

WYZNACZANIE STOSUNKU ŁADUNKU ELEKTRONU DO STAŁEJ BOLTZMANN

- I. Cel ćwiczenia:** wyznaczenie stosunku ładunku elektronu do stałej Boltzmann, nabycie umiejętności posługiwania się przyrządami: ultratermostatem i dzielnikiem napięcia, wykorzystanie metody graficznej (lub najmniejszych kwadratów) przy opracowywaniu ćwiczenia.
- II. Przyrządy:** ultratermostat UTM-3, woltomierz, miliamperomierz, źródło napięcia stałego (0-10V), dzielnik napięcia lub potencjometr, tranzystor mocy.
- III. Literatura:** *W. Marciniak* Przyrządy półprzewodnikowe i układy scalone, WNT 1979, W-wa.

IV. WPROWADZENIE.

1. Półprzewodniki, rodzaje przewodnictwa

Atomy w sieci krystalicznej oddziałują na siebie i struktura energetyczne kryształu jest inna niż pojedynczego atomu. Zamiast o dyskretnych poziomach energetycznych, jak w pojedynczym atomie, mówimy o pasmach energetycznych. W półprzewodniku elektrony w pewnych warunkach mogą przechodzić z niższego energetycznie pasma zwanego walencyjnym do następnego dozwolonego - pasma przewodnictwa. Tak może się stać, gdy elektrony uzyskają energię np. dzięki drganiom cieplnym sieci. Z każdym aktem takiego przejścia łączy się generacja pary elektron-dziura. Proces generacji par jest równoważony przez rekombinację elektronów i dziur. W tym tzw. półprzewodniku samoistnym, koncentracje elektronów, dziur i par elektron-dziura, są jednakowe. Elektrony w sieci podlegają statystyce Fermiego-Diraca, tzn. ich rozmieszczenie na poszczególnych poziomach energetycznych opisuje funkcja:

$$F(W) = \frac{1}{1 + \exp \frac{W - W_F}{kT}}, \quad (1)$$

gdzie W - energia poziomu,

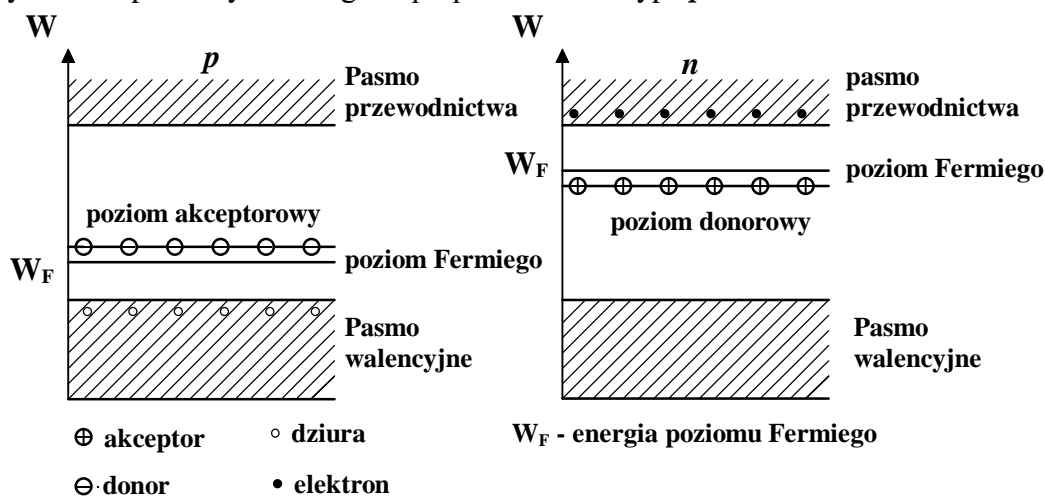
W_F - energia tzw. poziomu Fermiego, tzn. poziomu, powyżej którego liczba stanów obsadzonych jest równa liczbie stanów wolnych poniżej niego (z równania (1) wynika bezpośrednio takie określenie poziomu Fermiego, ponieważ dla $W = W_F$ mamy $F(W) = 0,5$),

k - stała Boltzmann,

T - temperatura bezwzględna.

