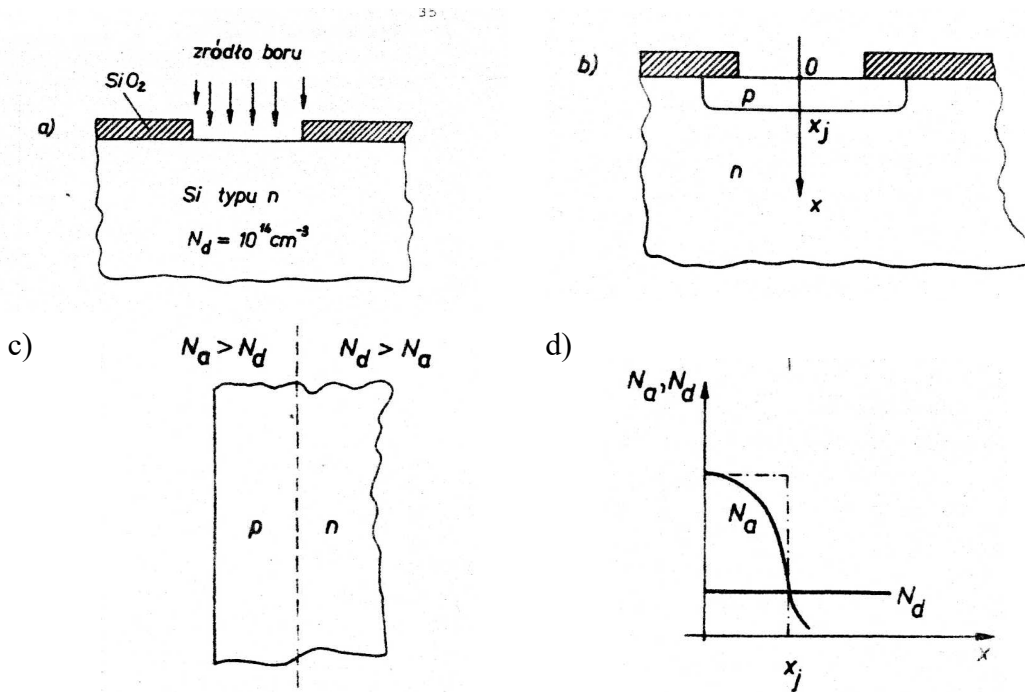


1. Złącze P-N

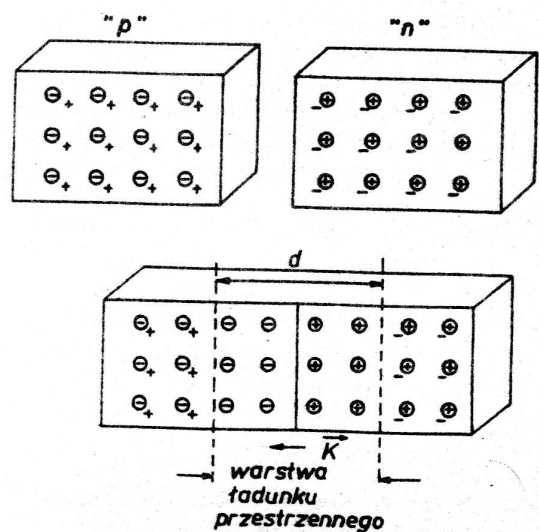
1.1. Wytwarzanie złącza P-N (P^+N) (technologia dyfuzyjno planarna)



1.2. Model idealny złącza P-N.

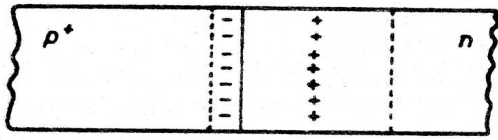
Zapominamy o technologii złącza i rozważamy model idealny w którym:.

- złącze jest symetryczne,
- koncentracja nośników mniejszościowych jest równa 0,
- każdy ładunek ruchomy znajduje się w okolicy swojego jonu.



1.3. Fizyczno-Matematyczny opis złącza P^+-N .

Rozważamy złącze niesymetryczne p^+n które możemy opisać za pomocą wielkości fizycznych w następujący sposób:



Rozkład gęstości ładunku:



$$q \cdot N_D \cdot d_n \cdot A = q \cdot N_A \cdot d_p \cdot A$$

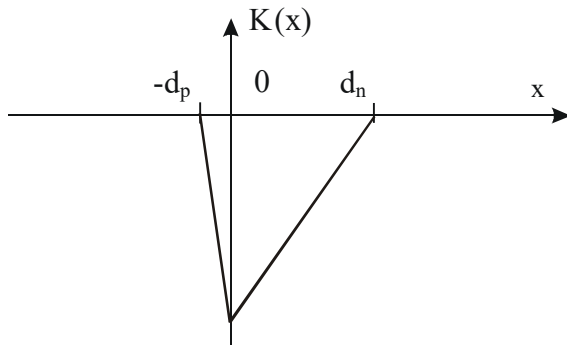
$$\frac{d_n}{d_p} = \frac{N_A}{N_D}$$

$$d = d_n + d_p$$

$$d_n = d \cdot \frac{N_A}{N_A + N_D}$$

$$d_p = d \cdot \frac{N_D}{N_A + N_D}$$

Rozkład natężenia pola elektrycznego:



Prawo Gaussa w postaci różniczkowej:

$$\frac{dK}{dx} = \frac{1}{\epsilon} \xi(x) \Rightarrow \int dK = \frac{1}{\epsilon} \int \xi(x) dx$$

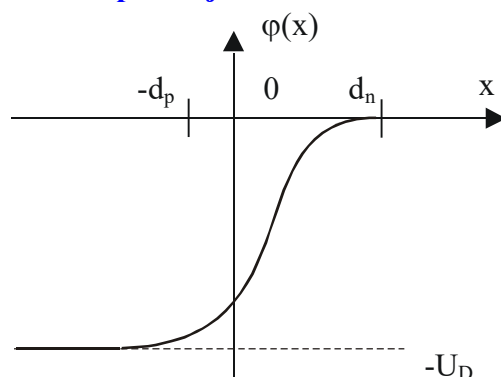
$$-d_p < x < 0$$

$$K(x) = \frac{-N_A q}{\epsilon} \cdot x - \frac{N_A q}{\epsilon} \cdot d_n$$

$$0 < x < d_n$$

$$K(x) = \frac{N_D q}{\epsilon} \cdot x - \frac{N_D q}{\epsilon} \cdot d_p$$

Rozkład potencjału:



Prawo Gaussa w postaci całkowej:

$$\varphi(x) = -\int K(x) dx$$

$$-d_p < x < 0$$

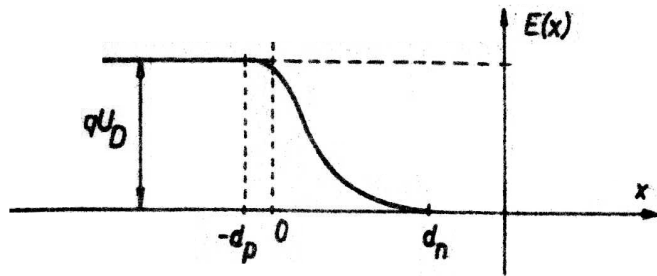
$$\varphi(x) = \frac{qN_A}{\epsilon} \left(\frac{x^2}{2} + d_p x \right)$$

$$0 < x < d_n$$

$$\varphi(x) = \frac{qN_D}{\epsilon} \left(-\frac{x^2}{2} + d_n x \right)$$

Wykres energii w złączu

Jest to bariera energetyczna jaką widzi elektron przechodzący z obszaru n do obszaru p.
Na jej podstawie można określić tzw. **napięcie dyfuzyjne** U_D :

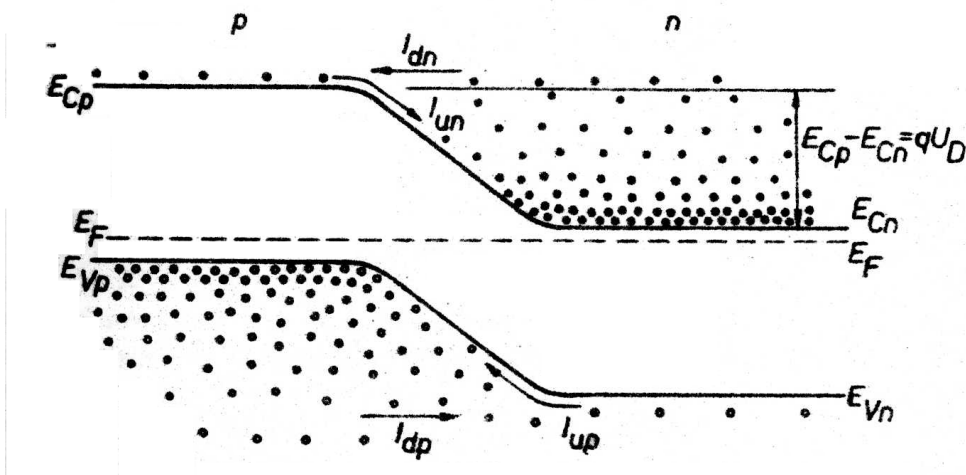


$$U_D = \varphi(d_n) - \varphi(d_p) = \frac{q}{2\epsilon} (N_D d_n^2 + N_A d_p^2)$$

Stąd:

$$d = \sqrt{\frac{2\epsilon U_D}{q} \frac{N_A + N_D}{N_A \cdot N_D}}$$

1.4. Model Pasmowy złącza P – N w stanie równowagi termodynamicznej.



Przebieg pasma przewodnictwa modelu pasmowego złącza p-n określa rozkład energii jaką czuje elektron przechodzący z obszaru n do obszaru p. Krawędź pasma walencyjnego podąża za pasmem przewodnictwa zachowując przerwę energetyczną pomiędzy oboma pasmami.

