

10. BADANIE CHARAKTERYSTYK DIOD PÓLPRZEWODNIKOWYCH

10.1. Złącza p-n o małej koncentracji domieszek

Przewodnictwo elektryczne σ metali w temperaturze pokojowej, posiada wartości w przedziale $10^5 - 10^2 (\Omega \text{ cm})^{-1}$, półprzewodników $10^2 - 10^{-10} (\Omega \text{ cm})^{-1}$, zaś dobrych izolatorów $10^{-10} - 10^{-22} (\Omega \text{ cm})^{-1}$. Istotna różnica między metalami z jednej strony i grupą półprzewodników, a także izolatorów z drugiej strony, wyraża się w zależności temperaturowej przewodnictwa. Przewodnictwo metali maleje wraz ze wzrostem temperatury, półprzewodników natomiast - rośnie.

W kwantowej teorii ciała stałego różnice te objaśnić można różną strukturą widma energetycznego elektronów walencyjnych. Widmo to jest pasmowe. Pasma energii dozwolonych są przedzielone obszarami wzbronionych energii elektronów. W półprzewodnikach najwyższe pasmo energii dozwolonych, w których znajdują się elektrony, jest w temperaturze $T = 0^\circ\text{K}$ całkowicie obsadzone. Nosi ono nazwę pasma podstawowego lub walencyjnego, kolejne w górę pasmo energii dozwolonych nosi nazwę pasma przewodnictwa. Szerokość E_g obszaru energii wzbronionych, zwanego inaczej przerwą energetyczną jest wielkością charakterystyczną dla danego półprzewodnika i wynosi od ułamka do (2 - 3) eV.

W półprzewodnikach samoistnych, czyli bez domieszek, szerokość przerwy energetycznej E_g warunkuje wielkość ich przewodnictwa elektrycznego σ . W temperaturze $T > 0^\circ\text{K}$, $\sigma \sim e^{-\frac{E_g}{2kT}}$. Poziom Fermiego E_F w takich półprzewodnikach przebiega w środku przerwy energetycznej (rys. 10.1a).

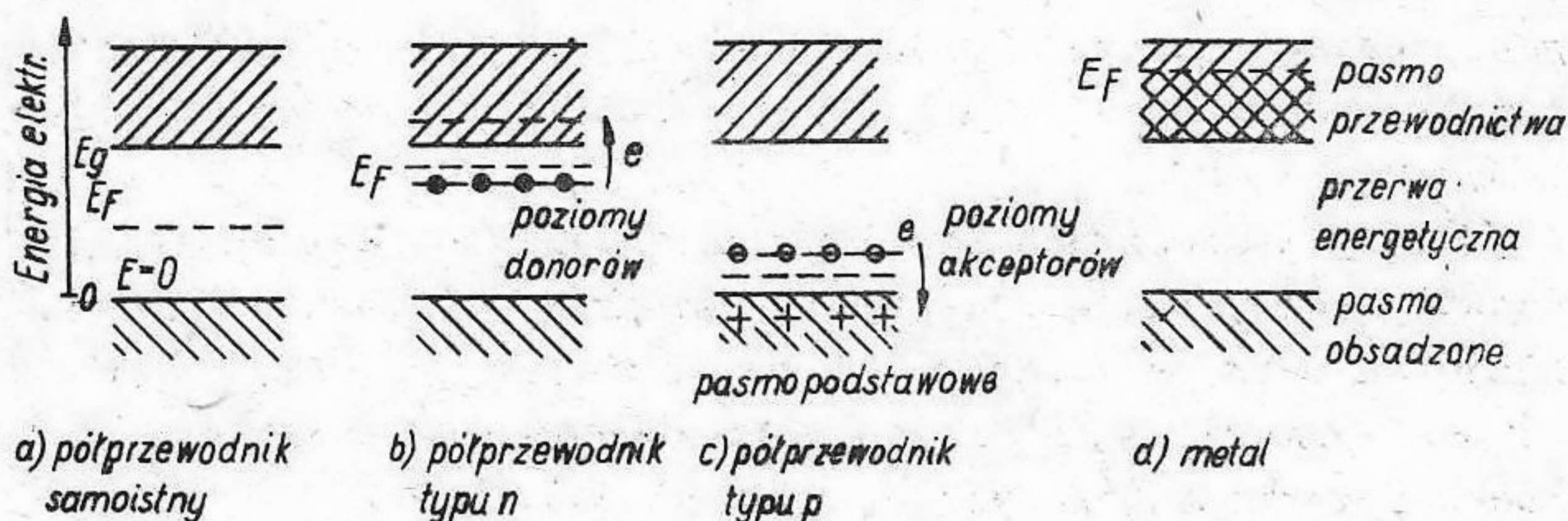
W metalach najwyższe pasmo energii dozwolonych, w którym znajdują się elektrony jest tylko częściowo obsadzone, nawet w temperaturze $T = 0^\circ\text{K}$ - poziom Fermiego E_F przebiega w paśmie przewodnictwa (rys. 10.1d). Przewodnictwo metali maleje ze wzrostem temperatury

$$\sigma \sim [1 + \alpha(T - 273)]^{-1},$$

gdzie α - temperaturowy współczynnik oporu elektrycznego.

Przewodnictwo półprzewodników można w istotny sposób zwiększyć przez wprowadzenie określonych domieszek. Tak na przykład wprowadzenie domieszek w postaci ułamka procentu pierwiastka grupy V układu okresowego do kryształu macierzystego pierwiastka grupy IV, zwiększa silnie jego przewodnictwo elektronowe (w paśmie przewodnictwa) - półprzewodnik typu n. Natomiast wprowadzenie do takiego kryształu domieszki pierwiastka grupy III-iej - zwiększa silnie jego przewodnictwo dziurowe (w paśmie walencyjnym) - półprzewodnik typu p. Poziomy lokalne (domieszkowe) dostarczające elektronów do pasma przewodnictwa, zwane poziomami donorowymi, położone są w półprzewodniku typu n w pobliżu dna pasma przewodnictwa (w odległości $\sim 10^{-2}$ eV). Poziom Fermiego E_F przebiega między dnem pasma przewodnictwa a poziomami lokalnymi (rys.10.1b).

Poziomy lokalne, na które są wychwytywane elektrony z pasma podstawowego, zwane poziomami donorowymi, znajdują się w półprzewodniku typu p tuż nad górnym brzegiem pasma podstawowego. Nieco niżej, ale ponad poziomem podstawowym, przebiega poziom Fermiego E_F (rys.10.1c).



Rys.10.1. Modele pasmowe: a) półprzewodnika samoistnego, b) półprzewodnika typu "n", c) półprzewodnika typu "p", d) metalu. E_F - oznacza energię poziomu Fermiego, E_g - szerokość przerwy energetycznej (pasma wzbronionego)

Koncentracja elektronów (w temperaturze $T \gg 0^\circ\text{K}$) w paśmie przewodnictwa półprzewodnika typu n jest duża, półprzewod-

nika typu p - mała. Natomiast koncentracja dziur w paśmie podstawowym półprzewodnika typu p jest duże, półprzewodnika typu n - małe. Dlatego też po zetknięciu próbki typu n i p (tego samego półprzewodnika) elektrony dyfundują z próbki typu n do próbki typu p, a dziury z próbki typu p do próbki typu n. Prąd odpowiadający temu ruchowi (nośników większościowych) nosi nazwę prądu dyfuzyjnego J_D . W wyniku tego procesu w pobliżu granicy złącza zanikają swobodne nośniki, a pozostają jedynie nieruchome jony sieci krystalicznej półprzewodnika - ujemne po stronie półprzewodnika p i dodatnie po stronie półprzewodnika n (rys.10.2). Tworzą one dipolowy ładunek przestrzenny złącza (rys.10.2b), który warunkuje powstanie napięcia dyfuzyjnego U_D ze znakiem "+" po stronie strefy n. Wskutek tego średnia energia elektronów w tej strefie zmniejsza się w porównaniu ze średnią energią w strefie p. Układ pasm energetycznych tej strefy przesunie się w dół tak, że poziomy Fermiego w obu półprzewodnikach wyrównują się (rys. 10.2e). Tworzy się w ten sposób w obszarze złącza tzw. bariera potencjału dyfuzyjnego.

Charakter przebiegu potencjału tej bariery i odpowiadającego mu pola elektrycznego ilustruje odpowiednio rys.10.2c i 10.2d.

