

Ćwiczenie 123

Ćwiczenie 123. Dioda półprzewodnikowa

Cel ćwiczenia

Poznanie własności warstwowych złącz półprzewodnikowych typu $p-n$. Wyznaczenie i analiza charakterystyk stałoprądowych dla różnych typów diod.

Wprowadzenie

Nośnikami prądu w półprzewodnikach są elektrony i dodatnio naładowane kwazicząstki zwane *dziurami*. W półprzewodniku samoistnym (bez domieszek obcych atomów) koncentracje elektronów n i dziur p są równe (ćw. 122).

Prawie wszystkie zastosowania półprzewodników wymagają zastosowania domieszek, modyfikujących własności elektronowe materiału wyjściowego. Fizyka związanych z tym zjawisk jest bardzo bogata – tekst wprowadzenia przedstawia tylko wybrane elementy teorii, potrzebne do interpretacji wyników pomiarów. Efektem bogactwa zjawisk jest ilość i różnorodność zastosowań w elektronice.

Domieszkowanie półprzewodników

Donorem nazywamy atom domieszki, która „dostarcza” do półprzewodnika dodatkowe elektrony. Typową domieszką donorową w krzemie (grupa IV układu okresowego) jest fosfor (grupa V), którego atomy posiadają jeden elektron walencyjny więcej niż krzem. Domieszki akceptorowe to z kolei atomy mające jeden elektron walencyjny mniej (np. bor w krzemie).

W wyniku domieszkowania donorowego powstaje półprzewodnik typu n . Koncentracja donorów N_d , np. 10^{14} atomów w cm^3 , wybiera się tak by była znacznie większa niż koncentracja samoistnej (tabela 1 w ćw. 122). W tych warunkach koncentracja elektronów jest bliska koncentracji atomów donorowych,

$$n \cong N_d . \quad (1)$$

Elektrony te nazywamy nośnikami większościowymi.

Ponieważ iloczyn np koncentracji elektronów i dziur jest dla danego półprzewodnika w ustalonej temperaturze wielkością stałą, zatem koncentracja dziur wynosi (wzór (1b) w opisie ćw. 122)

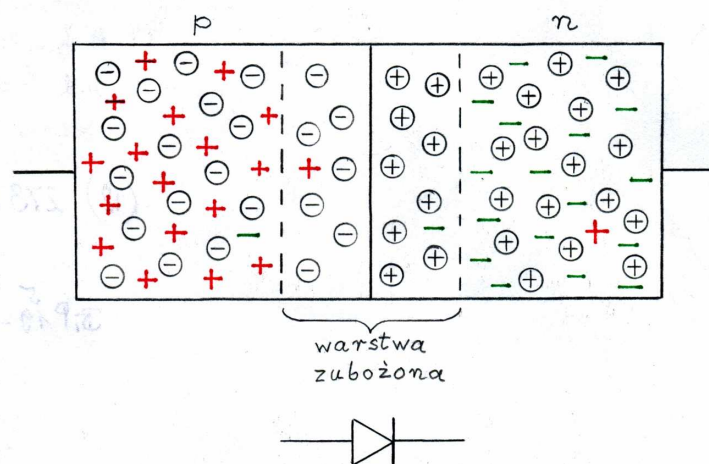
$$p = \sqrt{A} T^{3/2} e^{-E_g/(2k_B T)} . \quad (2)$$

Nazywamy je nośnikami mniejszościowymi, bo jest ich koncentracja jest o rzędy wielkości mniejsza niż elektronów.

Akceptorem jest atom domieszki, która „odbiera” z pama walencyjnego jeden elektron. W przypadku krzemu jest to np. atom boru lub innego pierwiastka grupy III. Akceptory wytwarzają dziury w paśmie walencyjnym, które teraz są pełnią rolę nośników większościowych. Nośnikami mniejszościowymi są elektrony.

Złącze p-n.

Złącze p-n wyobrazić sobie można jako połączenie półprzewodnika typu n i typu p (rys. 1). W rzeczywistości złącze wytwarzane jest w pojedynczym kawałku półprzewodnikowego kryształu, do którego przy pomocy określonych technologii wprowadza się domieszki donorowe i akceptorowe. Ponadto wytwarza się dwa metalowe kontakty, umożliwiające przepływ prądu przez złącze. Element elektroniczny wykorzystujący pojedyncze złącze nazywamy *diodą półprzewodnikową*. Na rys. 1 pokazano też symbol diody prostowniczej.