W warunkach równowagi termodynamicznej prądy nośników ładunku pochodzące od pola elektrycznego w obszarze warstwy zaporowej (prąd unoszenia I_U) oraz nierównomiernej koncentracji nośników (prąd dyfuzji I_d) równoważą się wzajemnie

- W warunkach równowagi termodynamicznej mamy więc:

$$I_{dn} = I_{Un} \quad I_{dp} = I_{Up}$$

- Dla elektronów:

$$\vec{I}_U + \vec{I}_d = 0$$

$$\mu_n \cdot n \cdot q \cdot \vec{K}(x) + D_n \cdot \frac{dn}{dx} \cdot q = 0$$

- Jeśli teraz do rozpatrywanego równania podstawimy zależności wynikające ze **wzoru Einsteina** oraz **prawa Gaussa**:

$$\left. \begin{aligned} D_n &= \frac{\mu_n kT}{q} \\ K &= -\frac{d\varphi}{dx} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{dn}{n} = \frac{kT}{q} \cdot d\varphi \Rightarrow \int_{d_p}^{d_n} \frac{dn}{n} = \frac{kT}{q} \int_{-\frac{U_D}{2}}^{\frac{U_D}{2}} d\varphi$$

stąd:

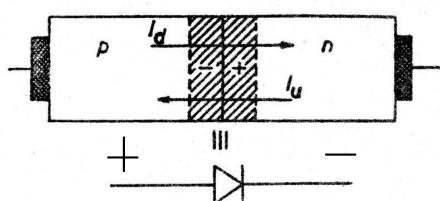
$$U_D = \frac{kT}{q} \ln \frac{n_n}{n_p} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2} \quad \text{dla temperatury}$$

- Parametr U_D zwany **napięciem dyfuzyjnym** często występuje w literaturze pod nazwą napięcia kontaktowego. Dla krzemu przyjmuje ono wartość $0,6 \div 0,8 \text{ V}$ w temperaturze pokojowej.

1.5. Spolaryzowane złącze P – N.

Kierunek przewodzenia.

- Źródło napięcia zasilania U podłączamy biegunem dodatnim do obszaru p (anoda) oraz biegunem ujemnym do obszaru n (katoda)

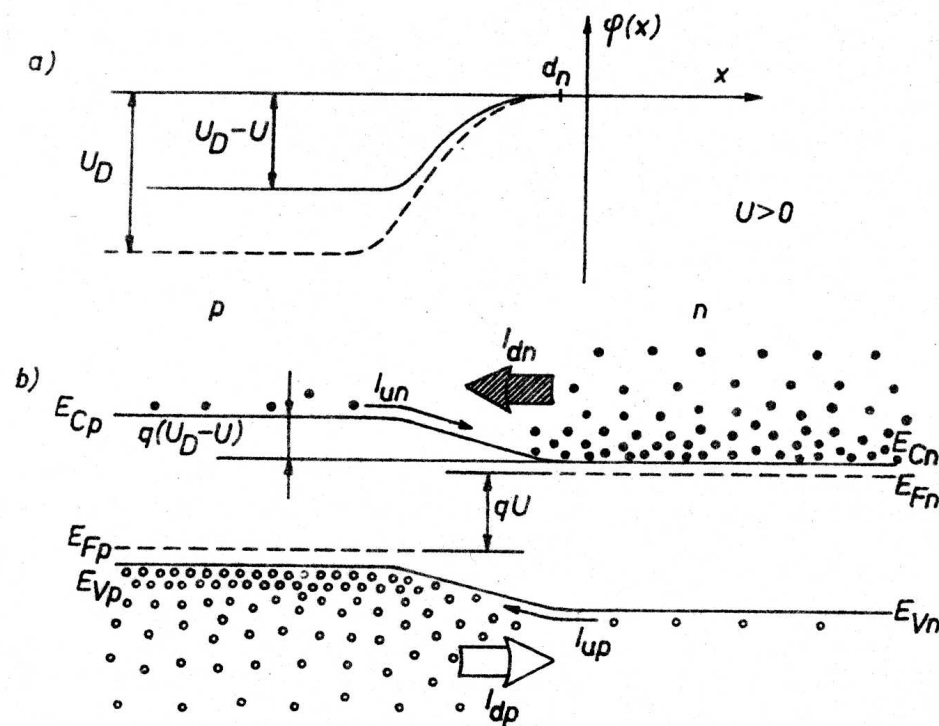


$$d = \sqrt{\frac{2\varepsilon(U_D - U)}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)}$$

- W tym przypadku szerokość warstwy zaporowej d zmniejsza się o wartość

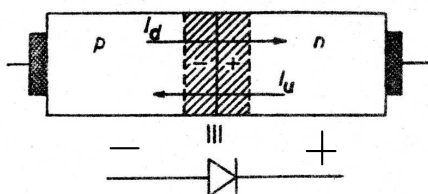
$$U_D - U.$$

- Bariera energetyczna widziana przez nośniki większościowe zmniejsza się o wartość przyłożonego napięcia



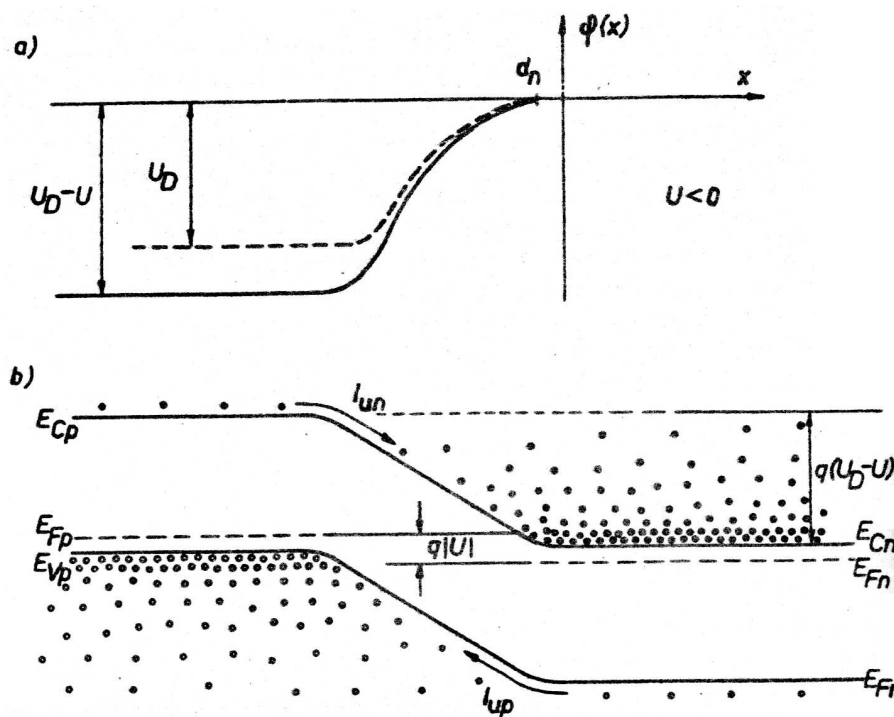
- Poziom Fermiego nie jest stały dla całego obszaru półprzewodnika. Różnica poziomów E_F na końcach złącza wynosi qU .

Kierunek zaporowy.



$$d = \sqrt{\frac{2\varepsilon(U_D + U)}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)}$$

- W tym przypadku szerokość warstwy zaporowej d zwiększa się o wartość $U_D + U$.
- Bariera energetyczna widziana przez nośniki większościowe zwiększa się o wartość przyłożonego napięcia

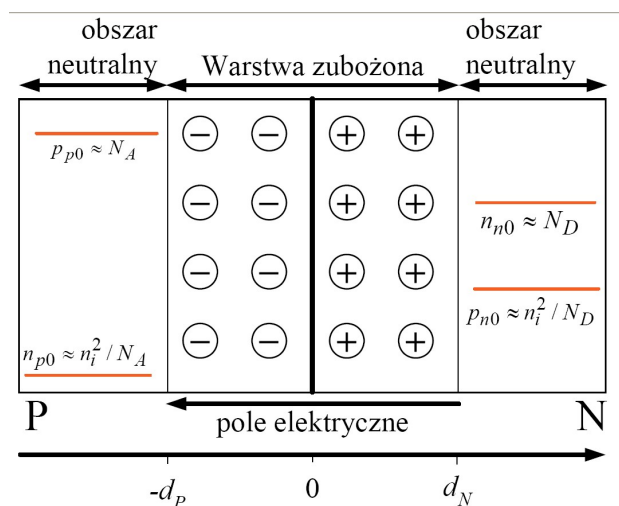


- Poziom Fermiego nie jest stały dla całego obszaru półprzewodnika. Różnica poziomów E_F na końcach złącza wynosi qU .

1.6. Charakterystyka Prądowo – Napięciowa złącza idealnego.

Założenia złącza idealnego.

- Złącze ma charakter skokowy
- Pole elektryczne występuje tylko w obszarze warstwy zaporowej
- Rezystancje obszarów neutralnych są równe zero
- Zjawiska zachodzące w złączu mają charakter jednowymiarowy. (prąd płynie w kierunku prostopadłym do powierzchni złącza)
- Pomijamy zjawiska rekombinacji – generacji w obszarze warstwy zaporowej
- Poziom wstrzykiwania nośników jest mały
- Natężenie pola elektrycznego w obszarze warstwy zaporowej jest na tyle małe, że nie powoduje przebicia złącza.



