

## **13. Podstawowe elementy półprzewodnikowe**

### **Wstęp**

Półprzewodnikowe elementy i przyrządy elektroniczne, stanowią jedną z najistotniejszych grup elementów, bez której byłby niemożliwy szybki rozwój elektroniki sygnałowej i energoelektroniki. W elektronice sygnałowej przełomowe znaczenie mają lata 1961, 1965, 1971 kiedy to kolejno uruchomiono na skalę przemysłową produkcję cyfrowych układów scalonych, wzmacniaczy operacyjnych oraz mikroprocesorów. Szybki rozwój energoelektroniki zainicjowało opracowanie wielowarstwowych struktur elementów półprzewodnikowych. W 1957 roku zbudowano tyrystor, a w 1982 tranzystor bipolarny z izolowaną bramką (IGBT-Insulated Gate Bipolar Transistor).

Zakres tematyczny niniejszego wykładu obejmuje klasyfikację powszechnie stosowanych przyrządów półprzewodnikowych według ogólnie przyjętych kryteriów podziału oraz zawiera omówienie właściwości, podstawowych parametrów i charakterystyk roboczych elementów półprzewodnikowych bezzłączowych o efekcie objętościowym (rezystor półprzewodnikowy, termistor, warystor, fotorezystor, piezorezystor, magnetorezystor, hallotron, rezonator piezoelektryczny) i efekcie powierzchniowym (tranzystor unipolarny z izolowaną bramką) oraz elementów jednozłączowych (różnego rodzaju diody) i wielozłączowych (tyrystor, diak, triak).

### **13.1. Klasyfikacja przyrządów półprzewodnikowych**

Przyrządy półprzewodnikowe klasyfikujemy przyjmując różne kryteria podziału. Przykład takiej wielokryterialnej klasyfikacji przedstawiono w tabeli 13.1.

Tabela 13.1. Kryteria klasyfikacji przyrządów półprzewodnikowych i przykłady elementów

Kryterium	Przykład
Obszar determinujący właściwości	<b>Elementy objętościowe</b> , np. termistor <b>Elementy powierzchniowe</b> , np. tranzystor MOSFET
Liczba złączy	<b>Elementy bezzłączowe</b> , np. tranzystor MOSFET <b>Elementy złączowe</b> , np. dioda
Obszar stosowania	<b>Sensory</b> , np. termistor, hallotron <b>Wskaźniki</b> , np. dioda elektroluminescencyjna <b>Elementy wykonawcze</b> , np. tranzystor, tyrystor
Liczba zacisków	<b>Dwubiegunniki</b> , np. dioda <b>Wielobiegunniki</b> , np. tranzystor, tyrystor
Sterowalność	<b>Elementy niesterowalne</b> , np. rezystor, dioda <b>Elementy sterowalne ciągłe</b> , np. tranzystor <b>Elementy sterowalne dyskretne</b> , np. tyrystor
Monotoniczność charakterystyki prądowo-napięciowej	<b>Elementy z charakterystyką monotoniczną</b> , np. dioda <b>Elementy z ujemną rezystancją dynamiczną</b> , np. tyrystor

Przyjmując jako kryterium liczbę złączy półprzewodnikowych przyrządy półprzewodnikowe dzielimy na **bezzłączowe**, **jednozłączowe** i **wielozłączowe**, a ze względu na liczbę wyprowadzeń na **dwu-**, **trój-** i **wielozaciskowe** (tzw. wielobiegunniki).

Ze względu na obszar, w którym zachodzą zjawiska fizyczne decydujące o właściwościach elektrycznych przyrządy półprzewodnikowe dzielimy na takie, w których występują **efekty objętościowe** (decydują zjawiska zachodzące w całej objętości materiału półprzewodnikowego) i takie, w których występują **efekty powierzchniowe** (decydują zjawiska zachodzące na powierzchni materiału półprzewodnikowego).

Przyjmując jako kryterium możliwość wzmacniania sygnałów przyrządy półprzewodnikowe dzielimy na **pasywne** (tłumią sygnały) i **aktywne** (umożliwiają wzmacnianie sygnałów).

Ze względu na możliwość zmiany stanu pracy elementu przyrządy półprzewodnikowe dzielimy na **sterowalne** i **niesterowalne**, a z punktu widzenia energetycznego na **przyrządy małej mocy** (sygnałowe) i **dużej mocy** (do pracy w układach energoelektronicznych).

### 13.2. Elementy bezzłączowe

Elementy półprzewodnikowe bezzłączowe można podzielić na dwie grupy:

- elementy o efekcie objętościowym,
- elementy o efekcie powierzchniowym.

Do grupy elementów o efekcie objętościowym zalicza się między innymi: rezystory półprzewodnikowe, termistory, warystory, fotorezystory, piezorezystory, magnetorezystory, hallotrony, rezonatory piezoelektryczne.

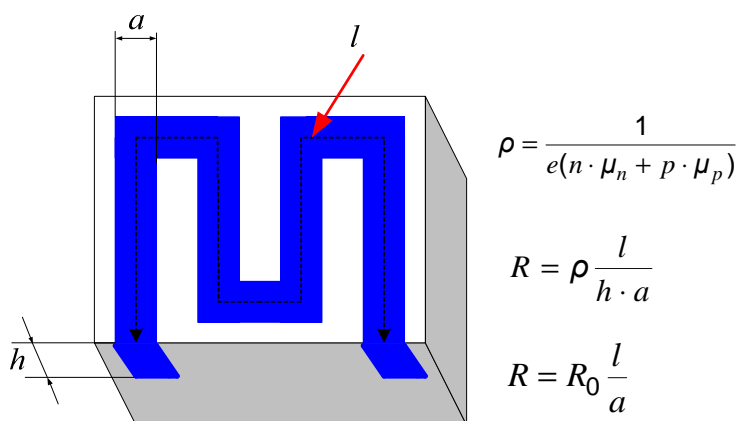
Elementami o efekcie powierzchniowym są tranzystory z izolowaną bramką.

### 13.2.1. Rezystor półprzewodnikowy

Jest to jeden z podstawowych elementów każdego monolitycznego układu scalonego. Ponieważ rezystywność półprzewodnika  $\rho$  odpowiednio domieszkowanego akceptorowo i donorowo jest opisana zależnością

$$\rho = \frac{1}{e(n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p)} \quad (13.1)$$

to jej wartość może być w czasie procesu technologicznego odpowiednio uformowana przez dobór koncentracji i rozkładu odpowiednich domieszek. W ten sposób w warstwie półprzewodnika samoistnego o dużej rezystywności (rys. 13.1) można wytworzyć ścieżkę o wymaganej konduktancji (przewodności elektrycznej).