Rys. 1. Obraz mikroskopowy złącza p-n. Symbole \oplus oraz \ominus oznaczają atomy donorów i akceptorów, symbole $-$ oraz $+$, odpowiednio, elektrony i dziury. Poniżej odpowiadający symbol diody

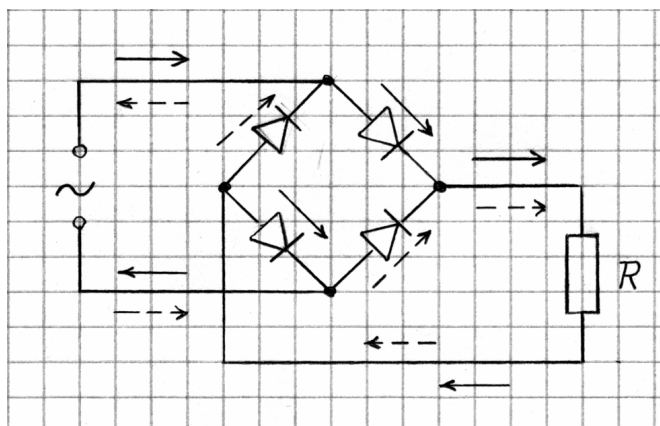
Zasadniczą właściwością złącza jest nieliniowa charakterystyka prądowo napięciowa $I(U)$. Złącze łatwo przewodzi w kierunku przewodzenia, i trudno - w kierunku zaporowym. Zrozumienie i matematyczny opis złącza p-n można przedstawić na różnych stopniach zaawansowania, od najbardziej elementarnego do zagadnień, które wciąż są tematem badań naukowych.

Najprostsze, jakościowe wytłumaczenie jest następujące. W przypadku napięcia przyłożonego tak, że (+) znajduje się po stronie p, a (-) po stronie n, powstanie pole elektryczne popychające większościowe dziury z obszaru p w prawo, a analogiczne większościowe elektrony w kierunku przeciwnym. To kierunek przewodzenia, z dużą wartością prądu. Kierunek przewodzenia pokazuje trójkąt symbolu diody.

Gdy napięcie przyłożymy przeciwnie, wtedy przez powierzchnię złącza mogą płynąć tylko nośniki mniejszościowe, których jest bardzo mało. W konsekwencji, płynący prąd będzie znikomo mały. Mówimy, że napięcie zostało przyłożone w kierunku zaporowym.

Prostownicze własności diody mogą być wykorzystane do przekształcenia prądu przemiennego na stały. Rys. 2 pokazuje używany w tym celu układ Graetza, który znajdziemy w zasilaczu prawie każdego urządzenia elektronicznego. Strzałki na tym rysunku pokazują drogę przepływu prądu dla obydwu okresów napięcia przemiennego. Kierunek przepływu prądu przez opór R jest ten sam.

Z przedstawionego uproszczonego obrazu można by wydedukować charakterystykę „diody idealnej” (rys. 2), która w kierunku przewodzenia przepuszczała by dowolny prąd bez spadku napięcia, natomiast w kierunku zaporowym prąd byłby równy zero. (przebieg „a” na rys. 2). Taka modelowa charakterystyka jest jest niekiedy rozpatrywana w elektronice, ale jak zobaczymy, jest sprzeczna z prawami fizyki, zatem nigdy nie będzie zrealizowana.



Rys. 2. Układ Graetza do prostowania prądu przemiennego na jednokierunkowy. Strzałki ---> oraz → pokazują przepływu prądu w obwodzie dla różnej chwilowej polaryzacji napięcia przemiennego.

Model dyfuzyjny złącza p-n. Wzór Shockleya.

Model dyfuzyjny [1], [2] jest najprostszym realistycznym modelem złącza. Bierze pod uwagę fakt, że elektrony i dziury zachowują się jak gazy o średniej energii kinetycznej $(3/2)k_B T$. Efektem ich ruchu termicznego jest, że mogą dyfundować z obszaru o większej koncentracji do mniejszej. Dyfundujące przez powierzchnię złącza np. większościowe elektrony rekombinują z większościami dziurami po jego drugiej stronie. W efekcie po obu stronach złącza pojawia się *obszar zubożony* (pokazany na rys. 1), w którym koncentracja i dziur i elektronów staje się bardzo mała.