Podstawy elektroniki

Zależność prądu od napięcia.

$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{Uq}{kT}\right) - 1 \right]$$

$$I_s = qAn_i \left[\frac{D_n}{L_n \cdot N_A} + \frac{D_p}{L_p \cdot N_D} \right]$$

- Wzór na I_s jest słuszny dla przypadku gdy:

$$d_n \gg L_p \quad \text{oraz} \quad d_p \gg L_n$$

- Dla rozważanego wcześniej złącza p^+-n w 300 K wzór można uprościć do postaci

$$I_s = qAn_i^2 \frac{D_p}{N_D \cdot L_p} \quad \text{ponieważ} \quad N_A \gg N_D$$

- Dla tego samego przypadku złącza (p^+-n) licząc dokładniej zamiast L_p do wzoru wstawiamy d_n
- Wartość prądu I_s wynosi od $10^{-16} A$ dla **Si** natomiast dla **Ge** prąd ten jest 6 ÷ 7 rzędów większy.
- $\frac{kT}{q} = U_T$ jest to **potencjał elektrotermiczny** stąd:

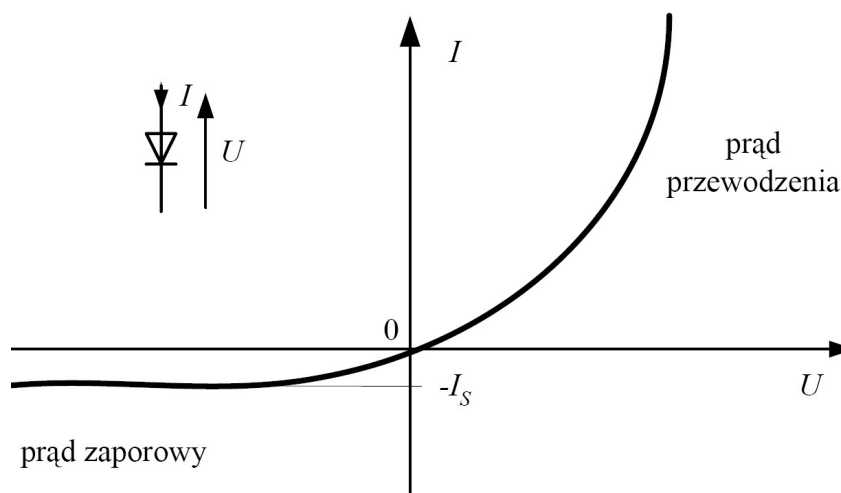
$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{U}{U_T}\right) - 1 \right]$$

- gdy napięcie polaryzujące dodatnie $U > 4U_T$ (w 300K ≈ 100 mV)

$$I = I_s \exp \frac{U}{U_T} \quad \text{- prądy dla napięcia } U > 0 \text{ są nawet rzędu miliamperów}$$

- gdy napięcie polaryzujące ujemne $U < -4U_T$ (minimalne stosowane w praktyce)

$$I = I_s \quad \text{- prądy dla napięcia } U < 0 \text{ są bardzo małe}$$



I_s – prąd nasycenia

T – temperatura

k – stała Boltzmana

A – powierzchnia złącza

D_n, D_p – współczynnik dyfuzji odpowiednio elektronów i dziur

L_n, L_p – średnie drogi swobodne odpowiednio elektronów i dziur

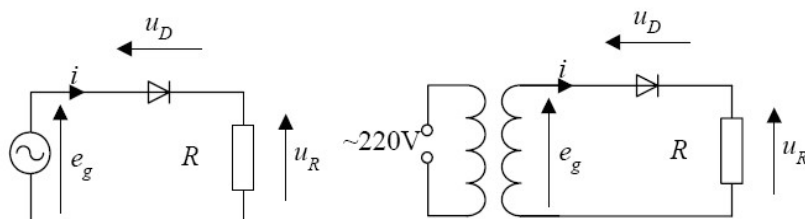
d_p, d_n – szerokość warstw zaporowych odpowiednio po stronie p i n

1.7.Zastosowanie praktyczne idealnego złącza P-N

Diody prostownicze i uniwersalne

Diody prostownicze to najczęściej **diody krzemowe dużej mocy** natomiast diody uniwersalne są często **diadami germanowymi małej mocy**. Oba rodzaje diod są sterowane z użyciem charakterystyki prądowo napięciowej złącza idealnego i znalazły zastosowanie odpowiednio w **prostownikach i detektorach**.

Prostownik półfalowy (jednopolówkowy).



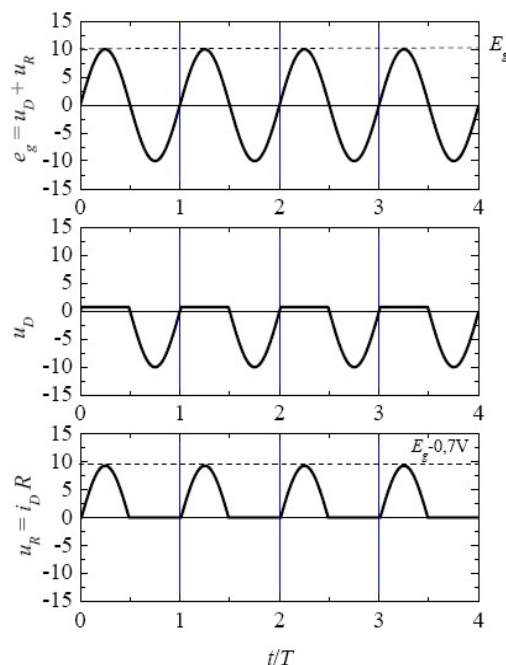
- $e_g = u_D + u_R = u_D + iR$
- charakterystyka diody

Gdy $e_g > 0,7V$ to dioda przewodzi. Wtedy $u_R = e_g - 0,7V$.

Gdy $e_g < 0,7V$ to dioda nie przewodzi $i = 0A$, $u_R = 0V$. Wtedy $u_D = e_g - 0V = e_g$.

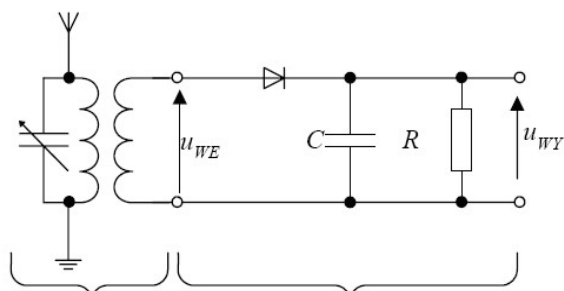
Prąd płynie przez obciążenie R tylko podczas dodatniej półfali napięcia wejściowego

Przy doborze diody należy wziąć pod uwagę maksymalne napięcie w kierunku wstecznym i U_{Rad} oraz I_0



Detektor amplitudy.

Układ jest podobny do prostownika z filtrem



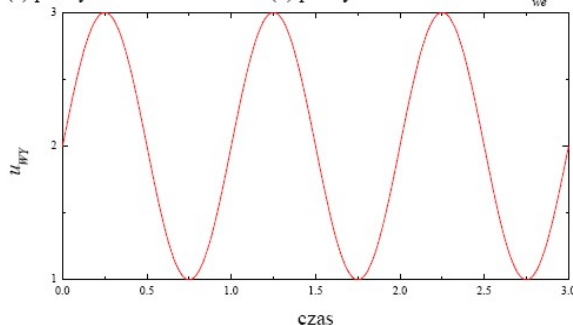
Strojony obwód
rezonansowy

detektor

$$1/(2\pi f) \gg RC \gg 1/(2\pi F)$$

kondensator C ma stanowić:

(a) praktycznie zwarcie dla F i (b) praktycznie rozwarcie dla u_{we}

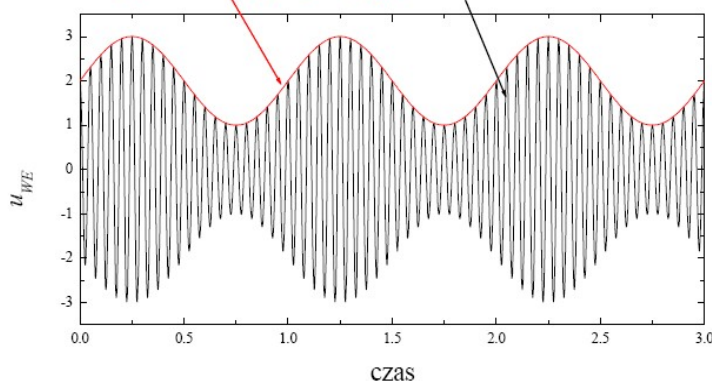


sygnał zmodulowany amplitudowo

$$u_{WE}(t) = u_{we}(t) \sin(2\pi F t) + U_{WE}$$

obwiednia - sygnał modulujący falę nośną $u_{we}(t)$

sygnał o częstotliwości nośnej F



$$u_{we}(t) = U_{we} \sin(2\pi f t); F \gg f$$

$$\frac{1}{2\pi F} \ll RC \ll \frac{1}{2\pi f}$$

$$2\pi f \ll \frac{1}{RC} \ll 2\pi F$$

1.8. Charakterystyka prądowo – napięciowa złącza rzeczywistego.

Odstępstwa od charakterystyki złącza idealnego dla kierunku przewodzenia.