Wysokość bariery potencjału określa w przybliżeniu zależność

$$U_D = AT \ln \frac{p_p}{p_n}$$

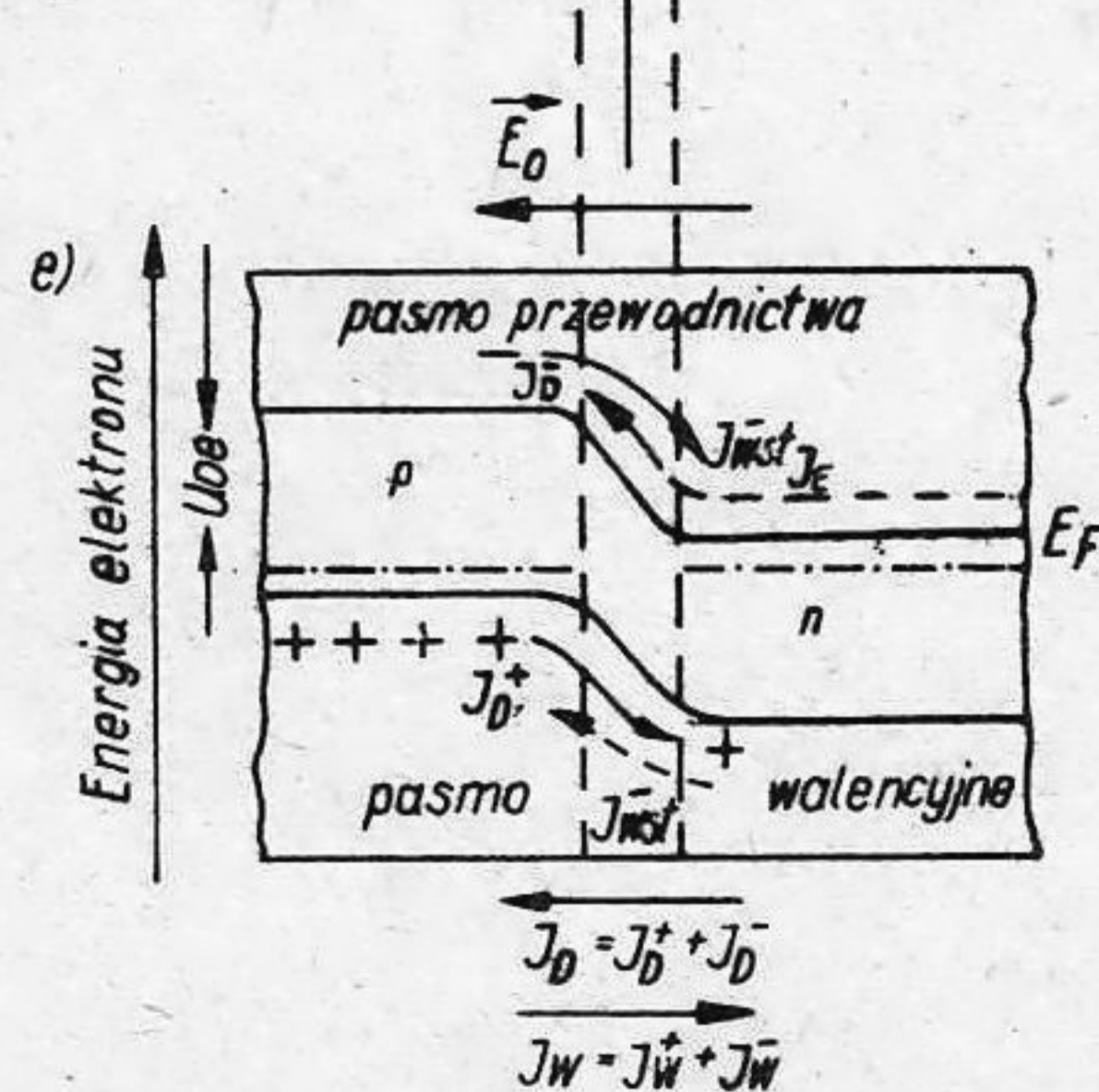
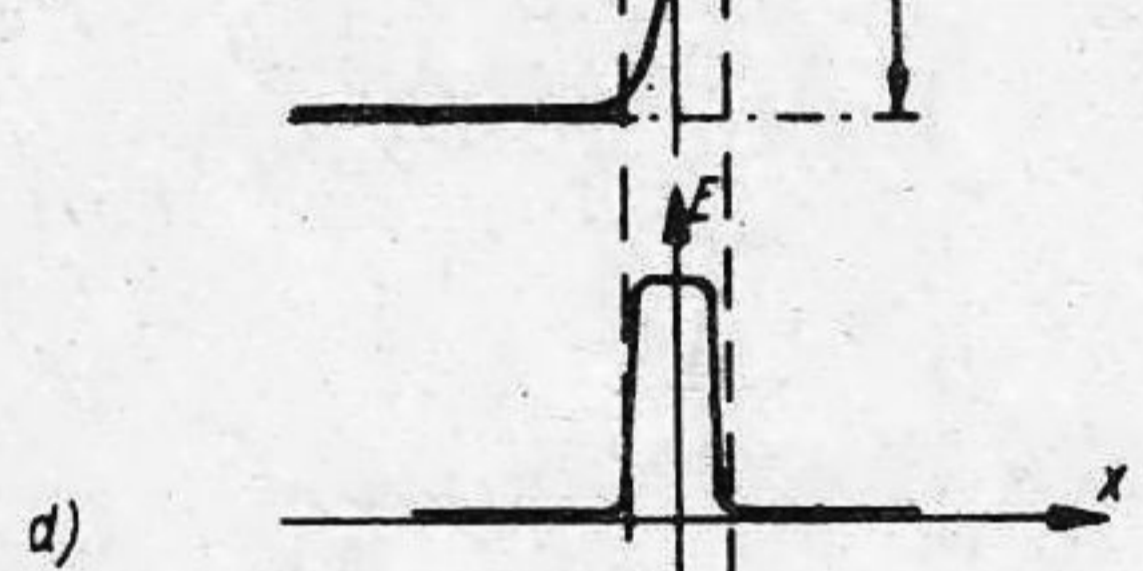
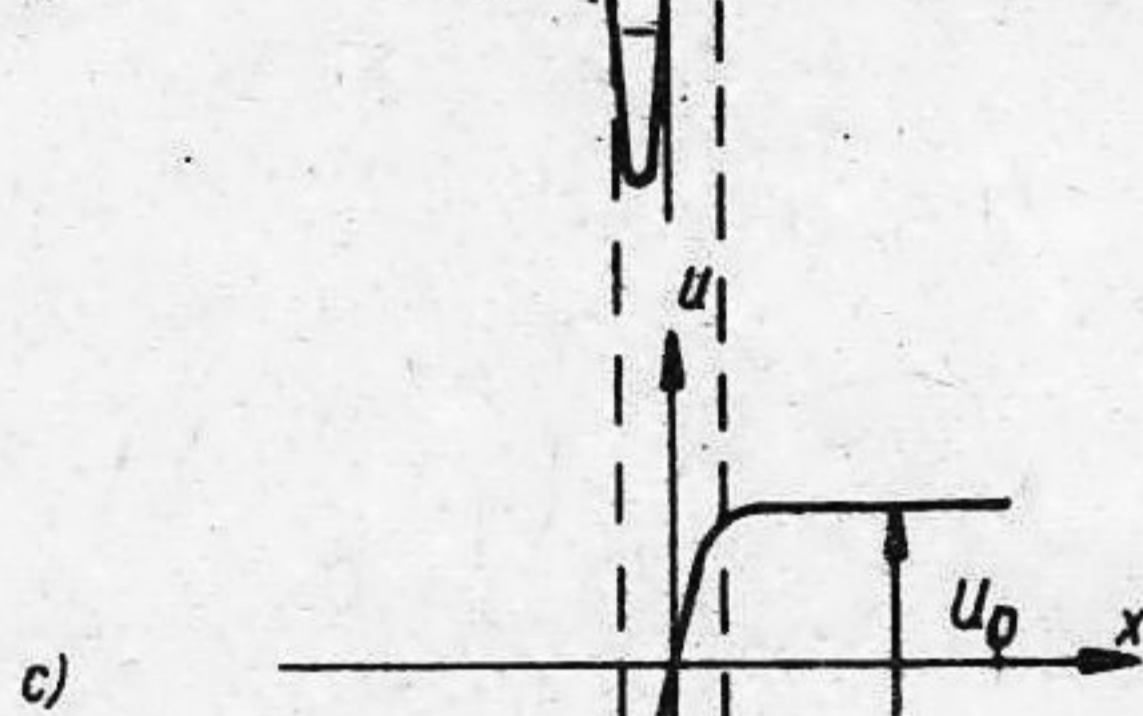
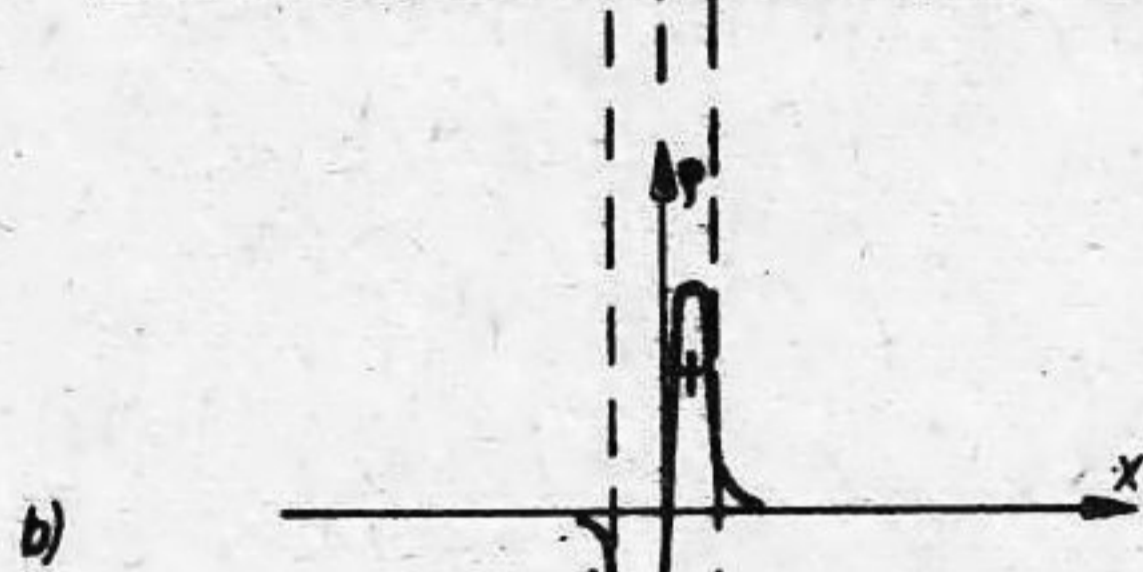
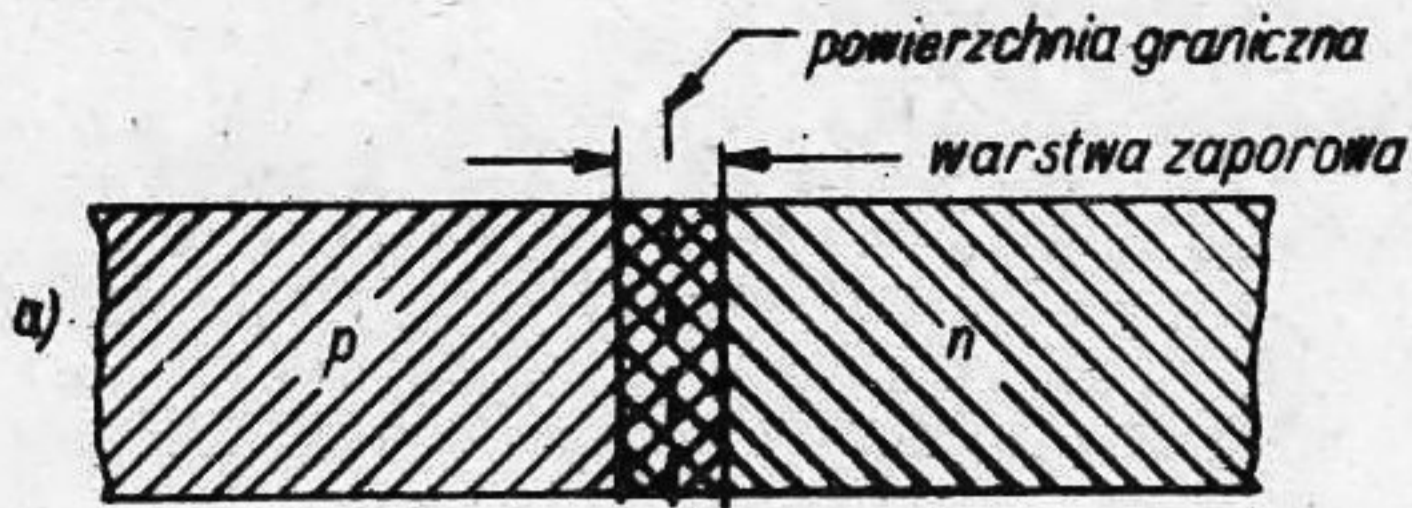
lub