Rys. 13.1. Rezystor półprzewodnikowy

Jeżeli ścieżka ma wymiary długość –  $l$ , szerokość –  $a$  oraz grubość –  $h$  to rezystancja warstwowego rezystora półprzewodnikowego jest równa:

$$R = \rho \frac{l}{h \cdot a} \quad (13.2)$$

Grubość  $h$  ścieżki rezystora wykonanego w konkretnym procesie technologicznym jest praktycznie stała, zatem:

$$R = R_0 \frac{l}{a},$$

gdzie  $R_0 = \frac{\rho}{h}$  oznacza rezystywność powierzchniową warstwy.

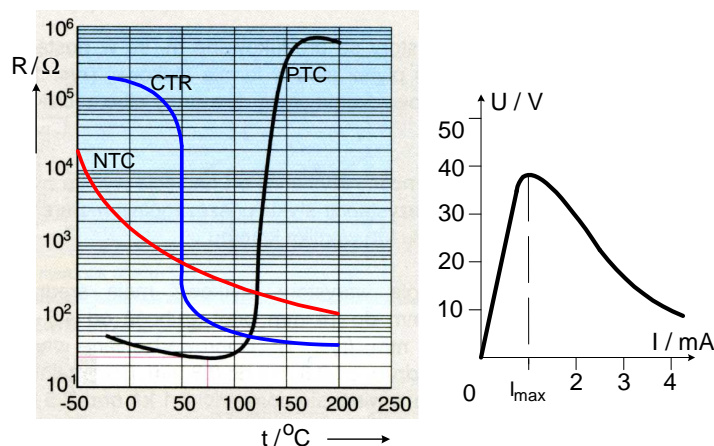
Rezystancja rezystora zależy głównie od rezystywności  $\rho$ , długości  $l$  i szerokości  $a$  wykonanej ścieżki, a wartość  $R_0$  jest stała dla danego procesu technologicznego i w zależności od domieszkowania waha się w zakresie  $50 \div 250 \, \Omega$ .

Istotne znaczenie praktyczne ma także kształt ścieżki. Często rezystory półprzewodnikowe wykonuje się w postaci meandra co pozwala ograniczyć powierzchnię, którą zajmują oraz zmniejszyć ich indukcyjność własną.

### 13.2.2. Termistor

Termistor to element półprzewodnikowy, w którym rezystancja zmienia się w zależności od temperatury. Wyróżnia się trzy podstawowe typy termistorów:

- termistory o ujemnym współczynniku temperaturowym rezystancji NTC (ang. Negative Temperature Coefficient),
- termistory o dodatnim współczynniku temperaturowym rezystancji PTC (ang. Positive Temperature Coefficient),
- termistory o skokowej zmianie rezystancji CTR (ang. Critical Temperature Resistor).



Rys. 13.2. Charakterystyki termistorów NTC, PTC oraz CTR

Rezystancja termistora NTC zmniejsza się ze wzrostem temperatury zgodnie z zależnością

$$R_T = A \cdot e^{\frac{B}{T}} \quad (13.3)$$

gdzie A i B stałe materiałowe, T temperatura bezwzględna (K).

W praktyce najczęściej znana jest jedynie znamionowa rezystancja termistora podana dla wzorcowej temperatury  $t_0 = 25^\circ\text{C}$  dlatego korzystniej jest wyrugować ze wzoru stałą A. Ponieważ

$$R_{T0} = A \cdot e^{\frac{B}{T_0}} \quad (13.4)$$

to po wyliczeniu A i wstawieniu do zależności 13.3 otrzymuje się

$$R_T = R_{T0} \cdot e^{\left(\frac{B}{T} - \frac{B}{T_0}\right)} \quad (13.5)$$

Temperaturowy współczynnik rezystancji termistora definiowany jako:

$$d_T \left[ \frac{\%}{^\circ\text{C}} \right] = \frac{1}{R_T} \frac{dR_T}{dT} \cdot 100\% \quad (13.6)$$

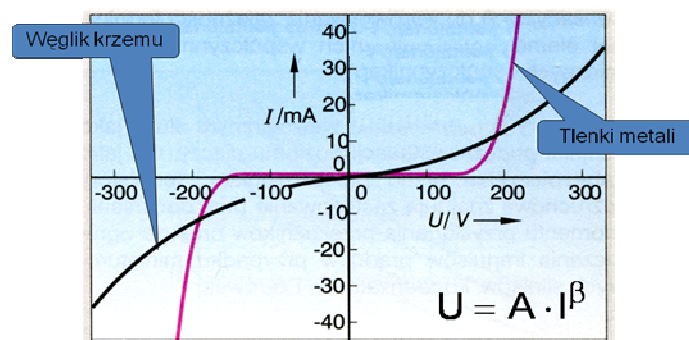
dla termistorów typu NTC jest ujemny i zawiera się w przedziale wartości od -3,5 do -6.

Charakterystyka prądowo-napięciowa termistora NTC (rys. 13.2.) jest nieliniowa. Tylko w zakresie małych prądów przebiega liniowo (tak jak w zwykłym liniowym rezystorze), ale już dla prądów większych od  $I_{\max}$ , pomimo zwiększenia wartości prądu płynącego przez termistor NTC napięcie na jego zaciskach zmniejsza się. Jest to efekt samo-podgrzewania się elementu, które powoduje zmniejszanie się jego rezystancji.

Termistory stosuje się jako czujniki temperatury w układach termoregulacji, w klimatyzacji, chłodnictwie, wentylacji oraz innych układach automatycznej regulacji.

### 13.2.3. Warystor

Warystor często nazywany rezystorem **VDR** (ang. Voltage Dependent Resistor). Jego rezystancja zmniejsza się, gdy napięcie na zaciskach rośnie.



Rys. 13.3. Charakterystyka prądowo-napięciowa warystora wykonanego z węglika krzemu i warystora tlenkowego

Charakterystyka prądowo-napięciowa warystora (rys. 13.3.) może być opisana zależnością

$$U = A \cdot I^\beta \quad (13.7)$$

gdzie:

$A$  – stała materiałowa,  $\beta$  – współczynnik nieliniowości

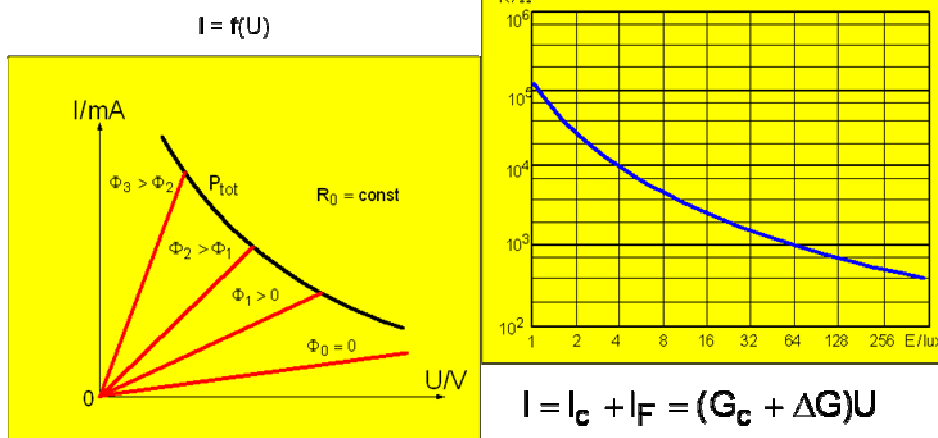
Stałe  $A$  i  $\beta$  zależą od rodzaju materiału półprzewodnikowego, technologii wykonania i rodzaju warystora. W praktyce warystory mają konstrukcję walcową lub dyskową i są stosowane do ochrony przepięciowej, ograniczania i stabilizacji napięcia oraz w innych układach automatycznej regulacji.