Poziom wstrzykiwania dla dużych prądów przewodzenia jest duży, stąd koncentracja nośników mniejszościowych w danym obszarze może przewyższyć koncentrację nośników większościowych wskutek czego zależność U/I diody można przedstawić jako:

$$I_F \cong \exp\left(\frac{U_F}{2U_T}\right)$$

- Rezystancja obszarów neutralnych nie jest równa zero $\Rightarrow U_F = U_Z - I \cdot R_s$ stąd:

$$I_F \cong \exp\left(\frac{U_Z - IR_s}{\eta U_T}\right) \quad 1 < \eta < 2$$

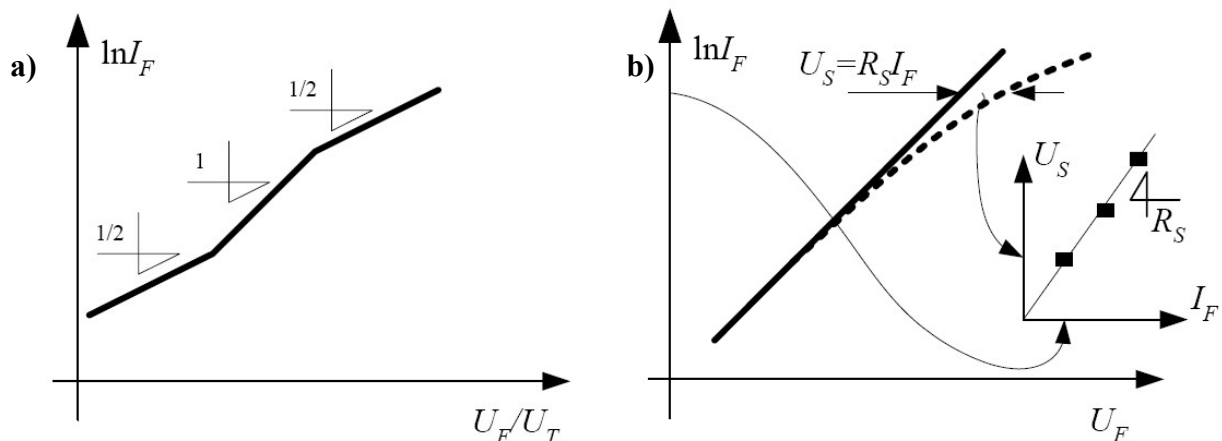
gdzie:

η - współczynnik zależny od rodzaju złącza i wielkości prądów przewodzenia np. dla Si $\eta = 2$ dla małych i dużych prądów i $\eta = 1$ dla średnich.

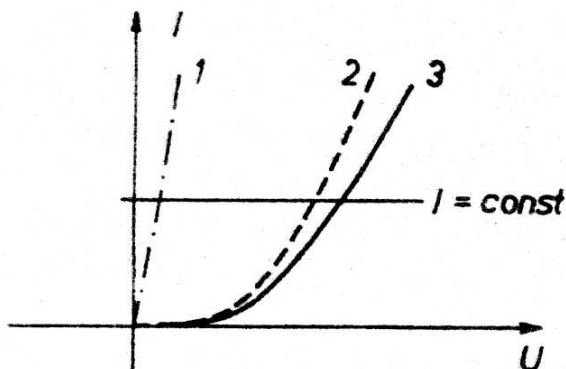
U_Z - napięcie na zaciskach diody

R_s - rezystancja szeregową diody

- Charakterystyki I/U w kierunku przewodzenia bardzo często przedstawia się w postaciach :



- Logarytmiczna skala na osi prądu (I_F) jak widać ułatwia określanie podstawowych parametrów złącza rzeczywistego. Liniowy wykres zależności U/I dla rzeczywistego złącza P-N nie ułatwia natomiast wyznaczania jego parametrów.



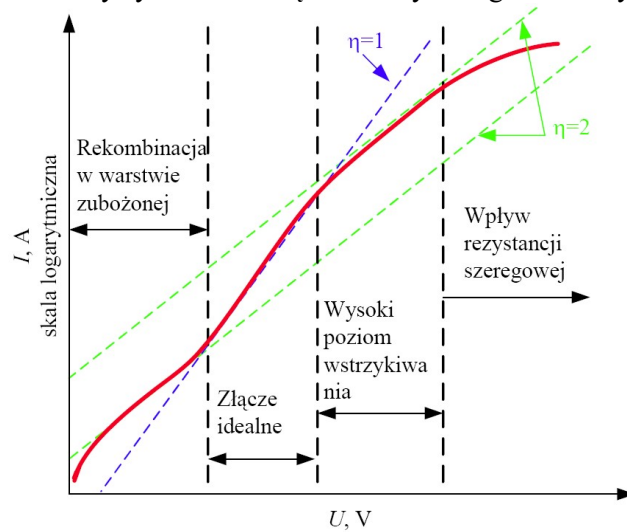
1 – charakterystyka rezystancji szeregową R_s

2 – charakterystyka złącza idealnego

3 – charakterystyka wypadkowa

Podstawy elektroniki

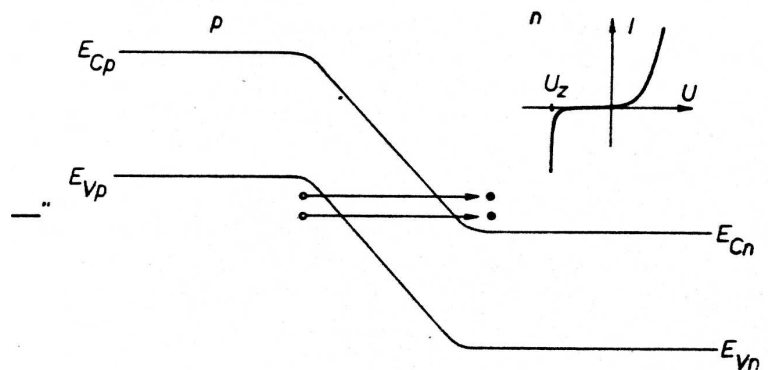
Przykładowe opracowanie charakterystyki U/I dla złącza rzeczywistego może wyglądać następująco:



Odstępstwa od charakterystyki idealnej w kierunku zaporowym.

Przebiecie Zenera..

Dla dużego natężenia pola w warstwie zaporowej 10^8 V/m następuje tunelowe przejście elektronów z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa, aby jednak to nastąpiło złącza muszą być silnie domieszkowane.



Przebiecie lawinowe.

Jeśli droga swobodna jest na tyle duża, że elektron rozpędzi się do energii mogącej zjonizować atom po zderzeniu. Zjawisko to występuje w złączach o szerokiej warstwie zaporowej. Prąd płynący w trakcie tego przebiecia można wyrazić jako:

$$I_p = M \cdot I_s$$

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{|U|}{U_p} \right)^n}$$

I_p – prąd powielania

I_s – prąd płynący przed przebicciem

M – współczynnik powielania

n – współczynnik zależny od rodzaju złącza

Generacja w obszarze warstwy zaporowej.

Prąd generacji nośników ładunku (par elektron–dziura) w obszarze warstwy zaporowej można określić jako:

$$I_g = \frac{1}{2} q \frac{n_i}{\tau} \sqrt{\frac{2\epsilon(U_D - U)}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)}$$

τ - czas życia nośników

I_g – prąd generacji

Wpływa on w złączu rzeczywistym spolaryzowanym zaporowo na zależność U od I (przez złącze płynie większy prąd)

Podstawy elektroniki

- Dla kierunku przewodzenia możemy napisać

$$I = I_0 \exp\left(\frac{U}{\eta U_T}\right) \quad I_0 = I_s + I_g(U)$$

- dla kierunku zaporowego natomiast :

$$I = I_0 = I_s + I_g(U)$$

- dla obu kierunków szczegółowo:

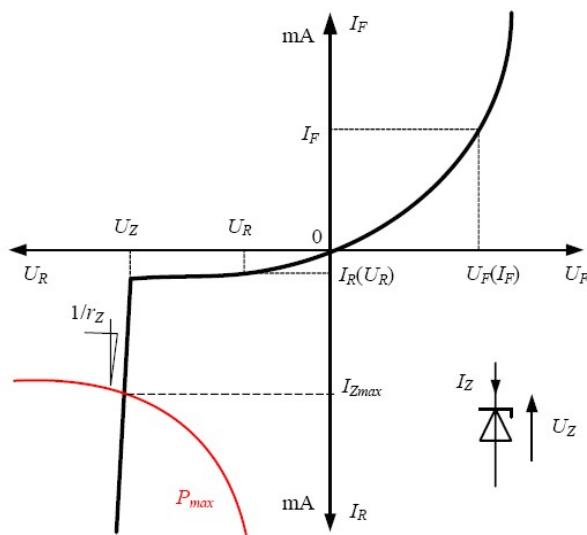
$$I = I_g(U) \left[\exp\left(\frac{U}{2U_T}\right) - 1 \right] + I_s \left[\exp\left(\frac{U}{U_T}\right) - 1 \right]$$

1.9. Zastosowanie praktyczne rzeczywistego złącza P-N

Diody stabilizacyjne (Zenera)

służą do stabilizacji napięć (i konstrukcji układów stabilizujących pośrednio prąd) oraz w ogranicznikach napięcia, przesuwnikach napięcia stałego, w źródłach napięcia odniesienia (referencyjnych).