Szeroko stosowane w technice półprzewodniki domieszkowe, otrzymuje się przez dodawanie do materiałów półprzewodnikowych odpowiednich domieszek. Jeśli np. do sieci krystalicznej 4-wartościowego krzemu (każdy atom krzemu dysponuje czterema elektronami walencyjnymi) wpro-

wadzić atomy antymonu posiadające 5 elektronów walencyjnych, to tylko cztery wiązania będą wysyczone. Bardzo słabo związany piąty elektron może być łatwo oderwany od atomu antymonu. Oderwanie tego elektronu oznacza w modelu pasmowym jego przejście do pasma przewodnictwa, stąd nazwa *domieszka donorowa* (dająca elektrony). Natomiast w węzle sieci krystalicznej pozostaje zjonizowany jednododatni atom antymonu. W półprzewodniku takim głównymi nośnikami prądu są swobodne elektrony (półprzewodnik typu *n*). Jeśli zamiast atomów 5-wartościowych wprowadzić atomy trójwartościowe np. atomy indu, to jedno z wiązań pozostaje niewysyczone i brakujący elektron może być łatwo uzupełniony po oderwaniu z sąsiedniego wiązania Si - Si. Wyrwanie elektronu z wiązania krzem - krzem i przyłączenie do czwartego brakującego wiązania ind - krzem oznacza w modelu pasmowym zabranie elektronu z pasma walencyjnego, stąd nazwa domieszki - *akceptorowa* (przyjmująca elektrony). Wówczas powstaje dziura w paśmie walencyjnym, atom indu natomiast, ulokowany w węzle sieci krystalicznej, jonizuje się jednoujemnie. Półprzewodnik taki nazywamy półprzewodnikiem typu *p*. Na rysunku 1 pokazany jest układ pasm energetycznych oraz poziomy Fermiego w półprzewodniku typu *p* i *n*.



Rys.1 Układ pasm energetycznych oraz poziomy Fermiego w półprzewodniku typu *p* i *n*.

2. Złącze p-n.

Przy zetknięciu dwu obszarów przewodnika o odmiennym typie przewodnictwa, powstaje strefa przejściowa zwana złączem *p-n*. Przez złącze mogą dyfundować nośniki nadmiarowe, tzn. elektrony z *n* do *p* i dziury z *p* do *n*. Pojawiające się w obszarze granicznym złącza pole elektryczne związane z koncentracją nośników prowadzi do zahamowania dyfuzji. Natomiast ruch generowanych termicznie w pobliżu złącza nośników mniejszościowych - elektronów w obszarze *p* i dziur w obszarze *n* jest wspomagany przez pole elektryczne w złączu (pole bariery potencjału). Wynika stąd, że prądy mniejszościowe zależą od temperatury (nie zależą natomiast od wysokości bariery potencjału). Rysunek 2 pokazuje przebieg potencjału i rozkład nośników w obszarze złącza niespolaryzowanego.

Wiedząc, że całkowity prąd dyfuzyjny nośników większościowych $I_d = I_{pd} + I_{nd}$, (I_{pd} , I_{nd} - prądy dyfuzyjne nośników większościowych) oraz rozwiązując odpowiednie równania dyfuzji, otrzymujemy

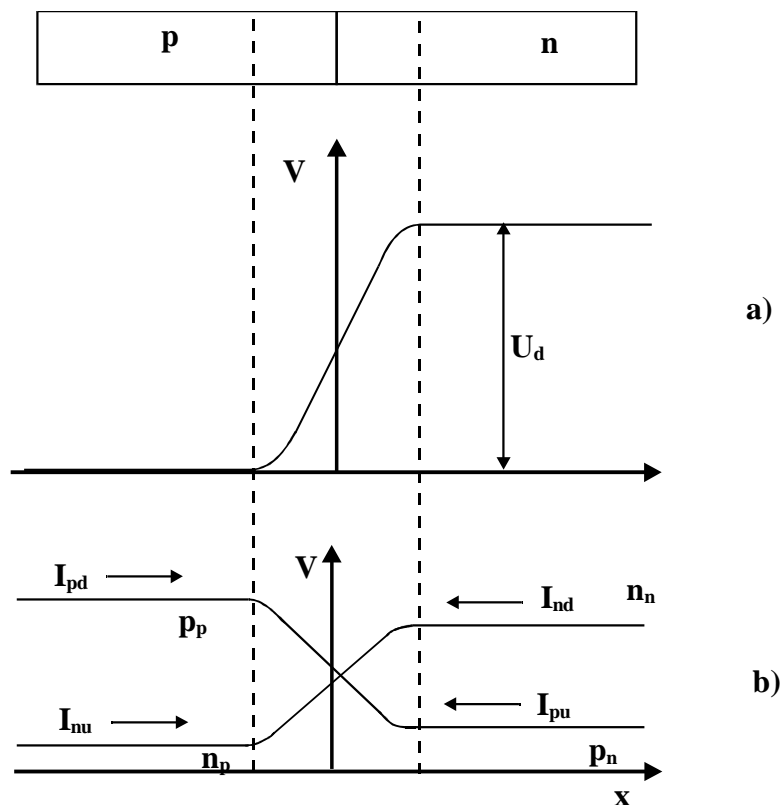
$$I_d = A \cdot e \frac{e(U_d - U_z)}{kT} \quad (2)$$