Typowym parametrem warystora jest napięcie stabilizacji podawane dla określonej wartości prądu przewodzenia np. 1, 10, 100 mA. Ponadto podaje się dopuszczalną moc strat lub częściej energię impulsu prądu przepływającego przez warystor.

#### 13.2.4. Fotorezystor

Fotorezystor nazywany także rezystorem **LDR** (ang. Light Dependent Resistor) zmienia rezystancję pod wpływem światła (zarówno w zakresie promieniowania widzialnego jak i niewidzialnego).

$$R = f(E)$$



Rys. 13.4. Przykładowe charakterystyki fotorezystora

Poprzez oświetlanie fotorezystora powstają w nim dodatkowe nośniki ładunku, wskutek czego jego rezystancja maleje (rys. 13.4.). Tak zwana rezystancja ciemna (bez oświetlenia) jest zwykle równa kilka MΩ, zaś rezystancja jasna, przy określonym natężeniu oświetlenia jest zwykle mniejsza niż 1 kΩ.

Charakterystyki prądowo-napięciowe fotorezystora (rys. 13.4.) to pęk prostych przechodzących przez początek układu współrzędnych o nachyleniu zależnym od wartości strumienia świetlnego  $\Phi$ . Można je opisać równaniem

$$I = I_c + I_F = (G_c + \Delta G)U \quad (13.8)$$

gdzie:

- $I_c$  – prąd ciemny
- $I_F$  – prąd fotoelektryczny
- $G_c$  – konduktancja ciemna
- $\Delta G$  – przyrost konduktancji pod wpływem oświetlenia.

### 13.2.5. Piezorezystor

Piezorezystor to element, którego rezystancja zależy od siły nacisku, jaki wywierany jest w osi poprzecznej elementu. Piezorezystor często zastępuje, w przypadku niewielkich odkształceń, klasyczny tensometr wykonany ze stopu oporowego. Czułość piezorezystora jest definiowana jako

$$k = \frac{\frac{R}{R_0}}{\frac{l}{l_0}}, \quad (13.9)$$

gdzie:

- $R$  – rezystancja płytki po przyłożeniu siły,
- $R_0$  – rezystancja początkowa (bez działania siły)
- $l$  – długość płytki po przyłożeniu siły
- $l_0$  – początkowa długość płytki (bez działania siły)

Czułość piezorezystora jest bardzo duża 20-200, podczas gdy tensometr oporowy ma czułość tylko 2-6. Piezorezystory stosuje się jako czujniki w pomiarach sił oraz naprężeń statycznych i dynamicznych.

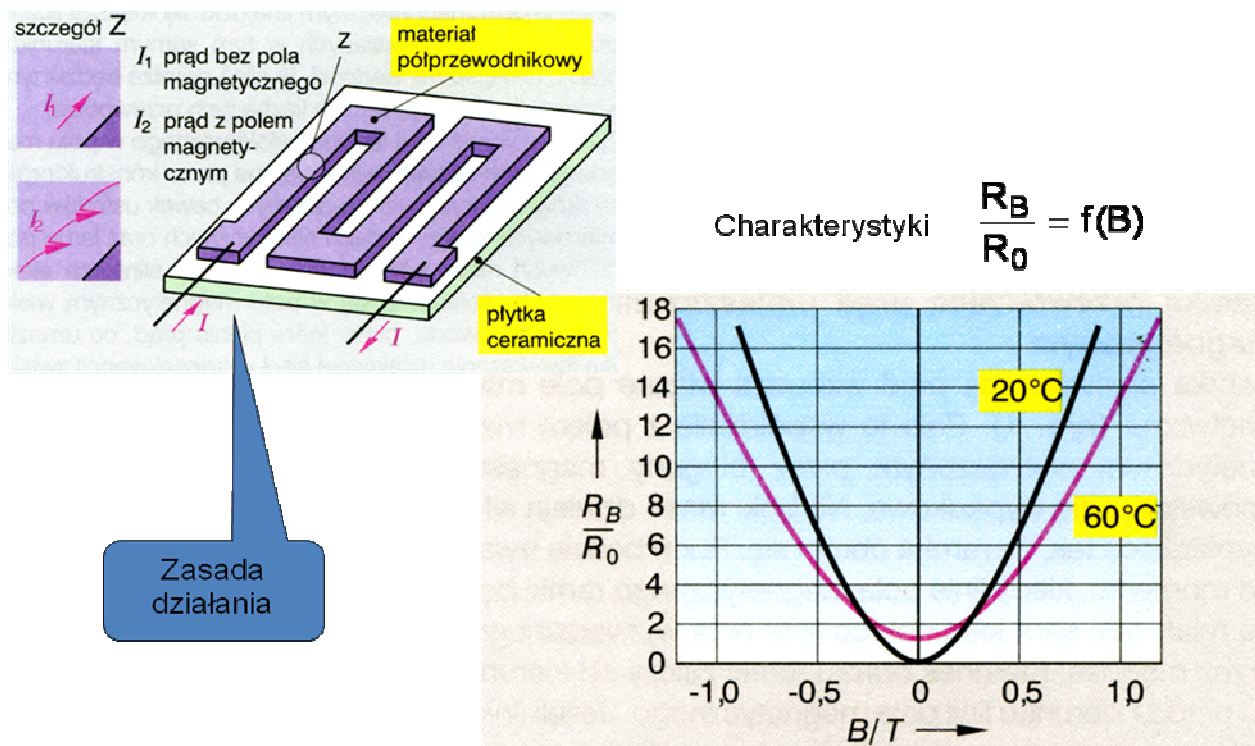
### 13.2.6. Magnetorezystor

Magnetorezystor nazywany także **gaussotronem** to rezystor o rezystancji zależnej od wartości natężenia pola magnetycznego, w którym go umieszczono. Zależność rezystancji od indukcji magnetycznej opisana jest funkcją:

$$R_B = R_0 \cdot \frac{\rho_B}{\rho_0} \cdot f(\mu, B, a, b) \quad (13.10)$$

gdzie:

- $R_0, \rho_0$  – rezystancja i rezystywność elementu przy  $B = 0$ ,
- $R_B, \rho_B$  – rezystancja i rezystywność elementu przy  $B \neq 0$ ,
- $f(\mu, B, a, b)$  – funkcja zależna od indukcji magnetycznej  $B$  i parametrów płytki: wymiarów  $a, b$  oraz ruchliwości nośników większościowych  $\mu$ .