Obszar zubożony jest, paradoksalnie, naładowany elektrycznie – źródłem ładunku są zjonizowane atomy donorów i akceptorów. Zgodnie z prawami elektrostatyki ładunek ten wytworzy (i) pole elektryczne w obszarze warstwy zubożonej, oraz (ii) barierę potencjału V między obszarami p i n. Pozostałe objętości półprzewodnika tworzą *obszar neutralny*, w którym algebraiczna suma ładunków nośników i zjonizowanych domieszek jest równa zero.

Złącze bez przyłożonego zewnętrznego napięcia osiąga stan równowagi, w którym przez powierzchnię złącza płyną dwa przeciwnie skierowane prądy. Dla ustalenia uwagi rozpatrzmy prądy elektronowe. Strumień większościowych elektronów, które przechodzą z obszaru n tworzy *prąd dyfuzyjny* I_d . Dyfuzyjny, gdyż – podobnie jak strumień molekuł w zjawisku dyfuzji w gazach – strumień elektronów i dziur płynie od obszarów o wyższej do niższej ich koncentracji. Ilościową zależność prądu dyfuzji od wysokości bariery potencjału określa czynnik wynikający z rozkładu Boltzmanna

$$I_d \propto \exp\left(\frac{eU}{kT}\right). \quad (3)$$

stała C_d jest proporcjonalna do koncentracji większościowych elektronów.

Przechodzeniu większościowych nośników ładunku przez złącze $p-n$ towarzyszy przechodzenie nośników mniejszościowych, przy czym ich strumień jest skierowany przeciwnie i tworzy *prąd dryfu* I_s . Prądem dryfu, gdyż nośniki mniejszościowe płyną („dryfują”) popychane przez pole elektryczne bariery. Jego wartość jest stała (nie zależy od przyłożonego napięcia) i proporcjonalna do kwadratu koncentracji nośników mniejszościowych

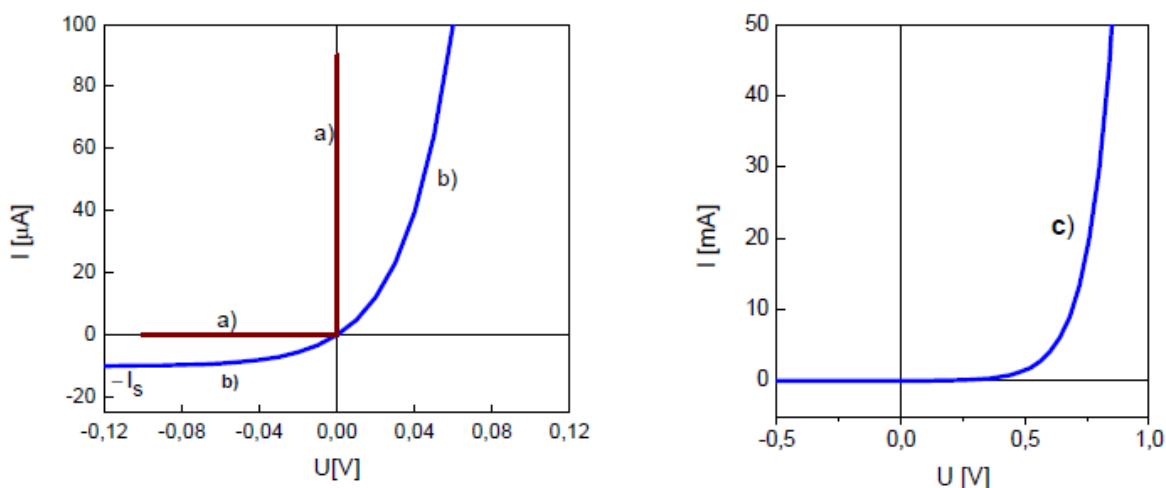
$$I_s = C e^{-E_g/(k_B T)}. \quad (4)$$

Przyłożenie zewnętrznego napięcia w kierunku przewodzenia obniża barierę potencjału do wartości $V - U$. Powoduje to wzrost prądu dyfuzji o czynnik $\exp[U/(k_B T)]$. Prąd dryfu pozostaje ten sam. Zsumowanie obydwu prądów prowadzi do teoretycznego wzoru na charakterystykę prądowo-napięciową złącza

$$I(U) = I_s [e^{eU/(k_B T)} - 1] \quad (5)$$

zwanego wzorem Shockleya.