W warunkach równowagi (napięcie polaryzacji zewnętrznej U_z jest równe zero) prąd unoszenia zwany też inaczej prądem generacji cieplnej $I_u = I_{pu} + I_{nu}$ jest równy prądowi dyfuzyjnemu (I_{pu} , I_{nu} odpowiednie prądy mniejszościowe generacji cieplnej)

$$I_u = I_d = A \cdot e^{-\frac{eU_d}{kT}}. \quad (3)$$

Z ostatniej zależności wynika, że $A = I_u \cdot e^{\frac{eU_d}{kT}}$, a zatem wzór (2) przyjmie postać:

$$I_d = I_u \cdot e^{\frac{eU_d}{kT}}. \quad (4)$$



Rys.2. Kształt bariery potencjału **a)** oraz rozkład koncentracji nośników w obszarze złącza **b)**.

p_p, p_n - koncentracje dziur w obszarze **p** i **n**;

n_n, n_p - koncentracje elektronów w obszarze **n** i **p**;

$I_{pd}, I_{nd}, I_{pu}, I_{nu}$ - prądy dyfuzyjne (d) i generacji cieplnej (u).

Uwzględniając, że całkowity prąd I przepływający przez złącze jest równy różnicy prądu dyfuzyjnego i prądu unoszenia otrzymuje się:

$$I = I_d - I_u = I_u \cdot (e^{\frac{eU_z}{kT}} - 1). \quad (5)$$

Prąd unoszenia (generacji cieplnej) płynący przez złącze nie zależy od U_z , $I_u(U_z) = \text{const.}$ (zależy jednak od temperatury - patrz wzór 3).

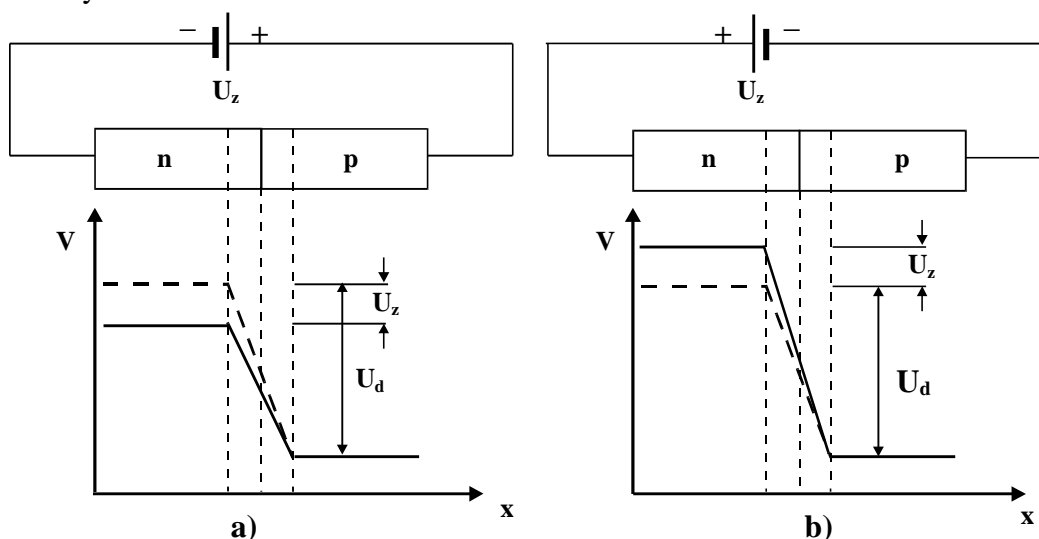
Dla napięcia U_z przyłożonego w kierunku przewodzenia złącza można przyjąć, że