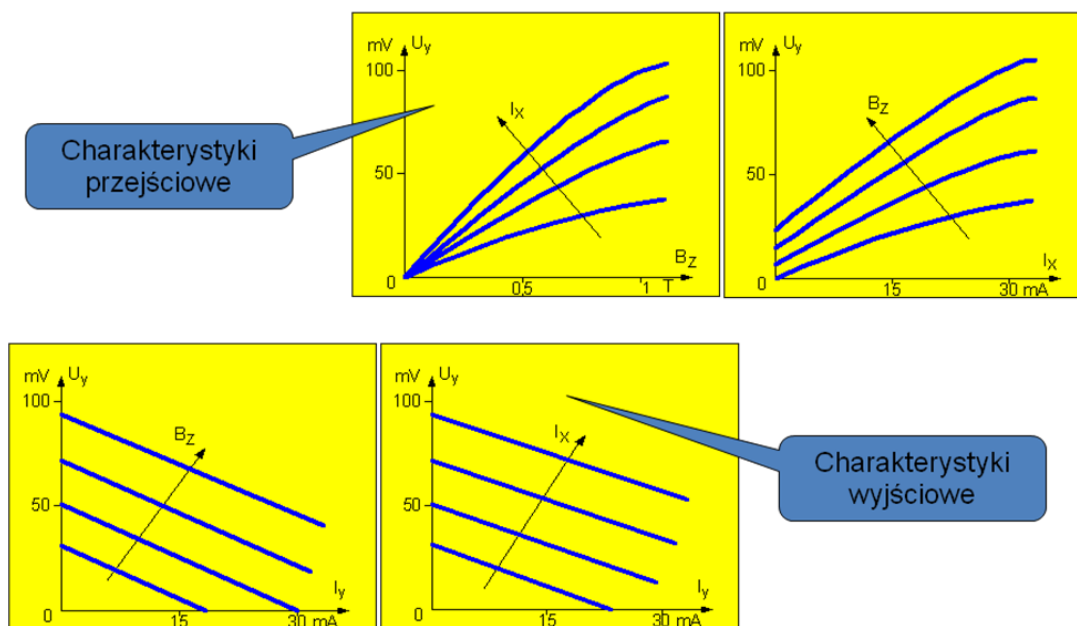
Rys. 13.5. Budowa i charakterystyki magnetorezystora

Podstawową charakterystyką magnetorezystora przedstawioną na rys. 13.5. jest zależność  $R_B = f(B)$ .

Magnetorezystory są wrażliwe na temperaturę co oznacza, że mają duży temperaturowy współczynnik rezystancji. Najczęściej nie należy przekraczać temperatury pracy płytki  $95^\circ\text{C}$ . Typowe zastosowanie magnetorezystorów to czujniki do pomiaru indukcji magnetycznej, mocy i skutecznej wartości prądów odkształconych.

### 13.2.7. Hallotron

Hallotроны są wykonane najczęściej w postaci płytek w kształcie krzyża z litych materiałów półprzewodnikowych lub z płytek mikowych z naparowanym półprzewodnikiem (Ge, InSb, InAs). Często wytwarza się je w technologii hybrydowych układów scalonych w jednej obudowie ze wzmacniaczem operacyjnym. Tego typu układy są szczególnie przydatne do pomiarów i badań pól magnetycznych, wielkości elektrycznych i nie elektrycznych oraz jako elementy mnożące i modulatory sygnałów wolnozmiennych. Właściwości elektryczne hallotyonu opisują rodziny charakterystyk statycznych: przejściowych i wyjściowych.

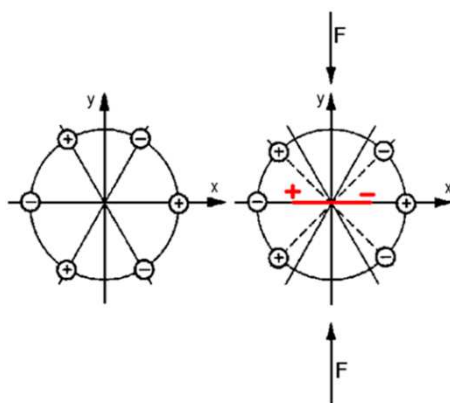


Rys. 13.6. Charakterystyki statyczne hallotronu

Charakterystyki statyczne przejściowe to funkcje zmian napięcia Halla  $U_y$  od parametru sterującego: poprzecznego pola magnetycznego  $B_z$  lub prądu przewodzenia  $I_x$ . Charakterystyki statyczne wyjściowe to funkcje zmian napięcia Halla  $U_y$  od prądu obciążenia  $I_y$  przy stałych parametrach sterujących  $B_z$ ,  $I_x$ . Przebieg odpowiednich charakterystyk przedstawiono na rys. 13.6.

### 13.2.8. Rezonator piezoelektryczny

W rezonatorach piezoelektrycznych występuje zjawisko piezoelektryczne. Zjawisko to jest zjawiskiem odwracalnym. Polega ono na tym, że w kryształach półprzewodnikowych występują jednocześnie zjawiska elektryczne i mechaniczne. Podczas odkształcania kryształu w kierunku osi  $y$  w osi  $x$  pojawia się napięcie elektryczne i odwrotnie przyłożenie napięcia w osi elektrycznej  $x$  spowoduje pojawienie się naprężenia mechanicznego i odkształcenie kryształu w osi mechanicznej  $y$ . Na rys. 13.7 pokazano działanie siły ściskającej  $F$ , deformację komórki sieci krystalicznej i przesunięcie jonów powodujące powstanie dipola elektrycznego. Podstawowym materiałem do budowy rezonatorów piezoceramicznych jest kwarc.