$$U_D = AT \ln \frac{n_n}{n_p} \quad (1)$$

gdzie: A - pewna stała
T - temperatura złącza
 p_p i p_n - koncentracja dziur odpowiednio w półprzewodniku p i n.
 n_p i n_n - koncentracja elektronów odpowiednio w półprzewodniku p i n.

Pole elektryczne złącza przeciwdziała dyfuzji nośników większościowych, sprzyja natomiast przepływowi przez złącze

nośników mniejszościowych w kierunku przeciwnym do kierunku ruchu dyfuzyjnego nośników większościowych. Prąd ładunków



mniejszościowych nosi nazwę prądu wstecznego lub prądu polowego I_W . W stanie

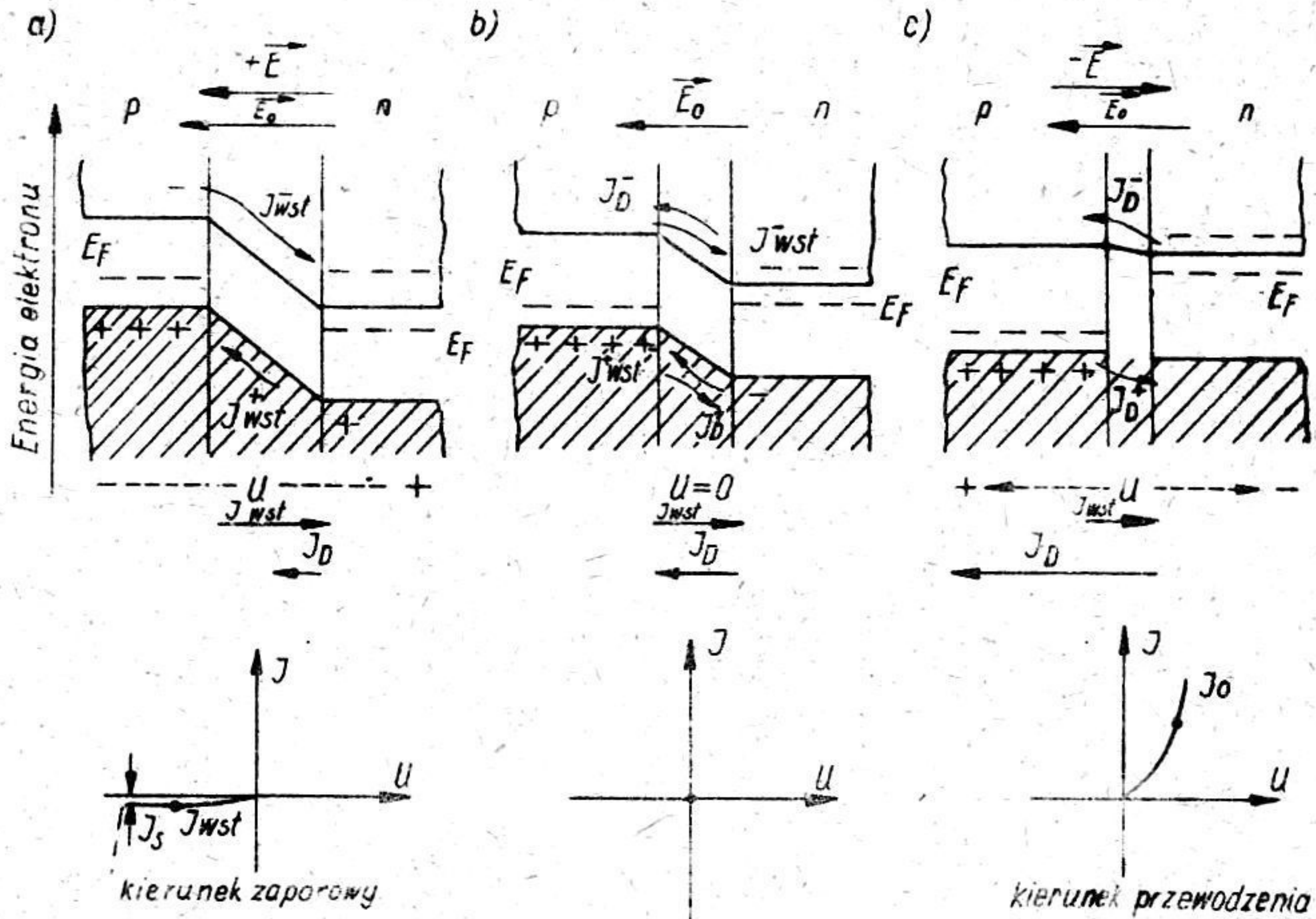
równowagi natężenia prądu I_D i I_W są sobie równe, to znaczy $I_D + I_W = 0$.

Obszar złącza pozbawiony swobodnych nośników nosi nazwę warstwy zaporowej.

Jeżeli do złącza przyłożymy zewnętrzne napięcie w ten sposób, że wytworzone przez nie pole \vec{E} będzie miało zgodny kierunek z kierunkiem pola wewnętrznego \vec{E}_0 złącza (kierunek zaporowy), nastąpi dalszy odpływ swobodnych nośników z obszaru otaczającego warstwę zaporową - zwiększy się jej

Rys.10.2. Złącze "p-n" w stanie równowagi termodynamicznej. a) model złącza, b) rozkład gęstości ładunku przestrzennego, c) rozkład napięcia w stosunku do powierzchni granicznej, d) rozkład pola elektrycznego, e) model pasmowy złącza "p-n" oraz kierunek przepływu ładunków mniejszościowych I_{wst}^- i I_{wst}^+ , i dyfuzja ładunków większościowych I_D^+ i I_D^-

szerokość, wzrośnie więc jeszcze bardziej opór wewnętrzny złącza. Przyrost szerokości warstwy zaporowej jest wprost proporcjonalny do kwadratu przyłożonego napięcia.