Gdy zewnętrzne napięcie przyłożone jest w kierunku zaporowym ($U < 0$ i $e^{eU/(k_B T)} \approx 0$) ze wzoru Shockleya dostajemy $I \approx -I_s$. Wzrost napięcia powoduje tylko powiększenie szerokości warstwy zubożonej, proporcjonalne do $(V - U)^{1/2}$.



Rys. 3. Charakterystyki teoretyczne: a) „dioda idealna” (sprzeczna z zasadami fizyki), b) charakterystyka obliczona ze wzoru Shockleya, przyjmując $I_s = 10 \mu A$ i $T = 300 K$, c) ta sama charakterystyka pokazana w większym przedziale prądów i napięć.

W podręczniku Feynmana [3] przedstawiona jest analiza wymaganego prostownika mechanicznego, nie mającego nic wspólnego z fizyką półprzewodników. Wynikiem analizy jest wzór, który jest odpowiednikiem wzoru (5). Można wysunąć stąd hipotezę, że wzór Shockleya wyraża najlepszą charakterystykę, jaka jest dopuszczalna przez ogólne zasady termodynamiki statystycznej. W szczególności prawa fizyki nie dopuszczają możliwości zbudowania „diody idealnej” pokazanej jako przebieg (a) na rys. 3. Jest tak dlatego, że przy pomocy takiej diody można „wyprostować” napięcie szumów termicznych a zatem zbudować perpetuum mobile drugiego rodzaju.

Charakterystyki diod rzeczywistych mogą być tylko gorsze od wyrażonej wzorem (5). W kierunku przewodzenia charakterystyka $I(U)$ narasta wolniej, niż to opisuje wzór (5), w kierunku zaporowym – prąd wsteczny jest większy od I_s i nie jest stały, lecz rośnie ze wzrostem napięcia wstecznego. Poniżej opiszemy osobno rzeczywiste charakterystyki diod dla obydwu polaryzacji złącza.

Charakterystyka rzeczywista w kierunku przewodzenia. Dioda świecąca.

Uważa się, że własności diod w kierunku przewodzenia dla niezbyt dużych prądów dobrze opisuje fenomenologiczny wzór

$$I(U) = I_s e^{eU/(mk_B T)} \quad (6)$$

W porównaniu do wzoru Shockleya mamy dwie zmiany:

- (i) składnik -1 został pominięty, gdyż dla kierunku przewodzenia jest znacznie większy od wyrazu eksponencjalnego,
- (ii) w mianowniku wzoru (6) pojawia się czynnik nieidealności m , który jest bezwymiarową liczbą większą od jedności (zawycząj $1 < m < 2$).

W celu sprawdzenia, czy charakterystyka empiryczna spełnia zależność (6) wykonujemy wykres zlogarytmowany

$$\ln I(U) = \ln I_s + \frac{e}{mk_B T} U \quad (7)$$

Zależność $\ln I$ od napięcia U winna być prostą. Z wartości współczynnika nachylenia

$a = \frac{e}{mk_B T}$ prostej można obliczyć współczynnik nieidealności jako

$$m = \frac{1}{aU_T}, \quad (8)$$

gdzie $U_T = k_B T/e$ jest stałą nazywaną *napięciem termicznym* (dla $T = 300$ K wartość $U_T = 26$ mV). Składnik stały $b = \ln I_s$ równania prostej pozwala obliczyć $I_s = e^b$.

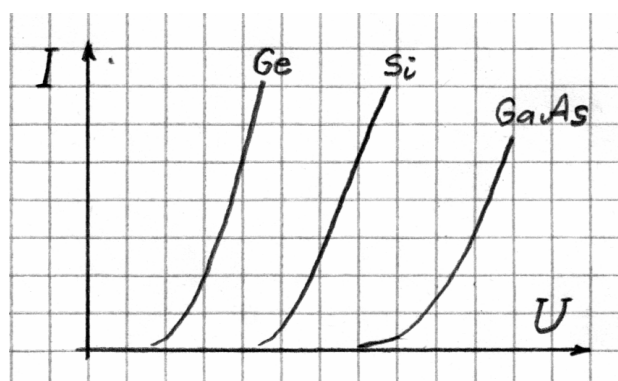
Charakterystyki diod w kierunku przewodzenia zależą od wielkości przerwy energetycznej. Im jest większa, tym większy jest spadek napięcia potrzebny do uzyskania zadanej wartości prądu I . Kombinacja wzorów (4) i (6) daje (przyjęto $m = 1$ we wzorze (6))

$$I(U) = C e^{(U-U_g)/U_T}, \quad (9)$$

gdzie $U_g = E_g/e$.