Rys. 13.7. Odkształcenie kryształu kwarcu pod wpływem siły  $F$  i powstanie dipola elektrycznego

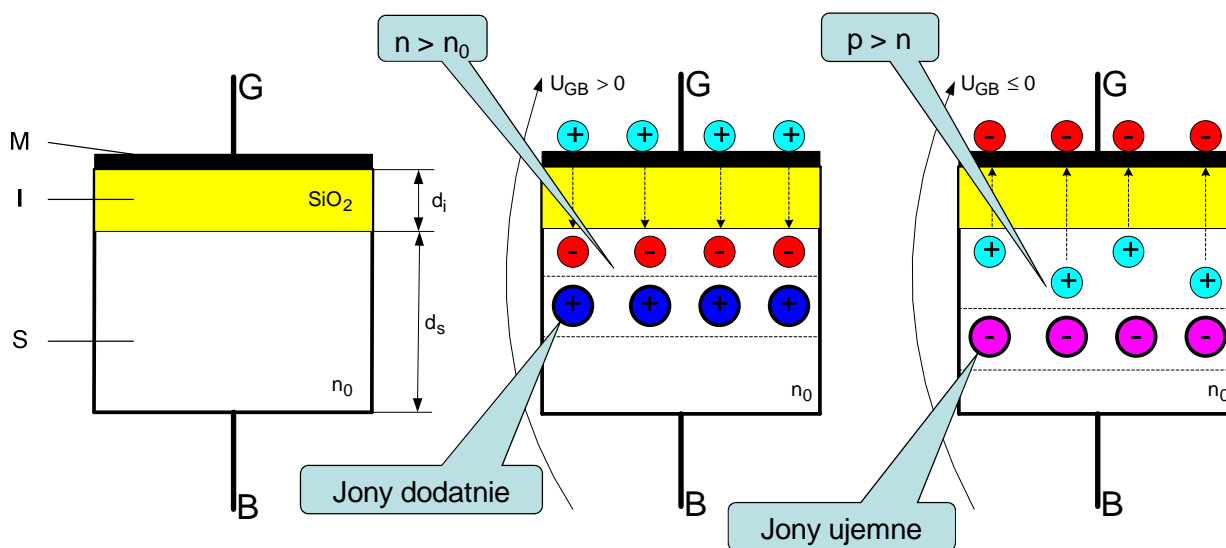
Jeżeli płytkę kwarcową jest zasilana napięciem zmiennym (powstaje zmienne pole elektryczne) o odpowiedniej częstotliwości to zaczyna ona drgać mechanicznie z częstotliwością rezonansową zależną od wymiarów geometrycznych i właściwości mechanicznych płytki. Amplituda drgań jest w tym wypadku znacznie większa od odkształceń jakie powstają, gdy częstotliwość napięcia zasilającego jest odstrojona od



częstotliwości rezonansowej płytki. Drgający rezonator kwarcowy można traktować jak obwód rezonansowy. Poza rezonansem stanowi kondensator o pojemności zależnej od wymiarów geometrycznych płytki oraz powierzchni metalizowanych wyprowadzeń. Cechą charakterystyczną rezonatorów piezoelektrycznych jest stałość częstotliwości drgań rezonansowych w pewnym zakresie temperatur oraz powolne zmiany starzeniowe, dlatego stosuje się je często do budowy generatorów sinusoidalnych i filtrów pasmowych.

### 13.3. Elementy bezzłączowe o efekcie powierzchniowym (polowym)

Na rys. 13.8 przedstawiono strukturę elementu składającego się z warstwy metalu, izolatora i odpowiednio domieszkowanego półprzewodnika. Taką strukturę nazywamy ogólnie **strukturą MIS** (ang. Metal-Insulator-Semiconductor). Do warstwy metalu (M), wykonanej najczęściej w postaci cienkiej warstwy napylonego aluminium dołączone jest wyprowadzenie zwane **bramką**, które powszechnie oznacza się literą G (ang. Gate). Warstwa izolatora (I) to najczęściej warstwa tlenku  $\text{SiO}_2$  o grubości  $d_i$  wytworzona na powierzchni półprzewodnika. Warstwa półprzewodnikowa (S) powszechnie zwana **podłożem** ma wyprowadzenie metaliczne oznaczone literą B (ang. Bulk), ma grubości  $d_s = 100\text{-}300\ \mu\text{m}$  i jest najczęściej wykonana z krzemu, samoistnego lub krzemu słabo domieszkowanego typu n lub typu p. W modelu przedstawionym na rys.13.8 jest to krzem typu n o koncentracji swobodnych elektronów  $n_0$ . Taką strukturę, w której oprócz krzemu odpowiednio domieszkowanego, w warstwie izolatora zastosowano tlenek krzemu nazywamy **strukturą MOS**, (ang. Metal-Oxide-Semiconductor).



Rys. 13.8. Element bezzłączowy o efekcie polowym, a) struktura MIS metal-izolator-półprzewodnik (ang. Metal-Insulator-Semiconductor), b) rozkład ładunku swobodnego w warstwie przypowierzchniowej przy dodatniej polaryzacji elektrod bramka-podłoże,  $U_{GB} > 0$ , c) rozkład ładunku swobodnego w warstwie przypowierzchniowej przy ujemnej polaryzacji elektrod bramka-podłoże,  $U_{GB} < 0$

Przykładając pomiędzy bramką i podłoże napięcie  $U_{GB}$  wytwarzamy wewnątrz warstwy półprzewodnikowej słabe pole elektryczne. Jeżeli dla uproszczenia przyjmiemy, że elektroda B ma potencjał zerowy, to napięcie  $U_{GB}$  będzie mogło mieć wartość dodatnią lub ujemną.

1. Jeżeli  $U_{GB} > 0$  to dodatnie pole elektryczne wnika do półprzewodnika i powoduje przyciąganie swobodnych nośników większościowych (w tym wypadku elektronów) do warstwy przypowierzchniowej i utworzenie w niej swobodnego ładunku przestrzennego ujemnego

o zwiększonej koncentracji  $n > n_0$ . W ten sposób powstaje kanał typu n. Pod warstwą kanału znajduje się przestrzeń półprzewodnika praktycznie pozbawiona ładunku swobodnego, w której tkwią nieruchome dodatnie jony sieci krystalicznej.

2. Zmniejszając napięcia  $U_{GB}$  od wartości dodatnich do zera zmniejszamy ładunek indukowany w warstwie przypowierzchniowej i koncentracja elektronów powraca do wartości  $n_0$ . Jeżeli nadal będziemy zmniejszać napięcie  $U_{GB}$  i będzie spełniony warunek  $U_{GB} < 0$ , z warstwy przypowierzchniowej będą wypierane swobodne ładunki większościowe (elektrony) i dominującą rolę zacznie w niej pełnić swobodny ładunek mniejszościowy, czyli dziury. Nastąpi wzrost koncentracji (wzbogacenie) dziur  $p > p_0$  w tej warstwie. W momencie, gdy  $p < n$  następuje zmiana znaku ładunku przestrzennego, czyli inwersja ładunku. W materiale półprzewodnika typu n powstaje **kanał typu p**.
3. Zmieniając typ półprzewodnika, z jakiego wykonano podłoże z  $n_0$  na  $p_0$  oraz kierunek napięcia  $U_{GB}$  otrzymamy odpowiednio do rys. 13.8.b kanał typu p lub odpowiednio do rys. 13.8.c **kanał typu n**.