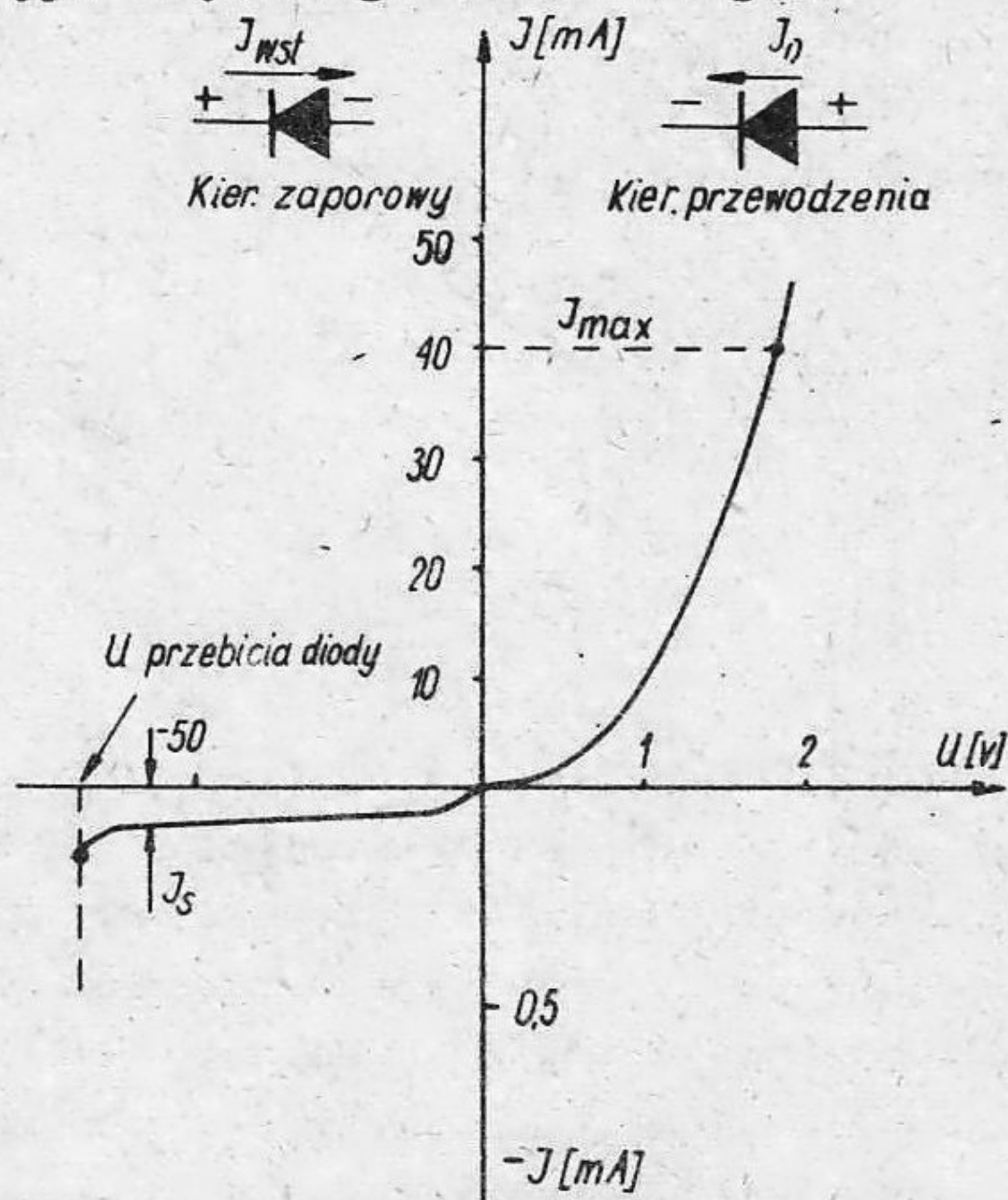


Rys. 10.3. Model pasmowy złącza "p-n", rozkład prądów I_D i I_{wst} płynących przez złącze, zależność prądu wypadkowego $I = I_D + I_{wst}$ w zależności od wartości przyłożonego napięcia zewnętrznego: a) złącze spolaryzowane w kierunku zaporowym, b) złącze w warunkach równowagi termodynamicznej, c) złącze spolaryzowane w kierunku przewodzenia

Na schemacie pasm energetycznych oznacza to wzrost wysokości bariery potencjału dla ładunków większościowych - maleje przy tym I_D (rys. 10.3a). Bariera ta nie stanowi przeszkody dla przepływu prądu wstecznego. Jest on jednak niewielki ($10^{-6} - 10^{-7}$) A i nieznacznie zależy od wartości przyłożonego napięcia (dla napięć mniejszych od napięcia przebicia złącza). Uzależniony jest głównie od temperatury złącza (ilości nośników większościowych) i technologii jego wytwarzania. Oznacza

to, że opór złącza p-n spolaryzowanego w kierunku zaporowym jest duży. Jeżeli napięcie zewnętrzne będzie miało polaryzację przeciwną (kierunek przepustowy) zmniejszy się wypadkowe pole elektryczne w obszarze złącza, zmniejszy się więc szerokość warstwy zaporowej i wysokość bariery potencjału (rys. 10.3c). Spowoduje to znaczny wzrost prądu nośników większościowych I_D - opór złącza staje się mały.

Można wyprodukować złącza, których opór w kierunku zaporowym jest $10^3 - 10^4$ razy większy od oporu w kierunku przewodzenia. Zostały one wykorzystane do produkcji diod półprzewodnikowych typu złączowego (warstwowego).



Rys.10.4. Charakterystyka prądowo-napięciowa diody półprzewodnikowej

Charakterystyka statyczna takiej diody przedstawiona jest na rys.10.4. Przedstawia ona zależność prądu złącza od przyłożonego napięcia zewnętrznego. Z dobrym przybliżeniem zależność tę opisuje teoretycznie znaleziona funkcja

$$I = I_s \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right) \quad (2)$$

gdzie: I_s - oznacza stałą wartość natężenia prądu, uzależnioną od technologii wytwarzania złącza ($I_s = J_w^{\max}$),
 U - różnicę potencjału na końcach złącza,
 T - temperaturę złącza,
 q - ładunek elektronu,
 k - stałą Boltzmann.