- Wykorzystuje się zjawisko przebicia (Zenera, lawinowe), $U_Z > 3,3V$
- W zakresie $< 3,3V$ stosuje się szeregowe połączenie dwóch lub trzech złącz  (stabilitrony)



- U_F napięcie przewodzenia przy określonym (I_F) prądzie przewodzenia
- I_{Fmax} maksymalny stały prąd przewodzenia
- I_R prąd wsteczny przy określonym napięciu wstecznym U_R
- U_Z napięcie stabilizacji przy $I_Z=0, I_{Zmax}$
- TKU_Z temperaturowy współczynnik napięcia stabilizacji
- β

$$\beta = \frac{1}{U_Z} \frac{dU_Z}{dT} \Big|_{I_Z=const}$$

- r_Z rezystancja dynamiczna przy określonym prądzie stabilizacji

$$r_Z = \frac{dU_Z}{dI_Z}; \text{ typowe wartości: kilka -}$$

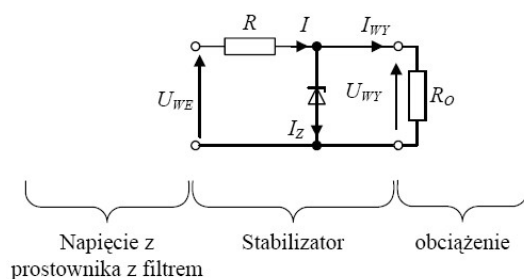
kilkanaście Ω . Im mniejsza r_Z tym lepsze właściwości stabilizacyjne

- P_{max} maksymalna moc strat
- I_{Zmax} Maksymalny dopuszczalny prąd stabilizacji

$$I_{Zmax} = \frac{P_{max}}{U_Z}$$

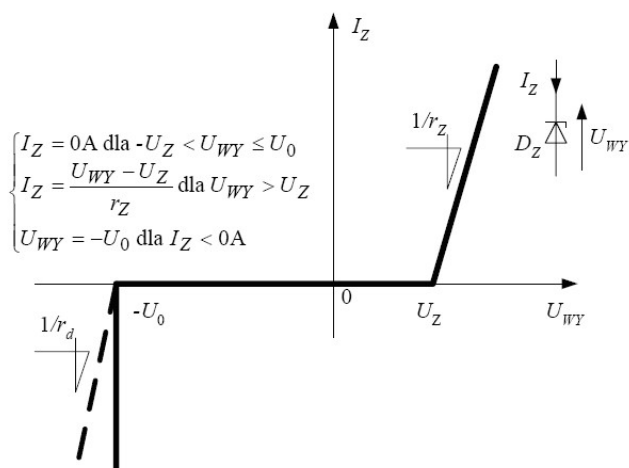
- T_J maksymalna temperatura złącza

Parametryczny stabilizator napięcia



- o Zadaniem układu jest dostarczanie do obciążenia stałego napięcia niezależnie od zmian napięcia wejściowego i zmian prądu wyjściowego (zmian obciążenia) jak również zmian temperatury (i czasu).
- o Zadanie to jest możliwe do zrealizowania w ograniczonym zakresie zmian U_{WE} i I_{WY} (i temperatury)
- o $U_{WE} > 0V$

Odcinkowy model diody stabilizacyjnej



Podstawy elektroniki

- o Właściwości układu stabilizatora parametrycznego opisują dwie charakterystyki:

przejsiowa $\Rightarrow U_{WY}(U_{WE})$ dla $U_{WE} > 0$ i **wyjściowa** $\Rightarrow U_{WY}(I_{WY})$

- o Z charakterystyk tych można określić odpowiednio parametry:

współczynnik stabilizacji napięcia S_U i **rezystancja wyjściowa** R_{WY}

Charakterystyka przejsiowa $U_{WY}=f(U_{WE})$

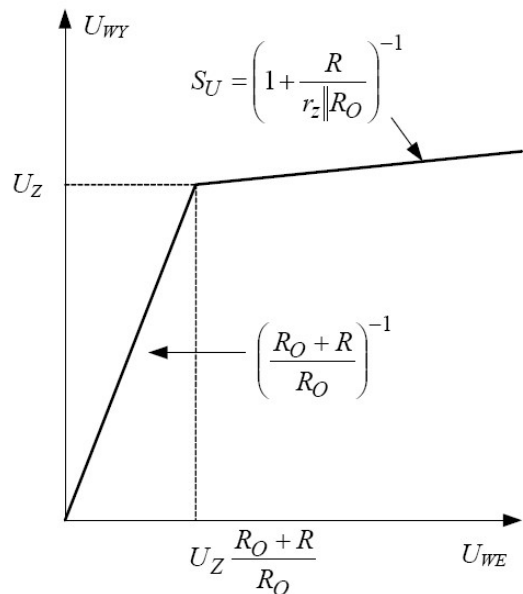
$$S_U \equiv \frac{dU_{WY}}{dU_{WE}} \cong \frac{\Delta U_{WY}}{\Delta U_{WE}} = \frac{u_{wy}}{u_{we}}$$

$$S_U = \left(1 + \frac{R}{r_z \parallel R_O}\right)^{-1} \approx \left(1 + \frac{R}{r_z}\right)^{-1} \approx \frac{r_z}{R}$$

Przykład dla $R=100\Omega$, $R_O=1k\Omega$ i $r_z=5\Omega$:

$$S_U = 0,047 \approx \frac{r_z}{R} = 0,05 = 5\%$$

Wzrost U_{WE} o $\Delta U_{WE}=1V$ powoduje wzrost U_{WY} o $\Delta U_{WY}=0,05V$ w zakresie stabilizacji.



U_{WY} jest funkcją U_{WE} i R_O , wobec czego R_O jest parametrem dla charakterystyki przejsiowej $U_{WY}(U_{WE})$

Charakterystyka wyjściowa $U_{WY}=f(U_{WE})$

- o $U_{WY} > U_Z$: Dioda przewodzi;

$$I_{WY} = I - I_Z = \frac{U_{WE} - U_{WY}}{R} - \frac{U_{WY} - U_Z}{r_z} = -U_{WY}(R \parallel r_z)^{-1} + \frac{U_{WE}}{R} + \frac{U_Z}{r_z}$$

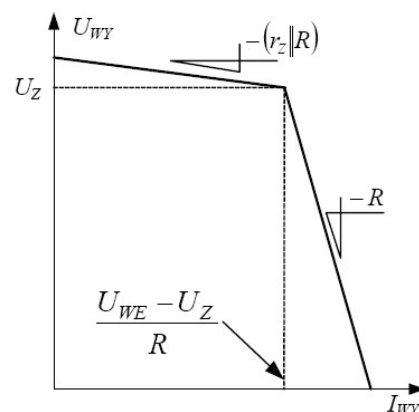
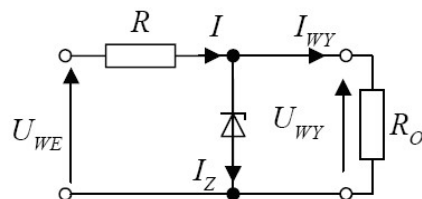
$$U_{WY} = -I_{WY}(R \parallel r_z) + U_{WE} \frac{(R \parallel r_z)}{R} + U_Z \frac{(R \parallel r_z)}{r_z}$$

- o $U_{WY} < U_Z$ Dioda nie przewodzi;

$$I_{WY} = I - 0A = \frac{U_{WE} - U_{WY}}{R}; \quad U_{WY} = U_{WE} - I_{WY}R$$

$$R_{WY} \equiv -\frac{dU_{WY}}{dI_{WY}} \cong -\frac{\Delta U_{WY}}{\Delta I_{WY}} = -\frac{u_{wy}}{i_{wy}}$$

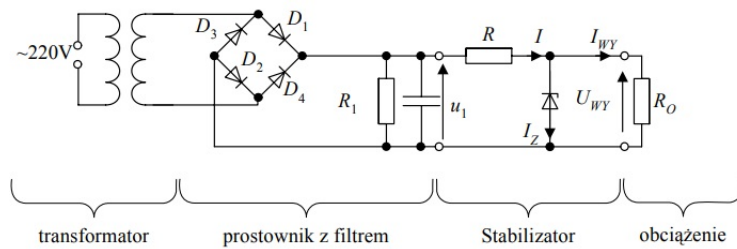
w zakresie stabilizacji: $R_{WY} \equiv r_z \parallel R \approx r_z$



U_{WY} jest funkcją U_{WE} i R_O (pośrednio I_{WY}) wobec czego U_{WE} jest parametrem dla charakterystyki wyjściowej $U_{WY}(I_{WY})$

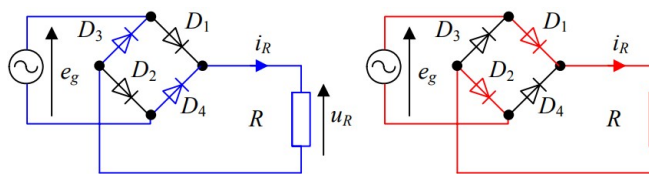
Rola i miejsce stabilizatora napięcia.

Stabilizator napięcia wchodzi w skład typowych zasilaczy napięcia stałego. Napięcie wyjściowe stabilizatora parametrycznego (bazującego na właściwościach diody Zenera) jest bezpośrednio związane z napięciem przebicia (Zenera) wykorzystywanej diody.