Jak wynika z wcześniejszych rozważań głębokość wnikania pola elektrycznego w materiał półprzewodnika, a zatem zarówno grubość warstwy inwersyjnej jak i ładunek elektryczny w niej zgromadzony, zależą od wartości napięcia  $U_{GB}$ . Zatem pojemność elektryczna tej warstwy może być obliczona z zależności:

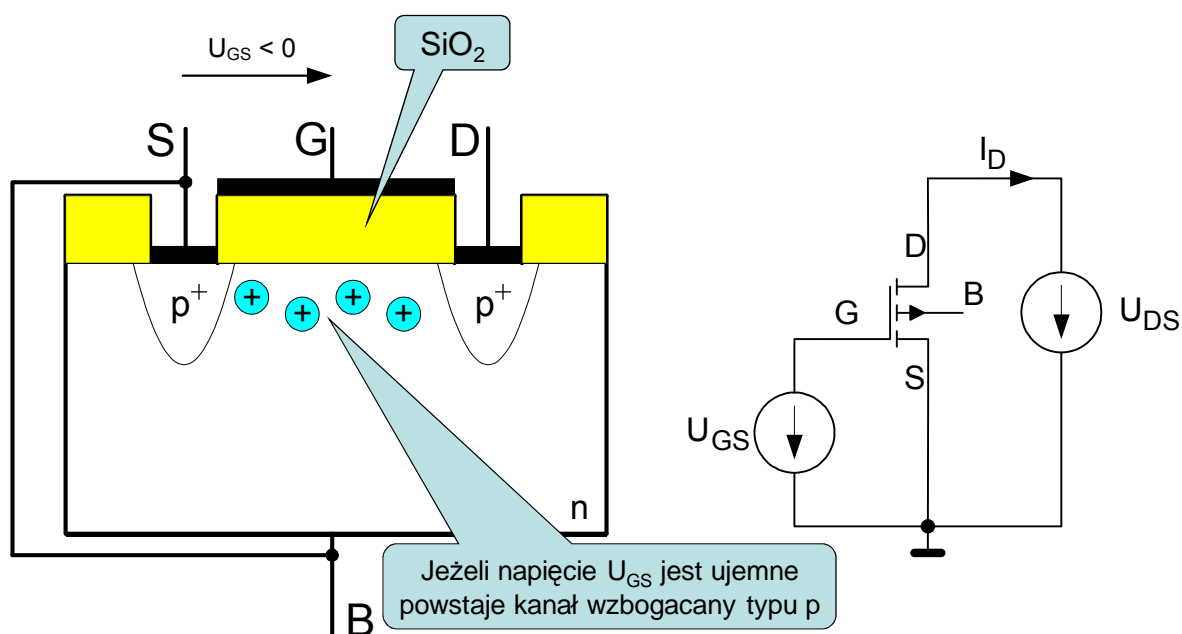
$$C_s = \frac{dQ_s}{dU_{GB}} \quad (13.11)$$

Jak wynika z rys. 13.8. pojemność  $C_s$  jest połączona szeregowo ze stałą pojemnością warstwy dielektryka  $C_i$ , której wartość zależy od rozmiarów geometrycznych struktury i stałej elektrycznej dielektryka ( $SiO_2$ ). Wypadkowa pojemność jest zatem równa:

$$C = \frac{C_i \cdot C_s(U_{GB})}{C_i + C_s(U_{GB})} \quad (13.12)$$

### 13.3.1. Tranzystor unipolarny z izolowaną bramką

Jeżeli strukturę przedstawioną na rys.13.8. uzupełnić dwoma obszarami półprzewodnika typu  $p^+$  bardzo silnie domieszkowanymi (znak + oznacza silne domieszkowanie) to po wytworzeniu w tej strukturze przypowierzchniowej warstwy inwersyjnej ( $U_{GB} < 0$ ) będzie utworzony pomiędzy tymi obszarami kanał typu p o tym samym typie przewodnictwa co domieszkowane obszary (rys.13.9). W ten sposób powstaje wzbogacany kanał typu p, przez który może płynąć prąd i w którym swobodnymi nośnikami ładunku są dziury. Rezystancja tak utworzonego kanału będzie zależała od jego rozmiarów geometrycznych i koncentracji swobodnych nośników (w tym wypadku mniejszościowych - dziur) i będzie znacznie mniejsza od rezystancji podłoża. Oczywiście koncentracja nośników swobodnych w kanale inwersyjnym zależy od natężenia wytworzonego pola elektrycznego.



Rys. 13.9. Tranzystor MOSFET z kanałem wzbogacanym typu p

Natężenie pola elektrycznego w warstwie przypowierzchniowej, a co za tym idzie także koncentrację nośników i w konsekwencji rezystancję kanału zmienia się przez zmianę napięcia  $U_{GB}$ . Można zatem powiedzieć, że rezystancja kanału jest sterowana natężeniem pola elektrycznego lub krótko polowo.

Przedstawiony na rys. 13.9. element nazywamy tranzystorem unipolarnym z izolowaną bramką z kanałem typu p, wzbogacanym.

Oczywiście można wytworzyć strukturę tranzystora z kanałem typu p, zubożanym, jeżeli na rys. 13.9 materiał podłoża B zostanie zamieniony na półprzewodnik typu p. W tym przypadku dziury są wypychane z warstwy kanału przez pole elektryczne przy dodatniej polaryzacji elektrod bramka-podłoże  $U_{GB} > 0$

Jeżeli w przedstawionej na rys. 13.9. strukturze, dodatkowe obszary będą wykonane z półprzewodnika typu  $n^+$ , a podłoże z półprzewodnika typu n to wytworzona w ten sposób struktura to tranzystor z kanałem typu n zubożanym, albo z półprzewodnika typu p i wtedy wytworzona struktura to **tranzystor z kanałem typu n wzbogacanym**.