10.2. Złącza p-n o dużej koncentracji domieszek

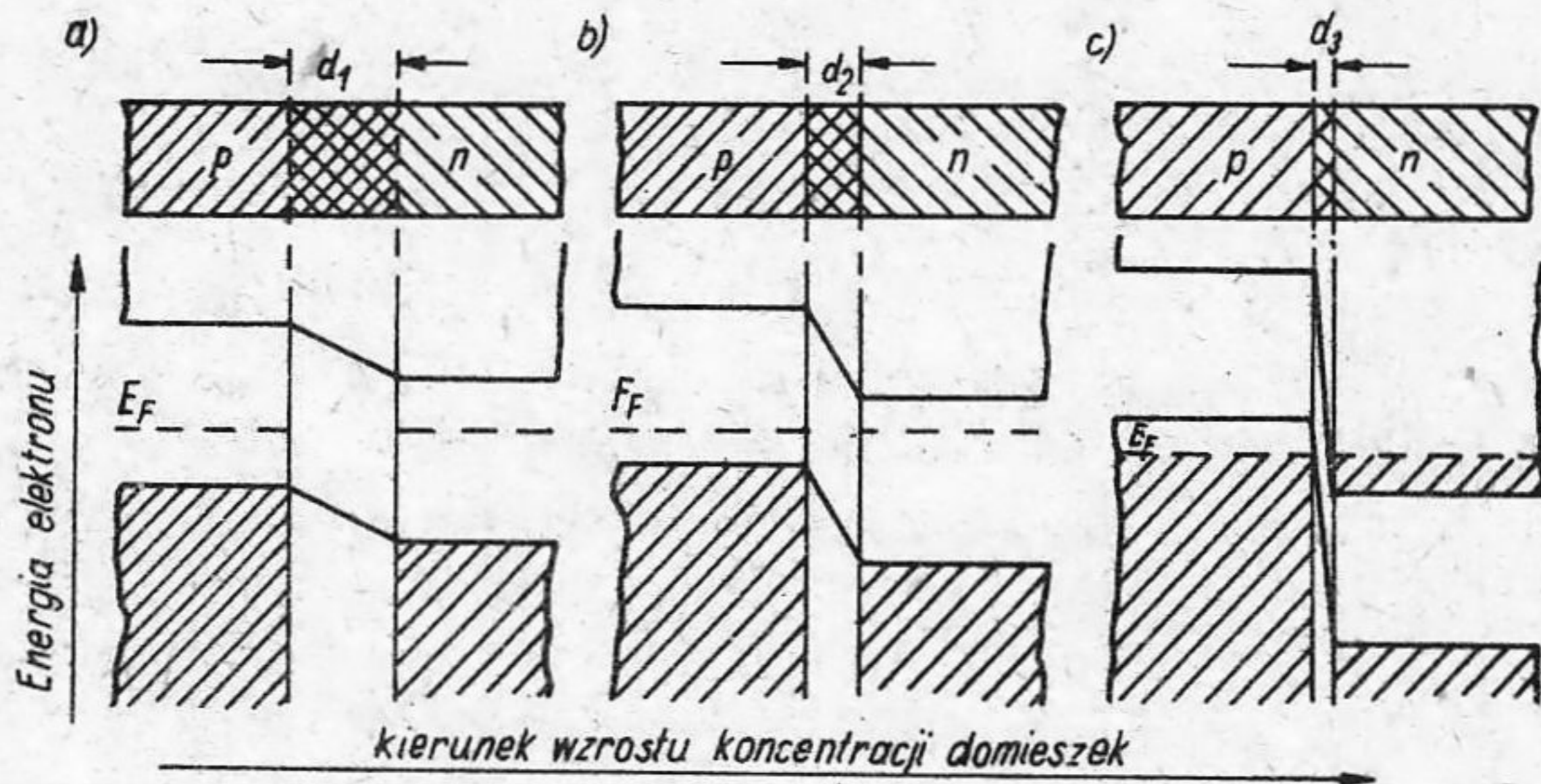
Przy jednakowej wartości napięcia doprowadzonego do różnych złącz p-n, szerokość ich warstwy zaporowej uzależniona jest od koncentracji domieszek w obszarze złącz. Ze wzrostem koncentracji domieszek zmniejsza się szerokość warstwy zaporowej w przybliżeniu wprost proporcjonalnie do kwadratu koncentracji domieszek. Wzrasta natomiast gęstość ładunku przestrzennego. Zmienia się również położenie poziomu Fermiego. W półprzewodnikach typu p zbliża się on do górnego brzegu pasma podstawowego, a w półprzewodnikach typu n - do dna pasma przewodnictwa.

Przy koncentracji domieszek przekraczającej 10^{18} at/cm³ półprzewodnik staje się zdegenerowany - poziom Fermiego przebiega w obszarze pasma przewodnictwa w półprzewodniku typu n lub - pasma podstawowego w półprzewodniku typu p. Oznacza to wzrost liczby wolnych nośników w odpowiednich pasmach.

Wzajemne położenie pasm energetycznych złącza p-n, w warunkach równowagi, przy różnych koncentracjach domieszek ilustruje rys.10.5. Ze wzrostem koncentracji górny brzeg pasma walencyjnego w półprzewodniku typu p zbliża się do dna pasma przewodnictwa półprzewodnika typu n (porównaj rys.10.5a i 10.5b). Kiedy półprzewodniki stają się zdegenerowane górny brzeg pasma podstawowego półprzewodnika typu p zostaje przesunięty wyżej niż dolny brzeg pasma przewodnictwa w półprzewodniku typu n (rys.10.5c).

Badania Zenera wykazały, że w cienkich warstwach zaporowych zachodzi efekt tunelowego przenikania swobodnych nośników przez barierę potencjału tej warstwy.

Prawdopodobieństwo tego efektu rośnie bardzo szybko ze wzrostem natężenia wewnętrznego pola bariery (tabela 1). Dla pól elektrycznych o natężeniu $E_0 \sim 10^6$ V/cm staje się ono bardzo duże. Pola tego rzędu występują w złączach, których szerokość warstwy zaporowej nie przekracza $(160-150)$ Å.



Rys.10.5. Modele pasmowe złącza "p-n" o różnej koncentracji domieszek - ilustracja zależności szerokości warstwy zaporowej złącza "p-n" od koncentracji domieszek

Efekt ten powoduje, że w złączach tych obok prądów I_D i I_W , które decydują o przewodnictwie zwykłych diod, płynie prąd Zenera I_Z , związany z tunelowym przejściem swobodnych nośników z pasma podstawowego półprzewodnika typu p na wolne poziomy w paśmie przewodnictwa półprzewodnika typu n oraz prąd Esaki I_E , związany z tunelowym przejściem (w kierunku przeciwnym) swobodnych nośników z pasma przewodnictwa półprzewodnika typu n na wolne poziomy w paśmie podstawowym półprzewodnika typu p.

W złączu niespolaryzowanym suma natężeń wszystkich tych czterech prądów jest równa zeru.

$$I_D + I_W + I_Z + I_E = 0.$$

Przebieg tych prądów, związanych jedynie z przepływem elektronów w obecności napięć polaryzujących złącze, będziemy śledzić

na wykresie pasm energetycznych złącza utworzonego z półprzewodników zdegenerowanych (rys.10.6).

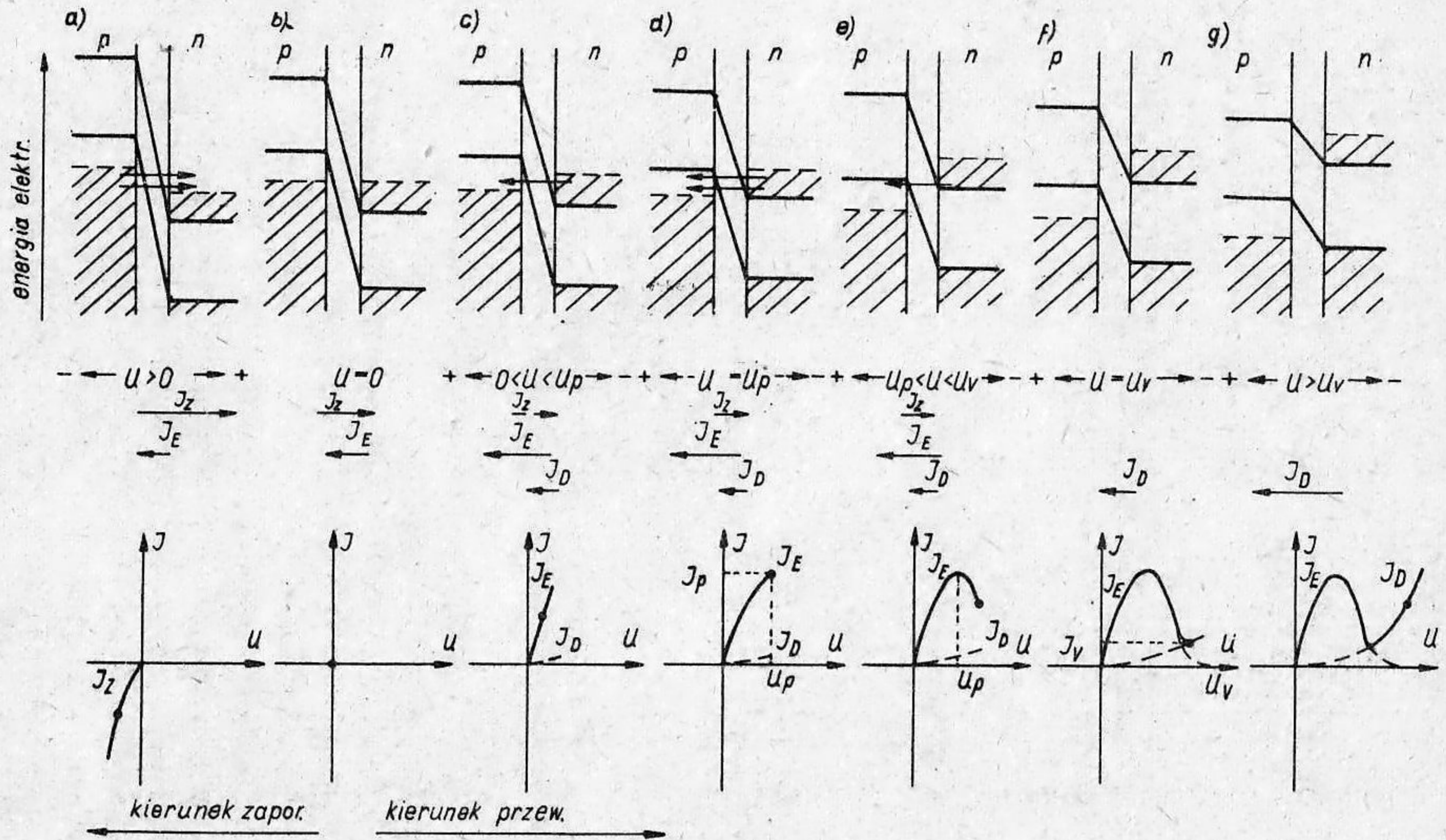
Tabela 10.1

Prawdopodobieństwo tunelowego przenikania elektronu przez barierę potencjału o wysokości 0,5 eV, w zależności od wartości natężenia pola wewnętrznego warstwy zaporowej E_0

