obszarze zubożonym – dominuje przy polaryzacji zaporowej złącza

Dla spolaryzowanego złącza:

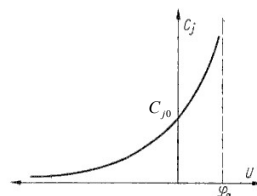
$$C_j = \frac{\epsilon_s A}{l_d} = \frac{A}{2} \sqrt{\frac{2q\epsilon_s}{(\phi_B - U) N_D + N_A}}$$



$$C_j(U) = \frac{C_{j0}}{\left(1 - \frac{U}{\phi_B}\right)^m}$$

$m = \frac{1}{2}$ – dla złączy skokowych
 $m = \frac{1}{3}$ – dla złączy liniowych

Złącze skokowe:



Dla złącza skokowego niesymetrycznego ($N_A \gg N_D$):

$$C_j = A \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_D}{2(\phi_B - U)}}$$

Pomiar pojemności złączowej pozwala określić koncentrację domieszki słabiej domieszkowanego obszaru (N_D).



Pojemność złącza



Pojemność dyfuzyjna – wynika z opóźnienia zmian napięcia względem zmian prądu – dominuje przy polaryzacji złącza w kierunku przewodzenia

$$C_d = \frac{dQ_D}{dU_D} = \tau \frac{dI_D}{dU_D} = \frac{I_D + I_0}{2U_T} \tau$$

τ – czas życia nośników mniejszościowych

$$C_d = \frac{1}{2} g_d \tau$$

$\frac{1}{2}$ – około połowa ładunku dQ_D jest usuwana w skutek przepływu prądu rozładowania (usuwanie nośników z warstwy zaporowej oraz rekombinacja)

Podsumowanie:

kierunek zaporowy

kierunek przewodzenia

$$C_j > C_d$$

$$C_j(U) = \frac{C_{j0}}{\left(1 - \frac{U}{\phi_B}\right)^m}$$

Związana jest ze zmianami ładunku w warstwie zaporowej.

$$C_d \gg C_j$$

$$C_d = \frac{1}{2} g_d \tau$$

Związana jest ze zmianami ładunku nadmiarowych nośników mniejszościowych w bazie złącza.

Elementy elektroniczne I – dioda

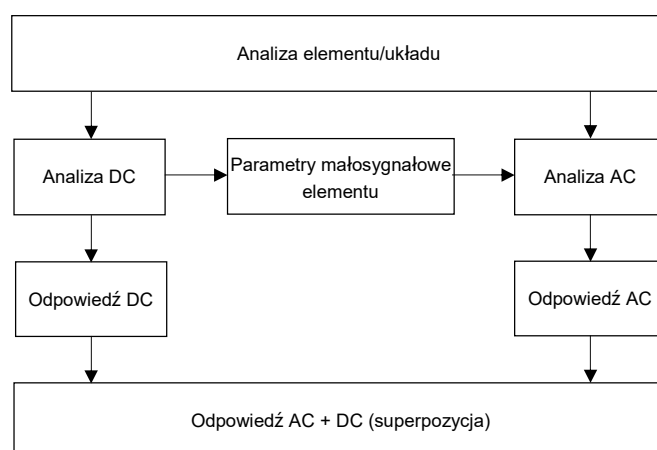
23



Modele diod



Algorytm analizy układu z elementem nieliniowym w zakresie małego sygnału.



Elementy elektroniczne I – dioda

24

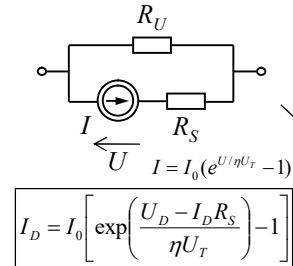


Modele diod



Modele stałoprądowe – w warunkach pracy statycznej (przy stałych lub bardzo wolno zmieniających się napięciach i prądach)

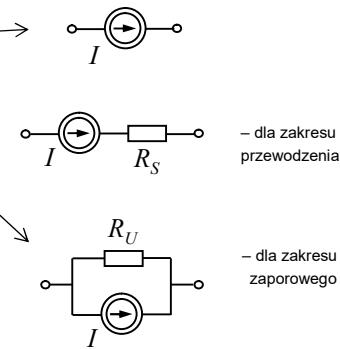
Model nieliniowy:



Modele odcinkowo-liniowe:

- idealny zawór,
- z napięciem progowym,
- z rezystancją dynamiczną,
- z przebiegiem (z/bez r_d).

Modele uproszczone:

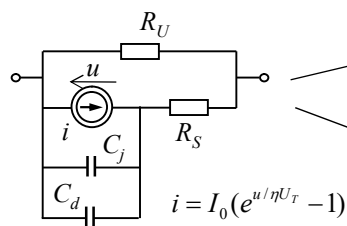


Modele diod

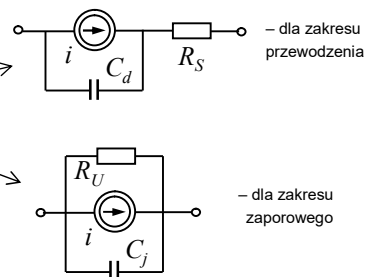


Modele zmiennoprądowe – w warunkach dynamicznych (przy szybkich zmianach napięciach)

Model nieliniowy (wielkosygnałowy):



Modele uproszczone:



Zjawiska dynamiczne są reprezentowane przez pojemności: złączową C_j i dyfuzyjną C_d .



Modele diod



Modele zmiennoprądowe – złącze spolaryzowane napięciem stałym i doprowadzony jest sygnał zmienny o małej amplitudzie:

$$U_m < \frac{kT}{q}$$

Model liniowy (małosygnałowy):