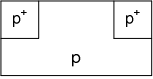
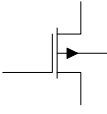
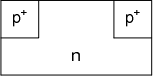
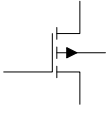
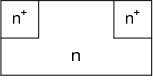
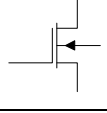
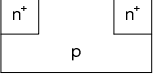
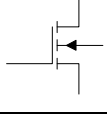
Tranzystory unipolarne bezzłączowe, do których zaliczamy tranzystory z izolowaną bramką, oznacza się angielskim skrótem **IGFET** (ang. Insulated-Gate-Field-Effect-Transistor) lub w przypadku, kiedy dielektrykiem jest tlenek krzemu **MOSFET** (ang. Metal-Oxide-Semiconductor-Field-Effect-Transistor). Elektrody stanowiące wyprowadzenia z dodatkowych bardzo silnie domieszkowanych obszarów nazywamy drenem **D** (ang. Drain) i źródłem **S** (ang. Source). Taka struktura jest symetryczna i dlatego przypisanie poszczególnym elektrodom funkcji drenu i źródła jest umowne. Najczęściej źródło i podłoże są ze sobą połączone (przyjmuje się, że mają potencjał zerowy), a zatem napięciem sterującym tranzystor jest napięcie  $U_{GS}$ . Dla opisanej wyżej struktury tranzystora **MOSFET z kanałem typu p, zubożanym** warunkiem koniecznym do tego, aby można było sterować rezystancją kanału jest  $U_{GS} < 0$  V. Ponadto przyjmuje się, chociaż teoretycznie nie ma to znaczenia, że napięcie  $U_{DS}$  jest także ujemne. Napięcie  $U_{GS}$ , przy którym kanał inwersyjny zaczyna przewodzić prąd drenu nazywa się napięciem progowym  $U_P$ .

W strukturach tranzystorów z kanałem zubożanym poprzez dyfuzję lub implantację jonów do podłoża wytwarza się w tranzystorze specjalnie przewodzący kanał. Taki tranzystor przy  $U_{DS} \neq 0$  V nawet przy napięciu  $U_{GS} = 0$  V będzie

przewodził prąd drenu. W tym przypadku, aby wstrzymać przepływ prądu należy wytworzyć pole zubożające kanał wbudowany. Napięcie  $U_{GS}$ , przy którym kanał przestaje przewodzić prąd nazywa się napięciem odcięcia i dla uproszczenia oznaczmy go podobnie jak napięcie progowe symbolem  $U_p$ .

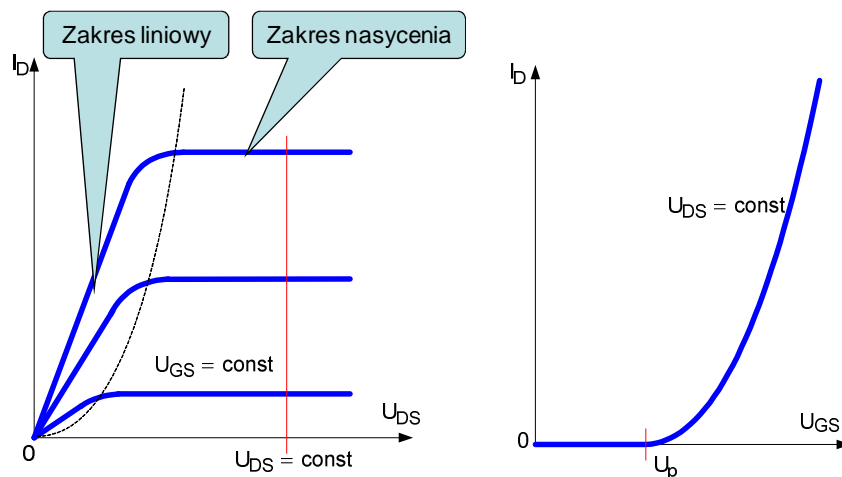
W tabeli 13.2. Przedstawiono struktury, symbole oraz prawidłową polaryzację napięcia sterującego  $U_{GS}$  czterech podstawowych typów tranzystorów MOSFET

Tabela 13.2. Podstawowe typy tranzystorów MOSFET

Schemat struktury	Rodzaj tranzystora	Symbol	Prawidłowa polaryzacja napięcia $U_{GS}$
	kanał typu p, zubożany		$U_{GS} > 0$
	kanał typu p, wzbogacany		$U_{GS} < 0$
	kanał typu n, zubożany		$U_{GS} < 0$
	kanał typu n, wzbogacany		$U_{GS} > 0$

### 13.3.2. Charakterystyki prądowo-napięciowe tranzystora MOSFET

Do opisu wszystkich tranzystorów unipolarnych stosujemy dwie rodziny charakterystyk prądowo-napięciowych (rys.13.10.):



Rys.13.10. Podstawowe charakterystyki tranzystora unipolarnego

1. Charakterystyki wyjściowe

$$I_D = f(U_{DS}) \Big|_{U_{GS}=const} \quad (13.13)$$

2. Charakterystyki przejściowe (bramkowe lub sterowania)

$$I_D = f(U_{GS}) \Big|_{U_{DS}=const} \quad (13.14)$$

Rodzina charakterystyk wyjściowych ma taki sam przebieg dla tranzystorów z kanałem wzbogaconym jak i zubożonym. Dla małych wartości napięcia  $U_{DS}$  charakterystyka jest praktycznie liniowa, prąd drenu  $I_D$  rośnie w przybliżeniu proporcjonalnie do napięcia  $U_{DS}$ , a nachylenie charakterystyki tzn. wartość rezystancji kanału można zadawać napięciem  $U_{GS}$ .

W zakresie linowości dla napięć  $U_{DS}$  spełniających warunek  $U_{DS} < (U_{GS} - U_p)$  (linia przerywana na rys. 13.10) rodzinę charakterystyk wyjściowych można opisać równaniem:

$$I_D = \frac{I_{DSS}}{U_p^2} [2(U_{GS} - U_p)U_{DS} - U_{DS}^2] \quad (13.15)$$

Prąd  $I_{DSS}$  jest parametrem tranzystora i oznacza prąd drenu dla tranzystorów z kanałem zubożonym przy  $U_{GS} = 0$  V, a dla tranzystorów z kanałem wzbogaconym przy  $U_{GS} = 2U_p$ .

Omawiany wyżej zakres pracy tranzystora nazywa się liniowym. Spotyka się również inne nazwy: zakres nienasycenia lub zakres pracy triodowej. W **zakresie liniowym** pracy tranzystor unipolarny można zawsze potraktować jak element rezystancyjny sterowany napięciem. Wymaganą wartość rezystancji, tzn. nachylenie charakterystyki wyjściowej, zadaje się ustawiając odpowiednie napięcie  $U_{GS}$ . Natężenie prądu drenu  $I_D$  jest w tej sytuacji proporcjonalne do napięcia  $U_{DS}$ .