E_0 [V/cm]	Liczba przejść na jednostkę czasu [1/sek]
10^4	10^{-100}
10^5	1
10^6	10^{12}
10^7	10^{14}

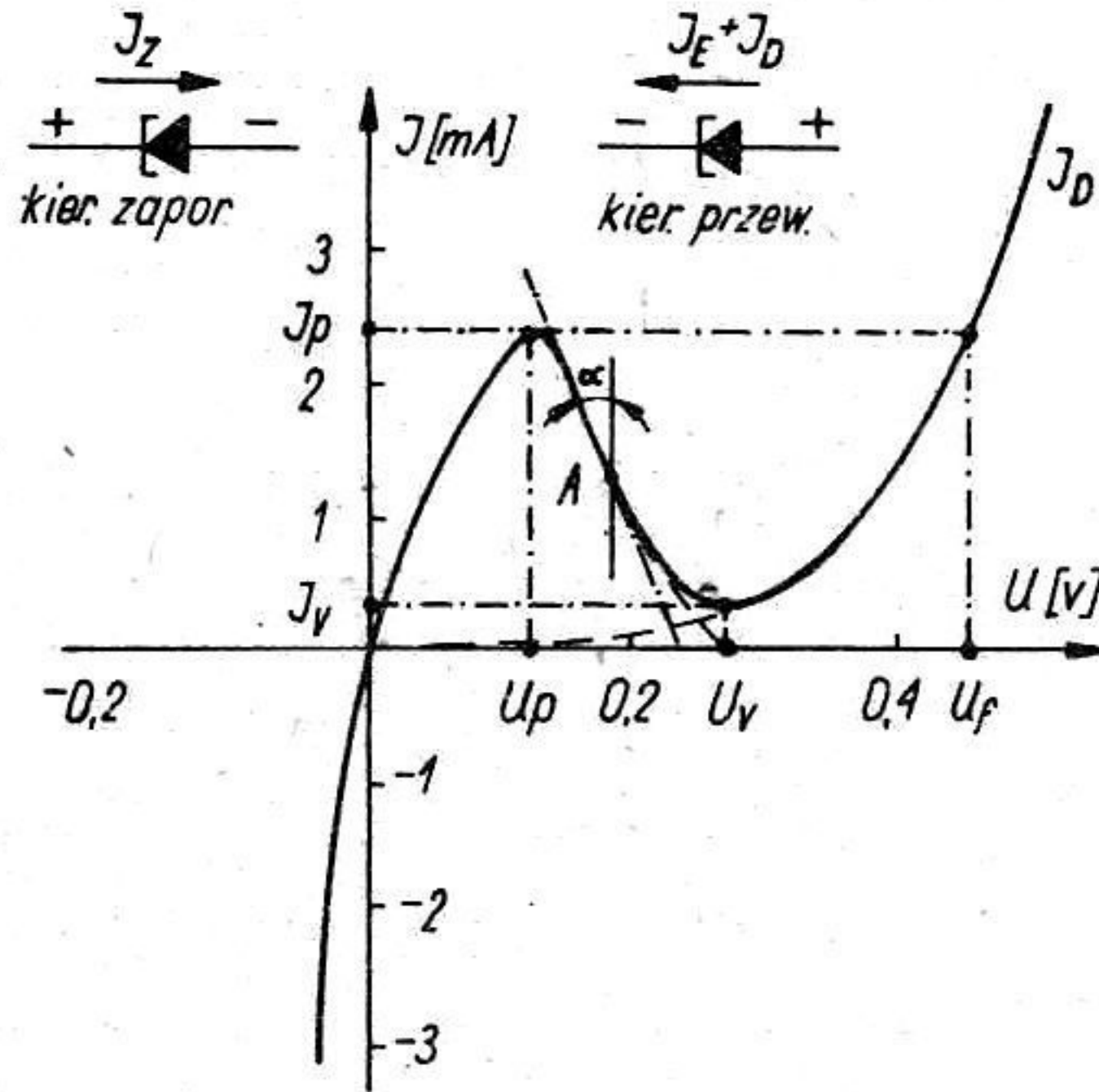
Po przyłożeniu napięcia w kierunku zaporowym, pasma przesuwają się w ten sposób, że część pasma podstawowego półprzewodnika typu p, obsadzona przez elektrony, znajdzie się naprzeciw wolnej od elektronów części pasma przewodnictwa półprzewodnika typu n (rys.10.6a); wtedy wzrośnie natężenie prądu tunelowego Zenera (przy niewielkim tylko zmniejszeniu się natężenia prądu I_E). Ponieważ wartość natężenia pola wewnętrznego w takim złączu jest duża ($10^6 - 10^7$ V/cm), nawet przy małej stosunkowo wartości napięcia wstecznego, natężenie prądu tunelowego płynącego przez złącze jest znaczne i szybko rośnie ze wzrostem przyłożonego napięcia. Wynika stąd, że w kierunku zaporowym opór złącza p-n utworzonego z półprzewodników zdegenerowanych jest mały.

Przy przyłożeniu niewielkiego napięcia w kierunku przewodzenia pasma przesuwają się w kierunku przeciwnym (rys.10.6c). Z analogicznych przyczyn jak poprzednio wzrośnie natężenie prądu tunelowego I_E . Ze wzrostem napięcia prąd ten będzie wzrastał do momentu, kiedy "przekrycie się" obsadzonej części pasma przewodnictwa półprzewodnika typu n z nieobsadzoną częścią pasma podstawowego półprzewodnika typu p będzie największe (rys.10.6d). Dalszy wzrost napięcia zewnętrznego będzie



Rys.10.6. Ilustracja przebiegu prądów w złączu "p-n" utworzonym z półprzewodników zdegenerowanych (dioda tunelowa) w zależności od wartości i kierunku napięcia polaryzującego złącze. a) Złącze spolaryzowane w kierunku zaporowym, b) złącze w warunkach równowagi termodynamicznej, c,d,e,f,g) złącze spolaryzowane w kierunku przewodzenia

zmniejszał wielkość tego przekrywania się i natężenie prądu I_E będzie malało. W końcu względne rozmieszczenie pasm złącza będzie analogiczne do rozmieszczenia pasm w zwykłym złączu z małą koncentracją domieszek (rys.10.6g); prąd tunelowy zmaleje na tyle, że przy dalszym wzroście napięcia polaryzującego przewodnictwo złącza uwarunkowane będzie prądem dyfuzyjnym (rys.10.6g).



Rys.10.7. Charakterystyka prądowo - napięciowa diody tunelowej I_p - natężenie prądu szczytu, I_v - natężenie prądu doliny $-\text{tg } \alpha = \left(\frac{dU}{dI}\right)_A = \left(R_{\text{dyn}}\right)_A$

Typowa charakterystyka prądowo-napięciowa takiego złącza nazywanego diodą tunelową, przedstawiona jest na rys.10.7. Wartości natężenia prądu diody (w kierunku przewodzenia) odpowiadające maksimum i minimum tej charakterystyki noszą nazwę prądu szczytu I_p i prądu doliny I_v , a odpowiadające im wartości napięć odpowiednio U_p , U_v i U_f . Wartość U_f , wskazuje, przy jakim napięciu polaryzacji natężenie prądu dyfuzyjnego diody jest równe natężeniu prądu tunelowego szczytu.

Charakterystyczną cechą diod tunelowych jest ujemne nachylenie charakterystyki prądowo-napięciowej, a więc ujemna wartość ich oporu wewnętrznego w zakresie napięć $U_p - U_v$.

Statyczną wartość tego oporu R_{st} wyznaczają wielkości I_p , I_v , U_p i U_v :