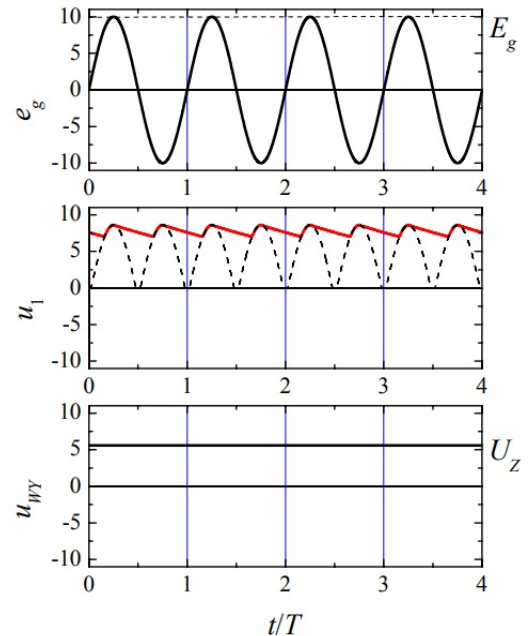


W praktyce obciążeniem jest jakiś układ (zasilany)

Działanie prostownika mostkowego

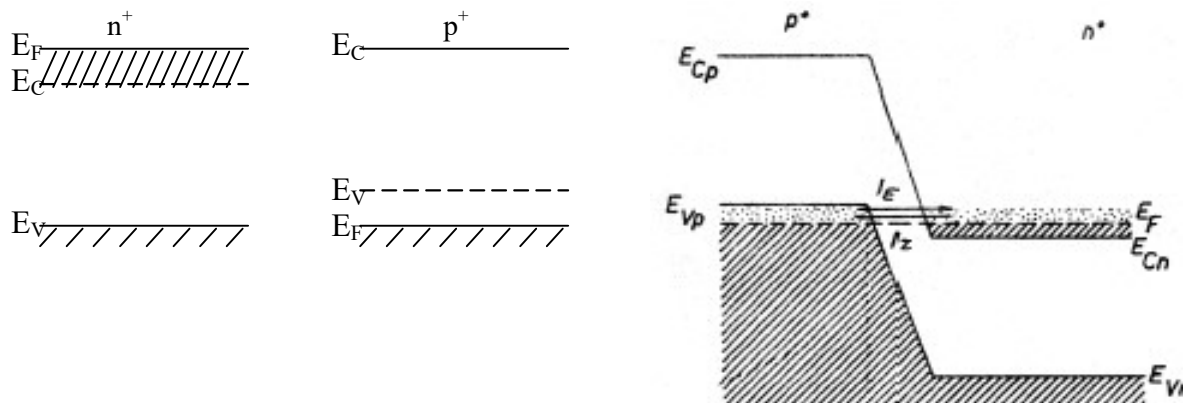


- Dla $e_g > 1,4V$ przewodzi para diod D_1, D_2 .
- Dla $e_g < -1,4V$ przewodzi para diod D_3, D_4 .
- Przez obciążenie R płynie prąd podczas dodatniej i ujemnej półpracy.



1.10. Charakterystyka prądowo – napięciowa złącza P⁺N⁺.

W miarę wzrostu domieszkowania poziom Fermiego przesuwa się w paśmie zabronionym, dla półprzewodnika typu n w górę zaś, dla półprzewodnika typu p w dół, i tak dla $N_D = 2 \cdot 10^{25} m^{-3}$ dla Ge oraz $N_D = 6 \cdot 10^{25} m^{-3}$ dla Si osiąga wierzchołek E_C . Przy dalszym wzroście domieszkowania mamy przypadek jak poniżej:

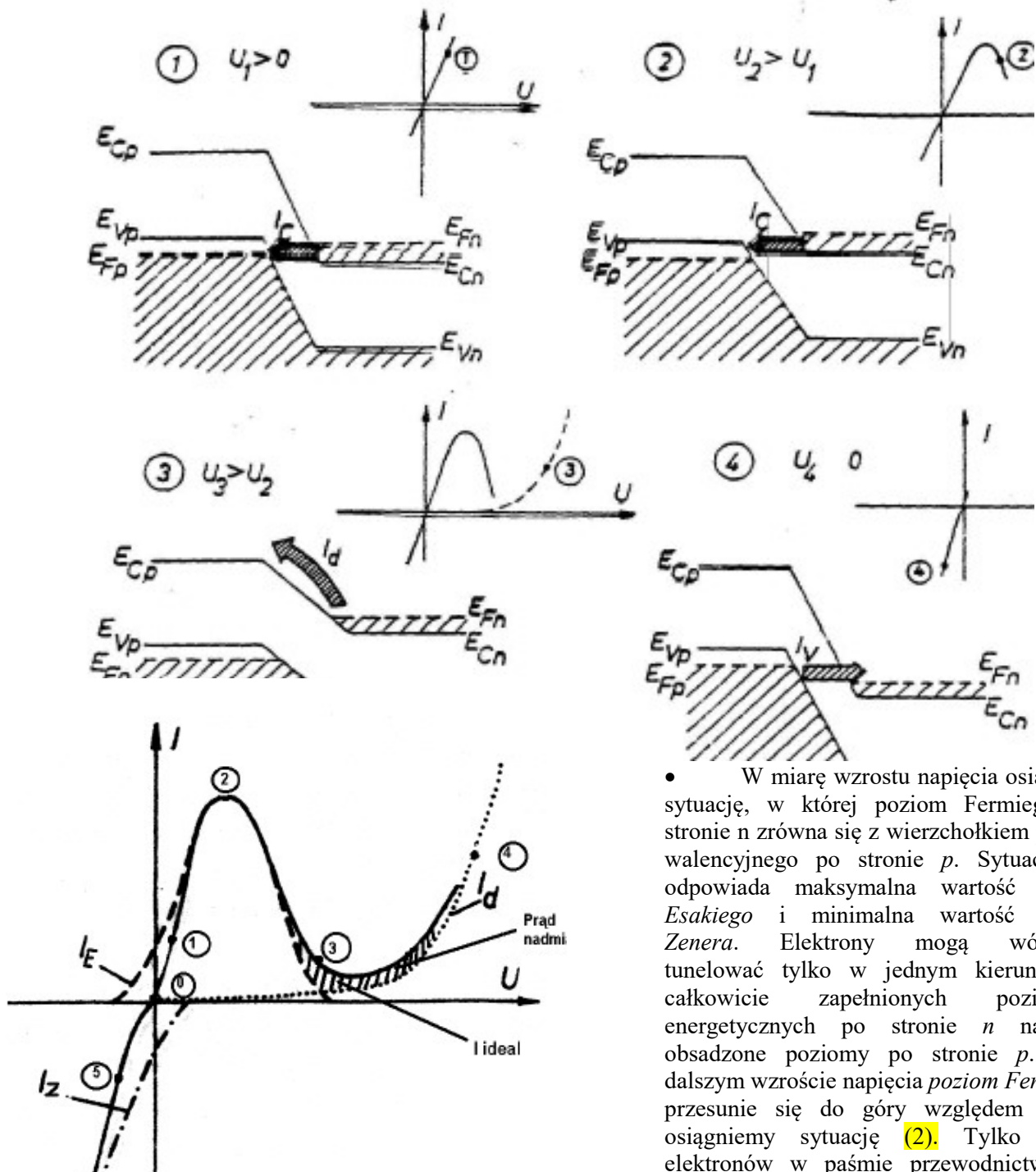


W temperaturze $0^\circ K$ wszystkie poziomy poniżej E_F są zajęte i wszystkie poziomy powyżej E_F są puste, w $T \neq 0^\circ K$ część poziomów poniżej jest wolnych i część poziomów powyżej jest zajęta. Naprzeciw zajętych poziomów po stronie p^+ są wolne poziomy po stronie n^+ , elektrony mogą, więc przejść z pasma walencyjnego po stronie p^+ do pasma przewodnictwa po stronie n^+ bez zmiany energii, może, więc powstać omówione wcześniej **przebiecie Zenera**. Podobnie elektrony z obsadzonych stanów po stronie n^+ mogą przejść na wolne stany do pasma walencyjnego po stronie p^+ . Zjawisko to zaobserwował po raz pierwszy Esaki (1973), stąd nazwa tego prądu - **prąd Esakiego**

Zależność prądu od napięcia dla złącza p⁺ n⁺.

Podstawy elektroniki

Ze względu na zachodzenie pasm energetycznych w złączu silnie domieszkowanym wystarcza niewielkie napięcie w kierunku przewodzenia, aby nastąpiła przewaga prądu Esakiego (I_C) nad prądem Zenera (I_V) - punkt (1).



- W miarę wzrostu napięcia osiągamy sytuację, w której poziom Fermiego po stronie n zrówna się z wierzchołkiem pasma walencyjnego po stronie p . Sytuacji tej odpowiada maksymalna wartość prądu Esakiego i minimalna wartość prądu Zenera. Elektronów mogą wówczas tunelować tylko w jednym kierunku- z całkowicie zajętych poziomów energetycznych po stronie n na nieobsadzone poziomy po stronie p . Przy dalszym wzroście napięcia poziom Fermiego przesunie się do góry względem E_{Fp} i osiągniemy sytuację (2). Tylko część elektronów w paśmie przewodnictwa po

stronie n , ma naprzeciw siebie puste stany energetyczne, na które mogą tunelować. Gdy napięcie przewodzenia stanie się wystarczająco duże aby dno pasma przewodnictwa po stronie n , przesunęło się powyżej wierzchołka pasma walencyjnego po stronie p , zaczyna płynąć tylko prąd dyfuzyjny-punkt (3).