$$I = I_u \cdot e^{\frac{eU_z}{kT}}. \quad (5a)$$

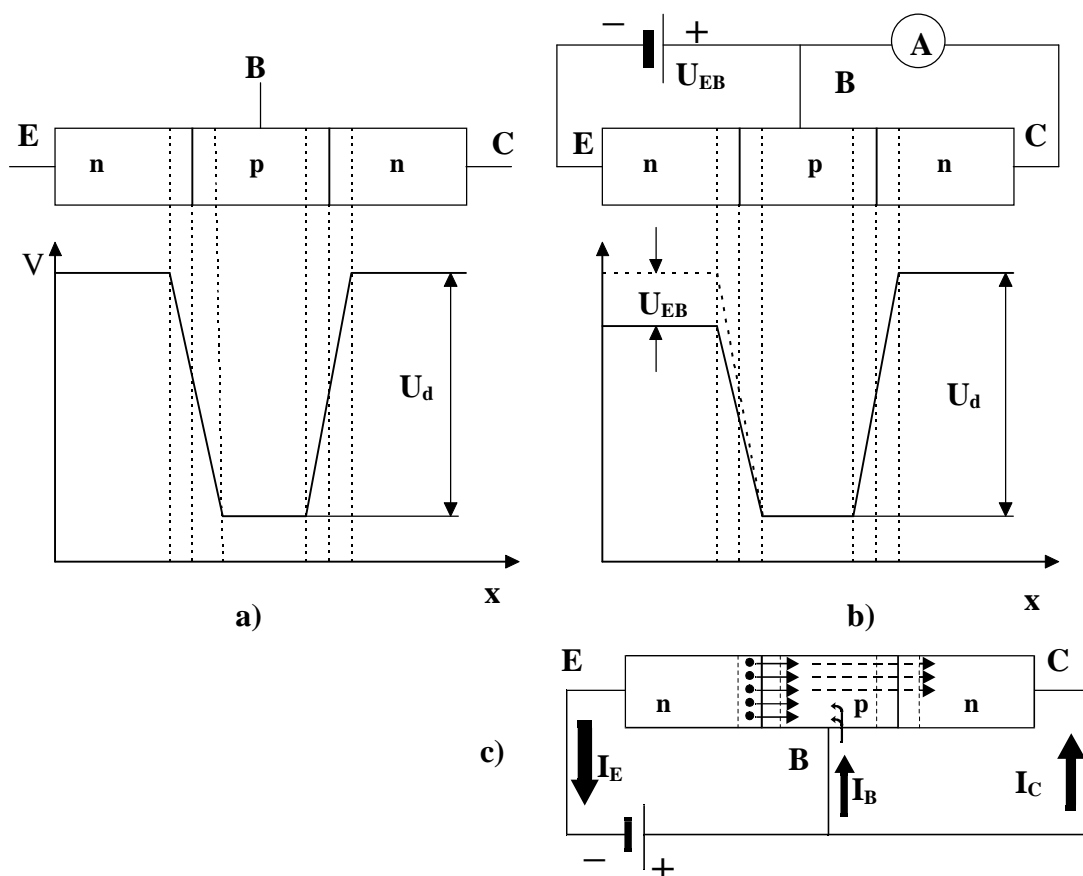
Dla złącza germanowego wzór (5a) jest słuszny w całym zakresie napięć U_z . W przypadku krzemu dla napięć $U_z < 0,4V$ prąd $I = \exp(eU_z/2kT)$, po czym charakterystyka przyjmuje kształt typowy dla prądu dyfuzji czyli dany zależnością (5a).

3. Tranzystor warstwowy.

Tranzystor warstwowy powstaje przez połączenie trzech odcinków półprzewodnika **p-n-p** lub **n-p-n** (emiter-baza-kolektor), czyli jest to układ dwu złącz **pn-np** lub **np-pn**. Rozkład potencjału w obszarze środkowym w warunkach równowagi, dla przypadku tranzystora **n-p-n** przedstawia rysunek 4a.



Rys.3. Przebieg potencjału złącza **n-p**, do którego przyłożono napięcie zewnętrzne w kierunku przewodzenia a) i w kierunku zaporowym b).