$$|R_{st}| = \frac{U_v - U_p}{I_p - I_v} \quad (3)$$

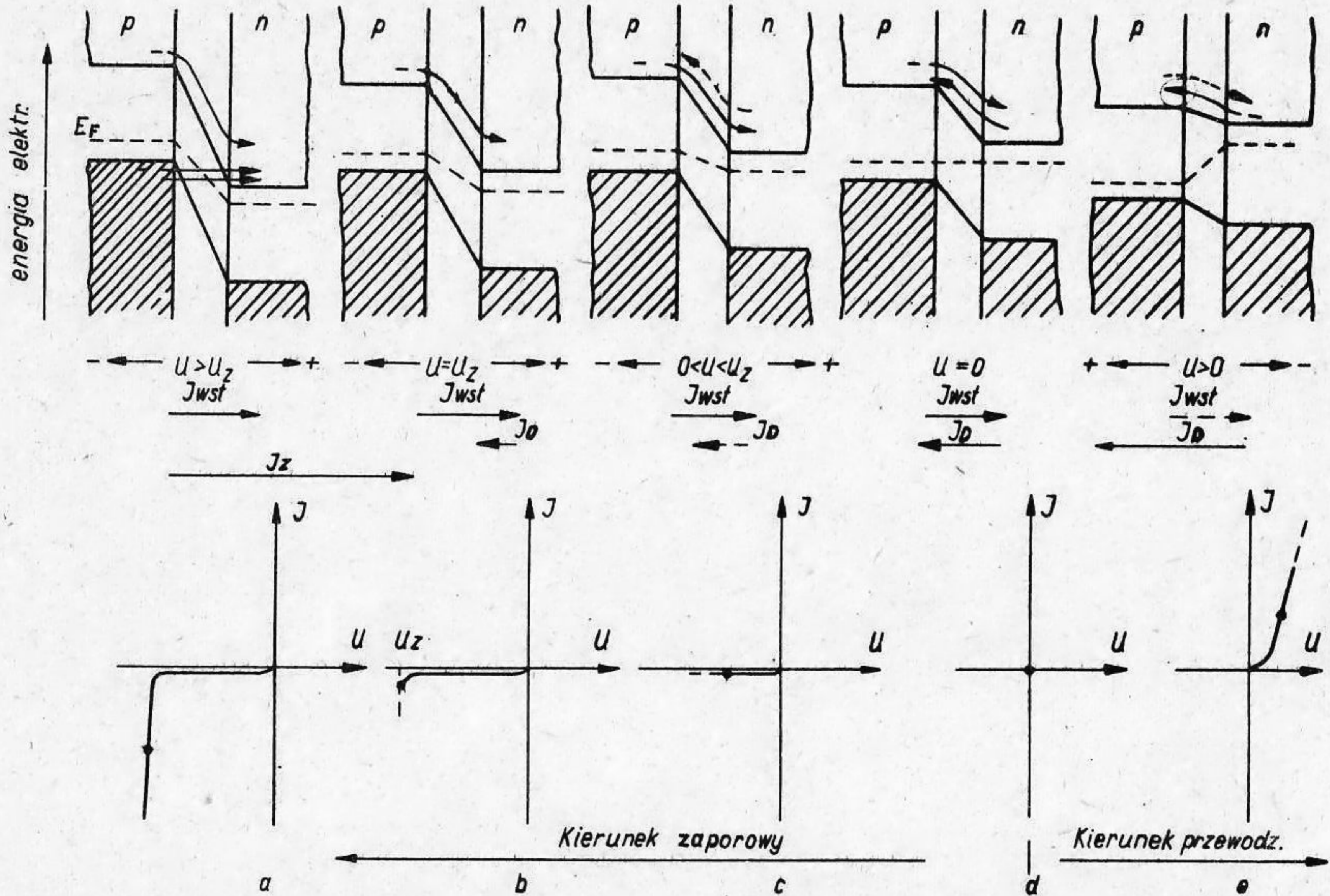
Inne własności wykazuje złącze p-n utworzone przez półprzewodniki niezdegenerowane, ale również o dużej koncentracji domieszek. W równowadze pasma energetycznego obu półprzewodników układają się w ten sposób (rys.8d), że dla swobodnych nośników po przeciwnej stronie bariery brak jest wolnych stanów energetycznych. Dlatego też, mimo, że złącze jest cienkie prądy tunelowe I_Z i I_E są bardzo małe, porównywalne z prądami I_D i I_W .

Po spolaryzowaniu złącza w kierunku przewodzenia (rys. 10.8e) bariera potencjału warstwy zaporowej obniża się, wzrasta więc prąd I_D , podobnie jak w zwykłym złączu o małej koncentracji domieszek.

Dla małych napięć przyłożonych w kierunku zaporowym płynie początkowo jedynie mały prąd I_W (rys.10.8c). Kiedy jednak natężenie pola elektrycznego warstwy zaporowej osiągnie taką wartość, że pasmo podstawowe półprzewodnika typu n zacznie przekrywać się z pasmem przewodnictwa półprzewodnika typu p prąd tunelowy I_Z gwałtownie wzrasta do dużych wartości (rys.10.8b i 10.8a) wzrasta bowiem liczba wolnych stanów, które mogą zajmować swobodne nośniki po tunelowym przeniknięciu bariery warstwy zaporowej.

Wartość napięcia polaryzującego złącze (kierunek zaporowy), przy której następuje gwałtowny wzrost prądu Zenera I_Z nosi nazwę napięcia Zenera U_Z . Wartość U_Z zmienia się ze zmianą koncentracji domieszek w półprzewodnikach tworzących złącze w granicach od 0,7 V do kilkuset woltów.

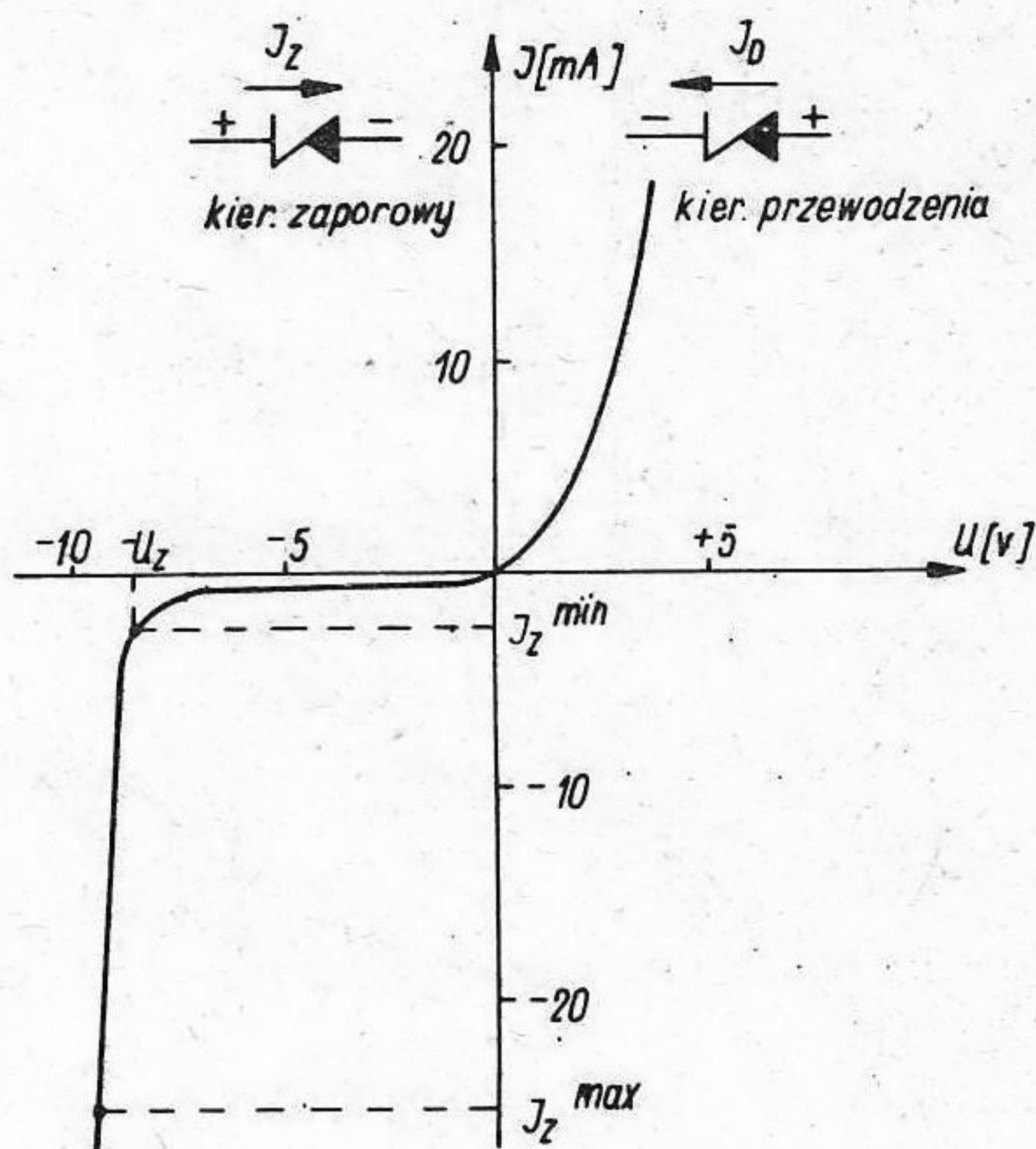
Powyżej napięcia Zenera opór złącza pozostaje praktycznie stały i zwykle nie przekracza kilku omów. W technice złącza tego typu noszą nazwę diod Zenera. Ich typowa charakterystyka przedstawiona jest na rys.10.9. W katalogach dla scharakteryzowania tych diod podaje się obok wartości napięcia Zenera, U_Z , maksymalną dopuszczalną wartość natężenia prądu Zenera I_Z^{max} , wartość natężenia prądu minimalnego



Rys.10.8. Ilustracja przebiegu prądów w złączu "p-n" o dużej koncentracji domieszek (dioda Zenera) w zależności od kierunku i wartości napięcia polaryzującego złącze a,b,c) złącze spolaryzowane w kierunku zaporowym, d) złącze w warunkach równowagi termodynamicznej, e) złącze spolaryzowane w kierunku przewodzenia

$$I_Z^{\min} = 0,1 I_Z^{\max},$$

od której charakterystyka ma przebieg liniowy oraz wartość dynamicznego oporu R_d (w kierunku zaporowym) dla określonego natężenia prądu I_Z .