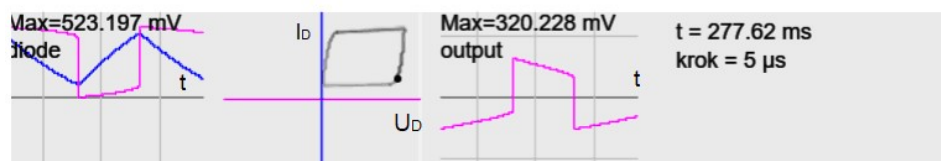
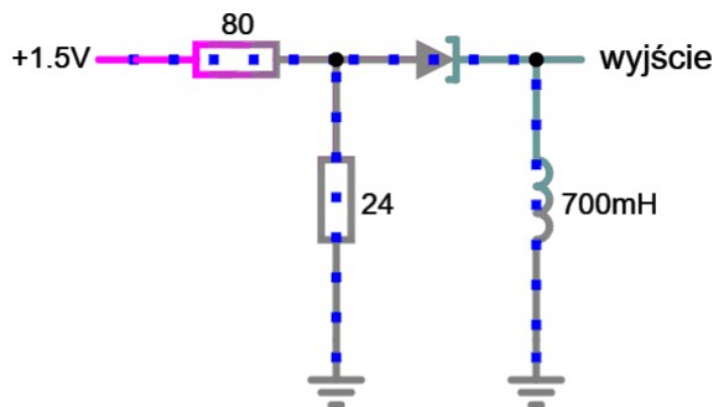
W kierunku zaporowym prąd Zenera (I_V) staje się większy co do wartości bezwzględnej od (I_C), gdyż elektrony w całkowicie zajętych paśmie przewodnictwa po stronie n , mają naprzeciw siebie całkowicie zajęte pasmo walencyjne, nie mogą więc tunelować. Natomiast elektrony z pasma walencyjnego po stronie p , mają naprzeciw siebie puste stany w paśmie przewodnictwa po stronie n , mogą, więc tunelować tworząc prąd Zenera I_V (4).

1. 11. Praktyczne zastosowanie złącza p+n+ - dioda tunelowa

Złącze p+n+ (silnie domieszkowane) znalazło swoje zastosowanie w konstrukcjach diod tunelowych. Diody te z kolei są niezastąpione w elektronicznych układach mikrofalowych, szczególnie tych które wymagają uzyskania bardzo dużych czułości odbiorników mikrofalowych. Wzmacniacze mikrofalowe zbudowane w oparciu o diody tunelowe charakteryzują się cennymi zaletami, z których jako główne można wymienić:

- dobre parametry szumowe,
- małe rozmiary,
- duże szerokości pasma przenoszenia (rzędu jednej oktawy),
- niewielki ciężar,
- niewielki pobór mocy (ok. 10 mW),
- minimalna nierównomierność częstotliwościowej charakterystyki wzmocnienia (rzędu 0,02dB/MHz).

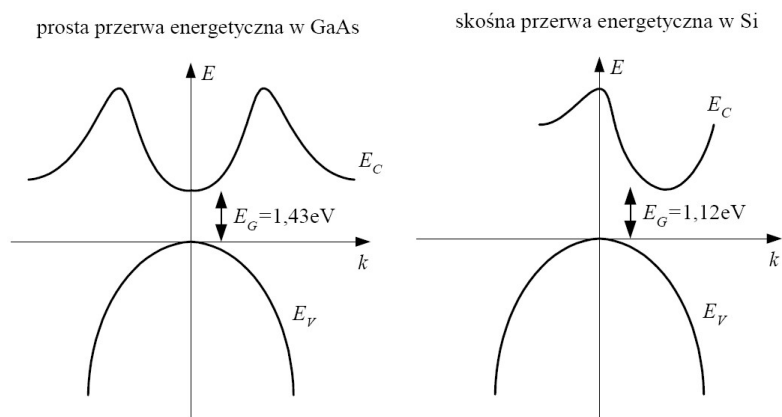
Powyższe cechy wpłynęły na szerokie zastosowanie wzmacniaczy tunelowych w mikrofalowym sprzęcie przenośnym, w odbiornikach wmontowanych bezpośrednio w anteny, sprzęcie lotniczym i kosmicznym. Wzmacniacze zbudowane w oparciu o diodę tunelową są ok. 10 razy tańsze od wzmacniaczy zawierających lampy o fali bieżącej (WFB). Rysunek poniżej ilustruje realizację generatora sygnału w.cz. zbudowanego w oparciu o diodę tunelową, której punkt pracy ustawiono na odcinku tzw. ujemnej rezystancji dynamicznej. (patrz temat parametry statyczne złącza p-n).



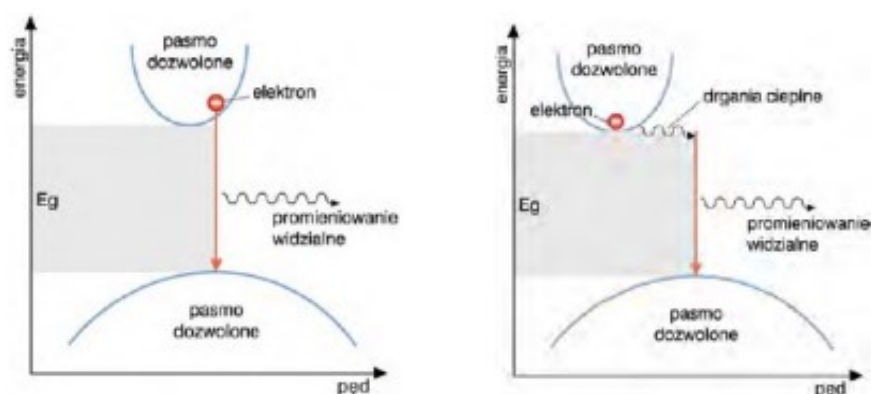
Powyższy układ umożliwia powstanie drgań o kształcie fali zbliżonej do przebiegu prostokątnego. Dzielnik napięcia R1-R2 ustala punkt pracy w zakresie ujemnej rezystancji dynamicznej. Przepływ prądu przez cewkę powoduje wzrost napięcia na diodzie tunelowej tak długo, aż wejdzie w zakres ujemnej rezystancji. W tej chwili na indukcyjności utrzymuje się dodatnie napięcie, w związku z czym wzrasta natężenie prądu płynącego przez nią. Wejście diody w zakres ujemnej rezystancji dynamicznej staje się niemożliwe, a zamiast tego jej punkt pracy samoistnie ustala się w następnym zakresie dodatniej rezystancji dynamicznej. Znak napięcia na cewce odwrócił się, dlatego natężenie prądu płynącego przez nią maleje. Punkt pracy diody również przesunął się w kierunku mniejszych wartości prądu i napięcia, aż wkroczy w zakres ujemnej rezystancji. Jednak z uwagi na fakt, że układ nie wykorzystuje zakresu ujemnej rezystancji dynamicznej cykl przeskoku punktu pracy się powtarza.

1.12. Właściwości złącza P-N prostą przerwą energetyczną

- Większościowe nośniki prądu wstrzykiwane przez złącze p-n do obszarów o przeciwnym typie przewodnictwa stają się nośnikami mniejszościowymi i rekombinują po czasie zwanym **średnim czasem życia nośników (τ)**.
- Procesowi rekombinacji towarzyszy uwalnianie energii o wartości zależnej od szerokości pasma zabronionego oraz przebiegu dna pasma przewodnictwa oraz wierzchołka pasma walencyjnego. Rozważane do tej pory modele pasmowe materiałów półprzewodnikowych były modelami uproszczonymi, w których krawędzie dna pasma przewodnictwa oraz wierzchołka pasma walencyjnego były liniami prostymi niezależnie od wybranego kierunku w przestrzeni. Takie modele materiałowe są w zupełności wystarczające do opisu większości zjawisk fizycznych występujących w półprzewodnikach ale dla pewnej ich grupy wymagana jest większa dokładność definicji modelu pasmowego. W takich sytuacjach wykreślane są przebiegi dna pasma przewodnictwa i wierzchołka pasma walencyjnego w zależności od wektora falowego k i wybranego kierunku w kryształach materiału.
- Mając zdefiniowany dokładny model pasmowy materiału możemy zilustrować ich dodatkowe cechy otwierające nowe możliwości przy konstruowaniu elementów elektronicznych. Okazuje się, że takie materiały jak Si i Ge charakteryzują się tzw. **skośną przerwą energetyczną**, natomiast związki GaAs, GaAs_{1-x}P_x oraz AlGaAs posiadają **prostą przerwę energetyczną**. Rysunek poniżej pokazuje przykładowe definicje dokładnych modeli pasmowych dla w.w. materiałów, na których można opisać wspomniane powyżej cechy.

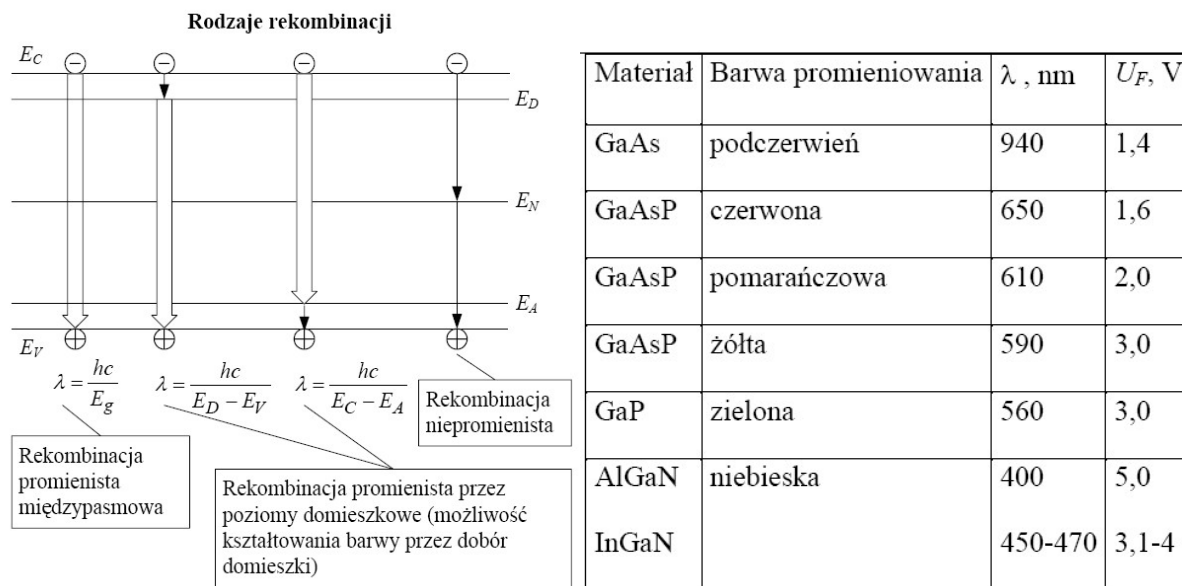


- W materiałach mających skośną przerwę energetyczną występują wyłącznie **procesy rekombinacji pośredniej** w których przejścia elektronów z pasma przewodnictwa do pasma walencyjnego odbywają się etapowo. Podczas jednego z etapów uwalnia się nadwyżka energii, która emitowana jest w postaci **fononów** (kwantów energii cieplnej) absorbowanych następnie przez atomy otaczającej sieci krystalicznej.
- W półprzewodnikach, które posiadają prostą przerwę energetyczną przeważa natomiast proces **rekombinacji bezpośredniej**, podczas którego zachowane są energia i pęd elektronów. Taki rodzaj rekombinacji nazywany jest **rekombinacją promienistą**. Przy polaryzacji złącza w kierunku przewodzenia dzięki takiemu procesowi może zostać wyemitowana znaczna ilość kwantów promieniowania elektromagnetycznego (**fotonów**) co jest podstawą działania **diod LED**.