Rys.4. Rozkład potencjału w obszarze środkowym w warunkach równowagi dla tranzystora **n-p-n** a); rozkład potencjału w tranzystorze, gdy złącze **EB** spolaryzowane jest w kierunku przewodzenia b); rozpyły prądów w tak spolaryzowanym tranzystorze c).

Doprowadzając odpowiednie napięcia pomiędzy poszczególne elektrody (E, B, C), można regulować przepływ prądu w tranzystorze. W układzie z rys. 4b i 4c złącze EB spolaryzowane jest w kierunku przewodzenia, złącze BC jest niespolaryzowane. Grubymi ciemnymi liniami zaznaczono prądy I_E , I_B , I_C zgodnie z konwencją przyjętą w elektrotechnice (czyli przeciwnie do ruchu elektronów). W sytuacji $U_{CB} = 0$ tj dla zwarcia kolektora z bazą nośniki wstrzykiwane z emitera do bazy mogą być odbierane przez kolektor, gdyż mimo braku zewnętrznego napięcia U_{CB} istnieje napięcie dyfuzyjne U_d w warstwie zaporowej złącza BC, czyli jest w niej pole elektryczne wymiatające elektrony z bazy do kolektora. Dlatego $I_C \neq 0$. Prąd kolektora I_C będzie zależał głównie od nośników większościowych dyfundujących przez złącze EB w obszar kolektora.

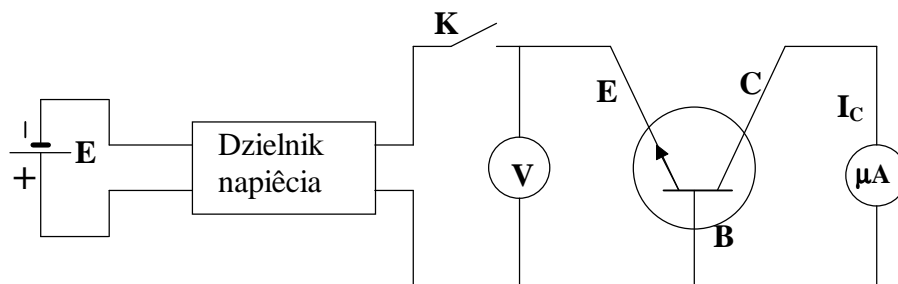
V. ZASADA POMIARU.

Dla większości tranzystorów krzemowych pracujących w układzie przedstawionym na rys.4b i 4c zależność pomiędzy prądem kolektora I_C i napięciem U_{EB} jest w dużym zakresie prądów I_C dana zależnością

$$I_C = I_o \cdot e^{\frac{eU_{EB}}{kT}} \quad (6)$$

Jedynie dla $U_{EB} < 0,4V$, zgodnie z tym co podano w paragrafie IV.2, należy oczekiwać odstępstwa od zależności (6). Wobec tego mierząc zależność prądu kolektora I_C od napięcia złącza emiter-baza $I_C = I_C(U_{EB})$ można wyznaczyć stosunek ładunku elektronu do stałej Boltzmanna e/k . Dla ustalonej temperatury prąd $I_o = \text{const}$. Ze zmianą temperatury zmienia się prąd I_o (I_o jest prądem unoszenia I_u z zależności 5a).

VI. UKŁAD POMIAROWY.



Rys.5. Schemat układu pomiarowego.

Badany tranzystor jest tranzystorem mocy, co zapewnia stabilność temperaturową złącza w czasie pracy. Tranzystor umieszczony jest w kąpeli olejowej w ultratermostacie.

UWAGA ! Wskazania termometru sterującego należy kontrolować przy pomocy termometru umieszczonego w naczyniu z olejem.

VII. POMIARY.

Zbadać zależność prądu kolektora od napięcia pomiędzy bazą i emiterem dla trzech różnych ustalonych temperatur złącza (np. 300 K, 330 K, 350 K). Napięcie U_{EB} zmieniać od 0V do ok. 0,6V tak, aby moc wydzielana w złączu nie przekraczała 1 mW.

VIII. OPRACOWANIE.

Wykreślić zależność $I_C = I_C(U_{EB})$ we współrzędnych $x = U_{EB}$, $y = \ln I_C$. Wyznaczyć graficznie (lub metodą najmniejszych kwadratów) stosunek e/k dla każdej serii pomiarów. Ocenić lub obliczyć błędy. Porównać otrzymaną wartość średnią z wynikiem tablicowym.