W celu zbadania zależności charakterystyki diod od rodzaju półprzewodnika można posłużyć się diodami prostowniczymi Si i Ge oraz diodami świeącymi. *Dioda świecąca*, (ang. LED – *light emitting diode*) to nic innego jak złącze p-n spolaryzowane w kierunku przewodzenia. Płynące przez diodę dziury i elektrony rekombinują – elektron z pasma przewodnictwa przeskakuje, by zapełnić dziurę w paśmie walencyjnym. W przypadku gdy rekombinacja jest promienista – energia przeskoku idzie na wytworzenie fotonu, o energii zbliżonej do szerokości przerwy. Ponieważ energie kwantów światła widzialnego zawierają się w przedziale od 1,6 eV (czerwień) do 3,2 eV (fiolet), więc dla wytworzenia światła potrzebne są półprzewodniki o takiej samej wartości szerokości przerwy. (Z arsenku galu GaAs ($E_g = 1,4$ eV) produkuje się diody świeące w bliskiej podczerwieni. Dla Ge i Si

wydajność rekombinacji promienistej jest znikomo mała – energia wyzwolona przy zniknięciu elektronu i dziury idzie wyłącznie na wytworzenie ciepła.)



Rys. 4. Charakterystyki w kierunku przewodzenia dla diod wykonanych z półprzewodników o różnych wartościach szerokości przerwy.

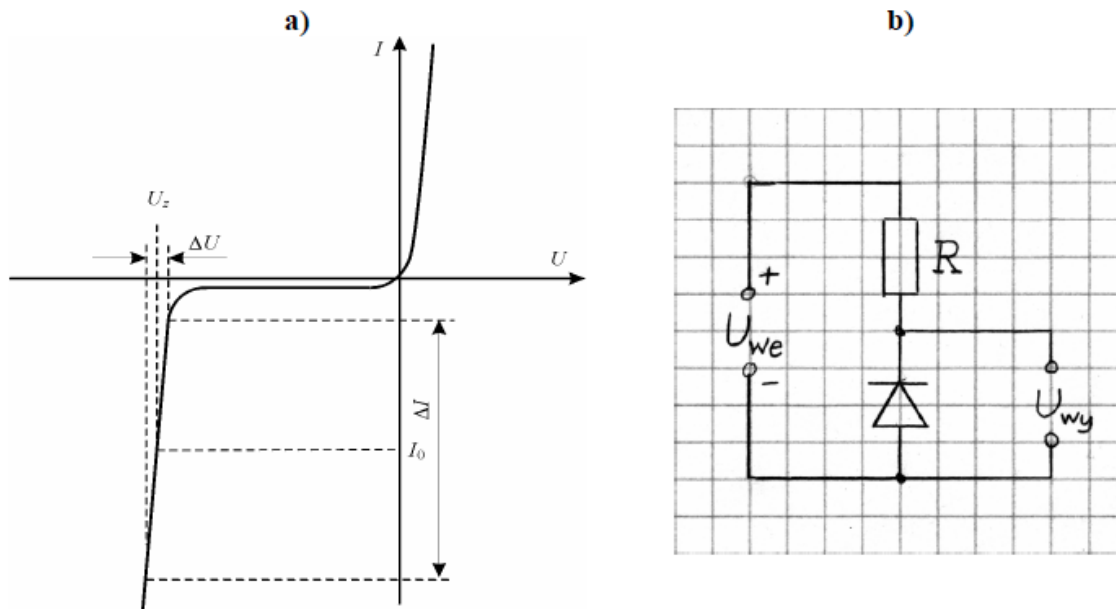
Charakterystyka rzeczywista w kierunku zaporowym. Dioda stabilizująca.

Dioda germanowa spolaryzowana w kierunku zaporowym zachowuje się, przynajmniej w przybliżeniu, jak to przewiduje wzór Shockleya. Wartość prądu wstecznego dla napięć mniejszych od $-0,1$ V jest (i) w przybliżeniu stała, oraz (ii) zbliżona do wartości I_s , jaki można uzyskać z danych dla kierunku przewodzenia (dopasowanie przy użyciu wzoru (7)).