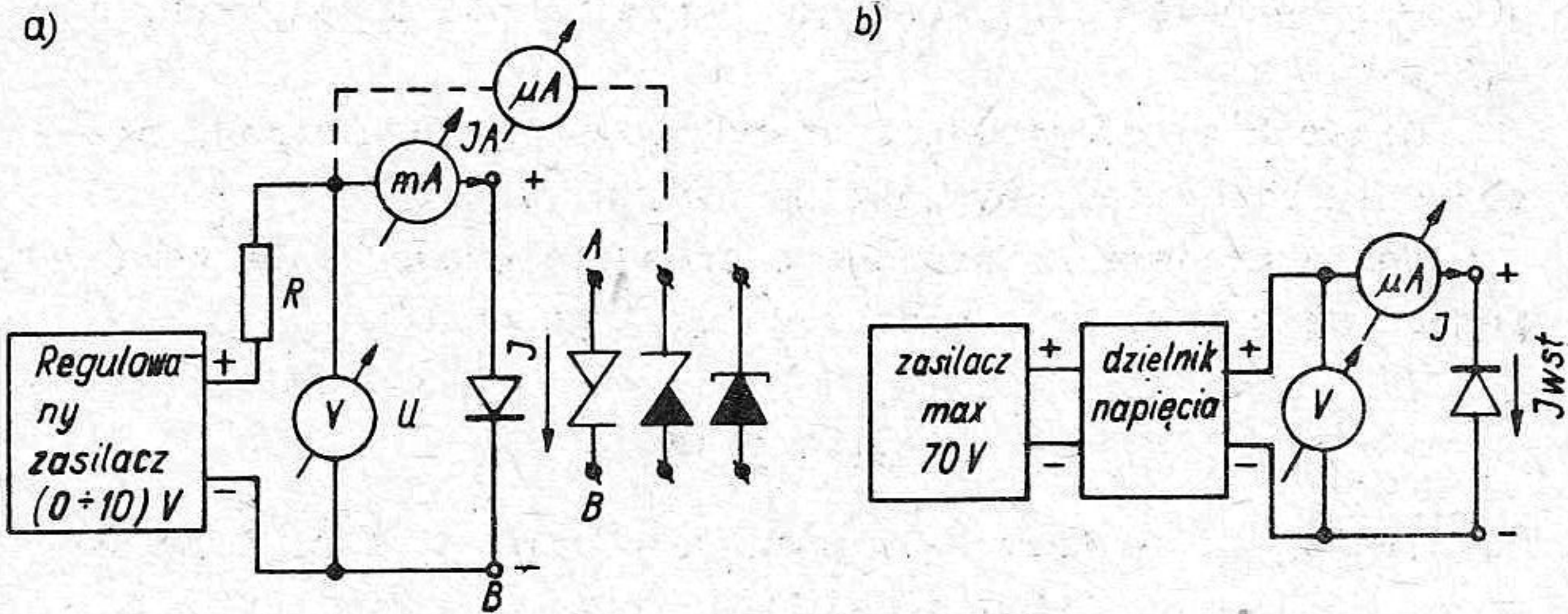


Rys.10.9. Charakterystyka prądowo-napięciowa diody Zenera

10.3. Plan ćwiczenia

1. Wyznaczyć charakterystykę prądowo-napięciową diody półprzewodnikowej (o małej koncentracji domieszek). Określić wartość oporu statycznego tej diody w kierunku przewodzenia i w kierunku zaporowym dla wybranych wartości natężenia prądu I_D i I_W . Schemat blokowy do zdejmowania charakterystyki prądowo-napięciowej w kierunku przewodzenia podany jest na rys.10a, a w kierunku zaporowym na rys.10b.
2. Wyznaczyć charakterystykę prądowo-napięciową diody Zenera. Określić następnie wartości U_Z , I_Z^{\min} oraz wartości oporu dynamicznego R_d , i oporu statycznego diody dla natężenia prądu

$$I_Z = \frac{I_Z^{\max}}{2}.$$

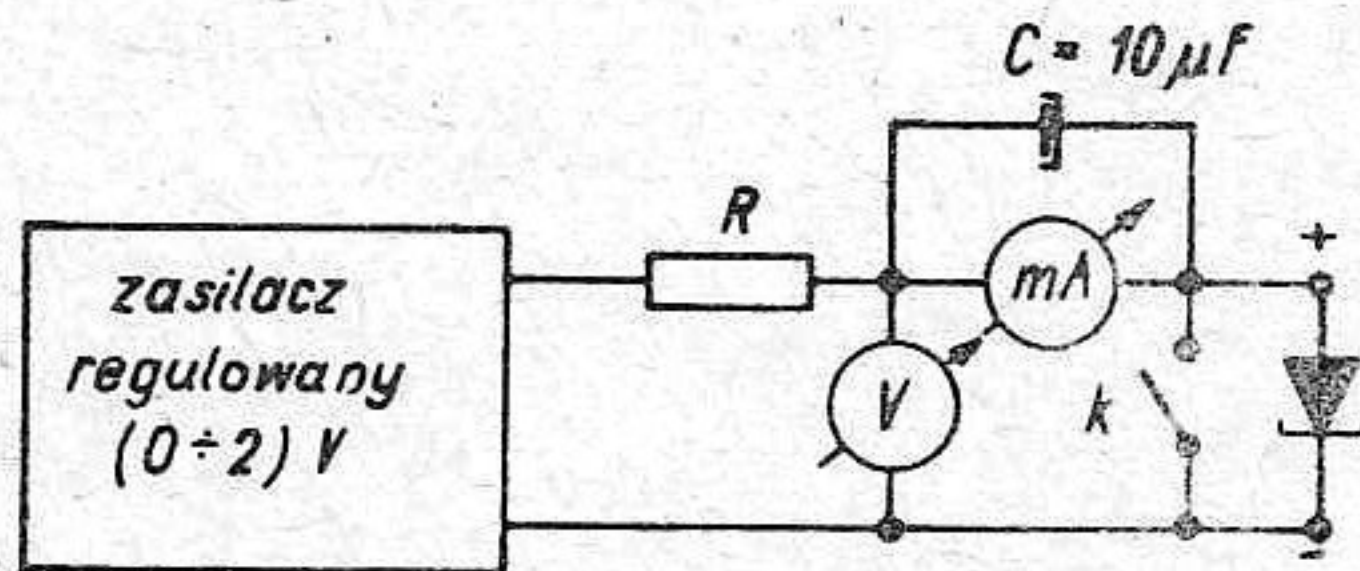


Rys.10.10. Schemat do zdejmowania charakterystyk prądowo-napięciowych diod półprzewodnikowych. a) w kierunku przewodzenia dla diody o małej koncentracji domieszek ($U_{max} = 2V$) i diody Zenera ($U_{max} = 1V$) w kierunku zaporowym dla diod Zenera (dla $U < U_z$ miliamperomierz zastąpić mikroamperomierzem) i diod tunelowych ($U_{max} = 0,8V$). Symbole diod wskazują kierunek włączania diod. R - opornik ograniczający prąd diody. Zasilacz włączyć do sieci po ustawieniu zakresu maksymalnego U_{max} wyjściowego zasilacza i podłączeniu diody. b) w kierunku zaporowym dla diody o małej koncentracji domieszek

Przy zdejmowaniu charakterystyki w kierunku przewodzenia i w kierunku zaporowym zestawić obwód według schematu podanego na rys.10.10a.

3. Wyznaczyć charakterystykę prądowo-napięciową diody tunelowej. Określić wartości U_p, U_v, U_f, I_p, I_v , stosunek I_p/I_v oraz wartość ujemnego oporu R_{st} .

Przy zdejmowaniu charakterystyki w kierunku zaporowym, należy korzystać ze schematu podanego na rys.



Rys.10.11. Schemat do zdejmowania charakterystyki diody tunelowej w kierunku przewodzenia. Wyłącznik K służy do zwierania zacisków diody w czasie jej włączania do układu (zabezpieczenie przed zniszczeniem) oraz do doprowadzania stanu diody do jej początkowego punktu położonego poniżej wartości I_p, U_p

10.10a. Wartość przyłożonego napięcia nie może przekroczyć 0,8V.

Schemat do zdejmowania charakterystyki w kierunku przewodzenia przedstawiony jest na rys.10.11.

Dokładniejsze informacje o sposobie prowadzenia pomiarów podane są w podpisach poszczególnych schematów.

Literatura

1. A.Swit - Przyrządy półprzewodnikowe, WNT, Warszawa, 1969, (83-179).
2. R.Zimmermann, Z.Kachlicki - Półprzewodnikowe diody specjalne, WKiŁ, Warszawa, 1965.
3. S.Molzacher - Podstawy elektroniki, wyd.4, Red.skryptów Politechniki Warszawskiej, Warszawa (57-70).
4. R.A.Smith - Półprzewodniki PWN Warszawa 1966.