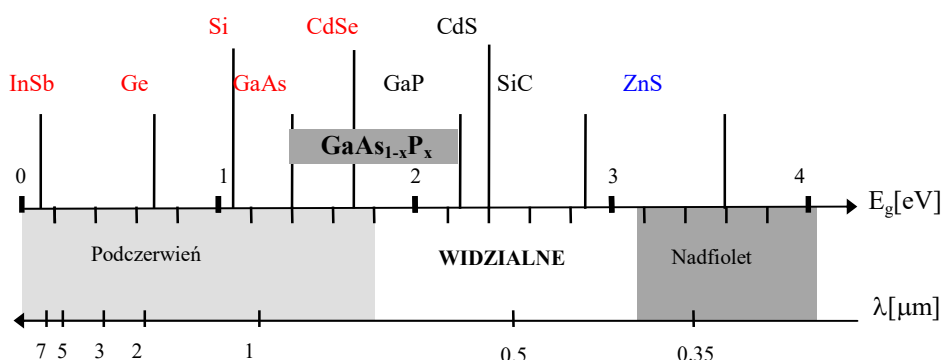


Podstawy elektroniki

- Rekombinacja promienista może obejmować zarówno procesy rekombinacji pośredniej jak i bezpośredniej

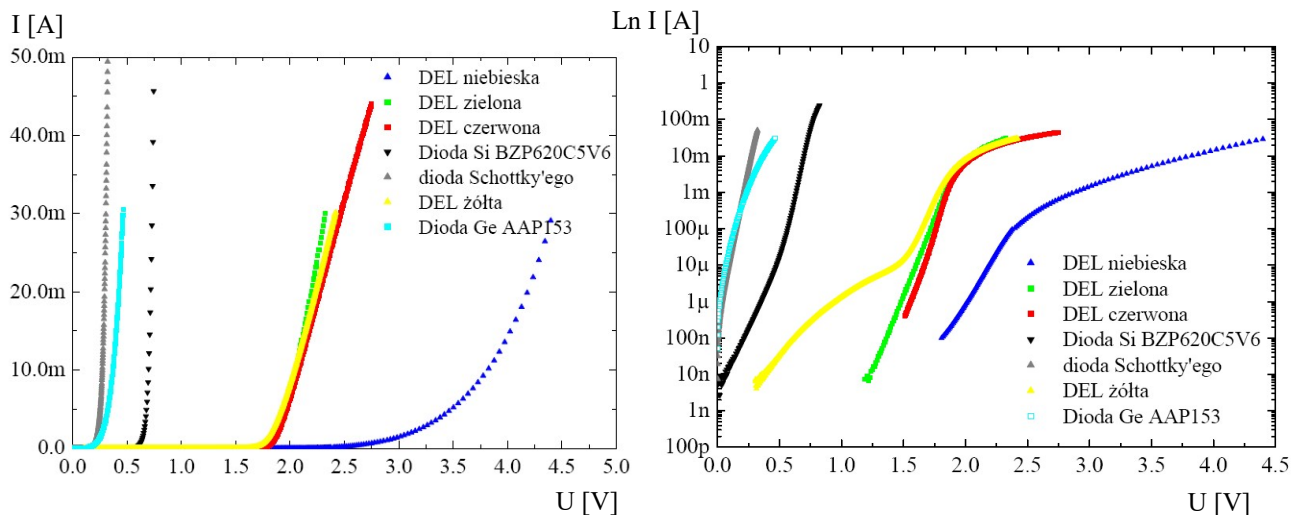


- Wśród fotonów emitowanych przy rekombinacji, np. w GaAs, występują jedynie niewielkie odchyłki od pewnych podstawowych długości fali, światło jest więc w zasadzie czystą barwą typową dla danego materiału. Występuje duże zróżnicowanie szerokości przerwy zabronionej, a więc i długości fali emitowanego promieniowania – od 3,6 eV (ZnS) do 0,18 eV (InSb).



- Istnieje możliwość „płynnej” regulacji przerwy energetycznej poprzez stosowanie różnych ich składów procentowych w arseno-fosforku-galu $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$. Zwiększanie zawartości fosforu od 0 do 44% daje zmianę szerokości przerwy energetycznej w zakresie 1,43 eV (GaAs) do 2,26 eV, i zmianę długości fali promieniowania od podczerwieni ($x = 0$) do czerwonej części światła widzialnego ($x = 44\%$).
- Wprowadzenie atomów domieszki $\Rightarrow$ dodatkowe poziomy w obszarze pasma zabronionego $\Rightarrow$ zróżnicowanie długości fal emitowanego promieniowania. Przykład: GaP, $E_g = 2,26$ eV, płytkie donory – Te, S, Se tworzą poziomy odległe od E_c o ok. 0,1 eV, a akceptory typu Zn, Cd poziomy bliskie E_v . Rekombinacji z tych poziomów doprowadzi do emisji fotonu odpowiadającego barwie zielonej. Głębsze domieszki: np. cynk Zn i para Zn-O daje różnicę energii 1,8 eV i promieniowanie barwy czerwonej.
- Czas od chwili podania impulsu prądu płynącego przez złącze do wyemitowania promieniowania zazwyczaj rzędu 10^{-9} s, częstotliwość modulacji promieniowania przez diody LED może dochodzić do setek MHz. W celu zmniejszenia absorpcji promieniowania (zwiększenia sprawności) minimalizuje się grubość „górnej” warstwy domieszki. By zlikwidować wewnętrzne odbicie od górnej, płaskiej powierzchni półprzewodnika: półsferyczne powierzchnie (technologicznie trudne) lub czasza ze szkła lub plastyku (stąd spotykane w handlu kształty). Generalnie LED-y wymagają stosunkowo niewielkich prądów (mA) i napięć zasilających (1-5V), są trwałe, stabilne i o małym stopniu zawadności.

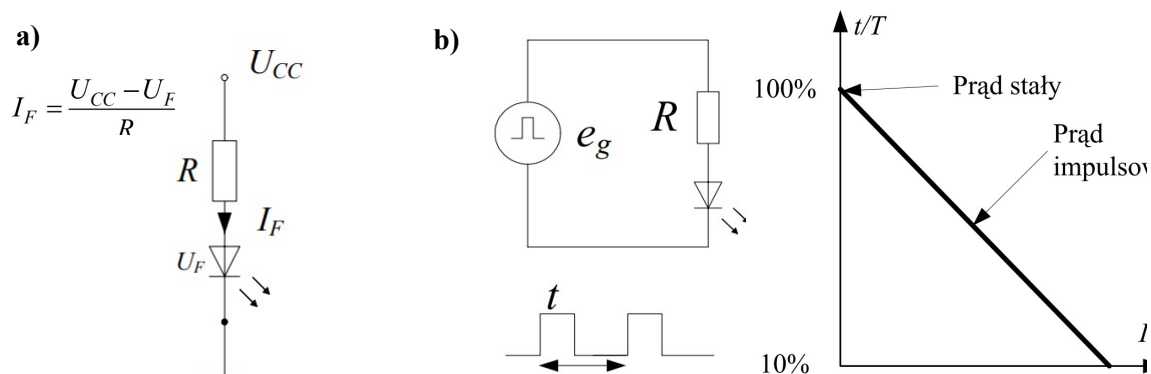
Podstawy elektroniki



- Zmierzone charakterystyki prądowo napięciowe dla złącz $p-n$ wykonanych z materiałów charakteryzujących się prostą przerwą energetyczną wykazują większe wartości napięcia dyfuzyjnego U_D w odniesieniu do rozważanych wcześniej złącz $p-n$ ze skrośną przerwą energetyczną. Wykresy w.w. charakterystyk sporządzone w skali logarytmicznej pokazują też większy wpływ dużego poziomu wstrzykiwania oraz rezystancji szeregowej na ich przebieg.

1. 13. Praktyczne wykorzystanie diody LED

Sterowanie diodami LED odbywa się poprzez proste układy elektroniczne, których przykładowe realizacje ilustrują rysunki poniżej:



Układ oznaczony jako **a)** umożliwia sterowanie jasnością świecenia diody poprzez dobór odpowiedniej wartości rezystora R decydującego o wielkości przepływającego prądu stałego, natomiast w układzie **b)** ten sam efekt jest osiągnięty przez zmianę szerokości impulsu t zmiennego napięcia sterującego.