Dla krzemu i półprzewodników o jeszcze większej szerokości przerwy wartość I_s uzyskana z dopasowania dla kierunku przewodzenia jest niezmiernie mała. Fakt ten jest zgodny z przewidywanym przez teorię szybkim spadkiem koncentracji nośników mniejszościowych. Mierzony eksperymentalnie prąd wsteczny, choć niewielki, jest dużo większy od I_s i zależy od napięcia wstecznego.

Bardzo ważną własnością złącz krzemowych spolaryzowanych napięciem w kierunku zaporowym, po przekroczeniu pewnej jego wartości progowej, jest znaczny wzrost natężenia prądu wstecznego przy małych zmianach przyrostu napięcia polaryzacji zaporowej. Własność ta występuje w przypadku złącz złożonych z obszarów o dużej koncentracji domieszek akceptorowych i donorowych. W takich złączach w cieniwej warstwie **zubożonej** istnieje silne pole elektryczne o natężeniu powyżej 10^8 V/m. Powyższa sytuacja umożliwia tunelowe przejścia elektronów z obszaru p do n , tworząc dodatkową składową prądu wstecznego. Zjawisko to jest nazwane zjawiskiem Zenera. Innym zjawiskiem powodującym również wzrost prądu wstecznego jest zderzeniowa generacja par: elektron – dziura, analogiczna do jonizacji lawinowej w gazie. Każde z tych zjawisk powoduje w diodach o odpowiedniej konstrukcji gwałtowny wzrost prądu wstecznego po przekroczeniu pewnego progowego napięcia. Jest to tzw. prąd przebicia złącza mogący doprowadzić do jego zniszczenia. Natężenie tego prądu można ograniczyć do wartości bezpiecznej w obwodzie zewnętrznym zasilania. Powyższą właściwość złącza powszechnie wykorzystuje się dla celów stabilizacji napięcia.

Charakterystykę typowej diody stabilizującej przedstawiono na rysunku 4a. Stabilizujące działanie takiej diody (rys. 1b) **wynika z faktu**, że dużym zmianom natężenia prądu na odpowiedniej części charakterystyki towarzyszą niewielkie zmiany napięcia. Dla diody stabilizującej definiuje się oporność statyczną R i oporność dynamiczną r



Rys. 4. Dioda stabilizująca: a) charakterystyka, b) najprostszy układ stabilizacji napięcia

$$R = \frac{U_z}{I_0}, \quad r = \frac{\Delta U}{\Delta I} \quad (10)$$

(znaczenie użytych symboli wyjaśnia rysunek 4a) oraz współczynnik stabilizacji Z .

Współczynnik stabilizacji jest określony jako stosunek względnej zmiany napięcia do względnej zmiany prądu. Można go też określić jako iloraz oporności dynamicznej do oporności statycznej

$$Z = \frac{r}{R}. \quad (11)$$

Oprócz omówionych diod prostowniczych, świecących i stabilizujących można wymienić około dwudziestu innych rodzajów diod posiadających własne nazwy. Diodami lub układami diod są też urządzenia, w którym słowo „dioda” nie występuje, takie jak laser półprzewodnikowy (źródło światła w ćw. 61), element Peltiera (ćw. 133), ogniwo słoneczne (ćw. 134) czy półprzewodnikowy detektor promieniowania. Złącza p-n znajdziemy także w bardziej złożonych strukturach półprzewodnikowych, od pojedynczych tranzystorów do układów scalonych liczących współcześnie miliony elementów w jednym kawałku półprzewodnika. W szczególności *tranzystor bipolarny* to struktura warstwowa typu p-n-p albo n-p-n. O występowaniu złącz w tranzystorze bipolarnym można się przekonać, mierząc charakterystykę $I(U)$ między końcówkami emiter-baza lub baza-kolektor. W obu przypadkach będzie to typowa charakterystyka złącza p-n.

Literatura

- [1] C. Kittel, *Fizyka ciała stałego*. Warszawa, PWN 1998
- [2] W. Marciniak, *Przyrządy półprzewodnikowe i układy scalone*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1984
- J. Koprowski, *Podstawowe przyrządy półprzewodnikowe*, Skrypt AGH, SU 1711
- [3] R.P. Feynman, *Feynmana wykłady z fizyki*, t. III, Warszawa, PWN 1974