Charakterystyka wyjściowa powyżej napięcia  $U_{DS} > (U_{GS} - U_p)$  obejmuje zakres pracy tranzystora w stanie nasycenia, zwany również zakresem pentodowym. W tym zakresie prąd drenu  $I_D$  praktycznie nie zależy od napięcia  $U_{DS}$ , a tylko od napięcia  $U_{GS}$  i jest opisany równaniem:

$$I_D = I_{DSS} \left( 1 - \frac{U_{GS}}{U_p} \right)^2 \quad (13.16)$$

Nieznaczną zależność prądu  $I_D$  od napięcia  $U_{DS}$  w tym zakresie charakteryzuje **dynamiczna rezystancja wyjściowa**  $r_{DS}$  definiowana przy napięciu  $U_{GS} = \text{const}$  jako:

$$r_{DS} = \frac{\partial U_{DS}}{\partial I_D} \Big|_{U_{GS} = \text{const}} \quad (13.17)$$

Rodzina charakterystyk bramkowych zwanych również przejściowymi tranzystorów unipolarnych opisana jest wzorem 13.16.

Z charakterystyki bramkowej można wyznaczyć istotny z punktu widzenia wzmocnienia sygnałów elektrycznych parametr tranzystora tzw. **transkonduktancję**  $g_m$  lub inaczej nachylenie charakterystyki bramkowej  $S$

$$g_m = S = \frac{\partial I_D}{\partial U_{GS}} \Big|_{U_{DS} = \text{const}} \quad (13.18)$$

Ze względu na kształt charakterystyki bramkowej tranzystory z izolowaną bramką z kanałem zubożonym można zliczyć do grupy tranzystorów normalnie załączonych, tzn. takich, które przy  $U_{DS} \neq 0$  i  $U_{GS} = 0$ , przewodzą prąd drenu, a tranzystory z kanałem wzbogaconym będą należały do grupy tranzystorów normalnie wyłączonych, tzn. takich, które w tych samych warunkach zasilania co tranzystory z kanałem zubożonym ( $U_{DS} \neq 0$  V i  $U_{GS} = 0$  V) nie przewodzą prądu drenu.

### 13.4. Elementy jednozłączowe

W elementach jednozłączowych stosuje się:

- złącza półprzewodnikowe p-n

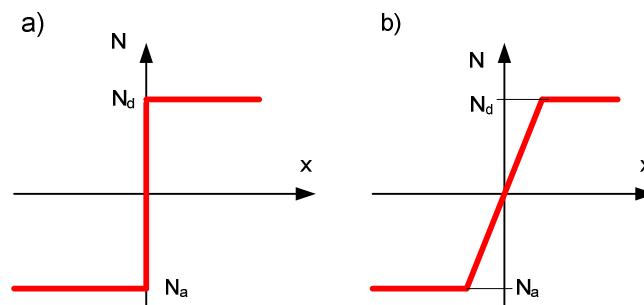
- złącza metal-półprzewodnik m-s

### 13.4.1. Złącze półprzewodnikowe

Złączem półprzewodnikowym p-n nazywamy obszar na styku dwóch materiałów półprzewodnikowych o różnym typie przewodnictwa:

- p - dziurowego (akceptorowego)
- n - elektronowego (donorowego).

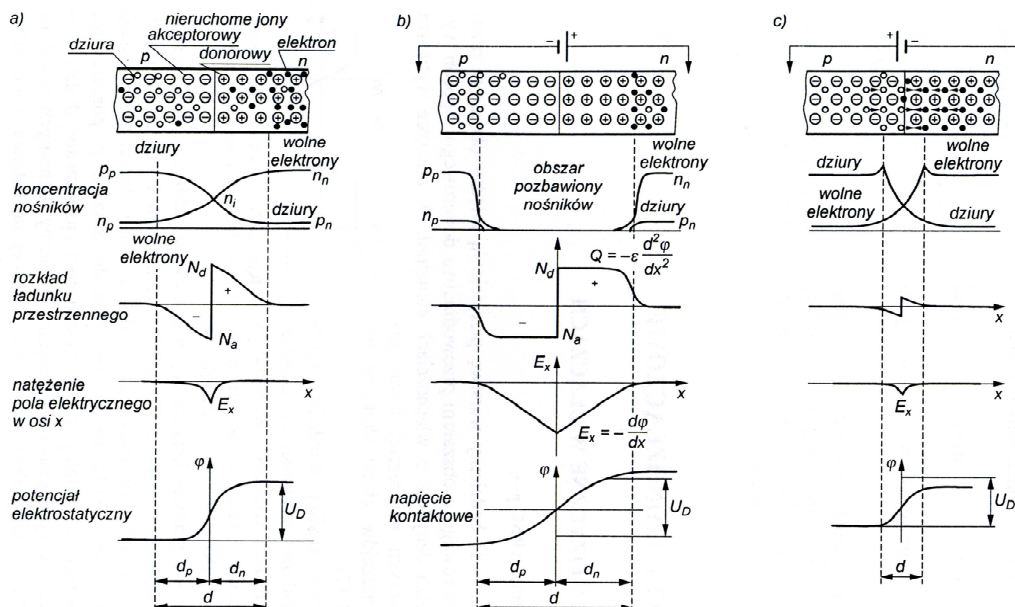
Technologia wykonania złącza determinuje charakterystyczne jego cechy i decyduje o właściwościach całego przyrządu półprzewodnikowego. Najczęściej przyjmuje się, że wytwarzane złącza są skokowe lub liniowe (rys. 13.11.). W zależności od zewnętrznej polaryzacji złącze p-n stanowi w obwodzie przerwę izolacyjną lub przewodzi prąd.



Rys.13.11. Rozkład domieszek donorowych i akceptorowych w obszarze złącza, a) złącze skokowe, b) złącze liniowe

Można wyróżnić trzy podstawowe stany pracy złącza półprzewodnikowego (rys. 13.12.):

- Brak polaryzacji zewnętrznej
- Polaryzacja wsteczna
- Polaryzacja w kierunku przewodzenia



Rys.13.12. Stany pracy złącza półprzewodnikowego, a) brak polaryzacji zewnętrznej, b) polaryzacja wsteczna, c) polaryzacja w kierunku przewodzenia

Zmiany koncentracji nośników oraz rozkład ładunku przestrzennego, natężenia pola elektrycznego i potencjału w obszarze płaskiego dwuwymiarowego modelu złącza skokowego dla różnych stanów pracy przedstawiono również na rys.13.12.

Nawet przy braku polaryzacji złącza na skutek ruchów cieplnych sieci krystalicznej półprzewodnika nośniki większościowe (elektrony z obszar typu n) przenikają do obszaru o przewodnictwie dziurowym typu p i stają się tam nośnikami mniejszościowymi, a nośniki większościowe (dziury z obszaru p) przenikają do obszaru typu n. W obszarze złącza następuje rekombinacja par elektron-dziura i w związku z tym w obszarze tym nie występują swobodne ładunki. W pobliżu obszaru złącza w półprzewodniku typu n pozostają praktycznie nieruchome jony dodatnie, a w materiale typu p nieruchome jony ujemne atomów siatki krystalicznej.

Te ładunki powodują, że na złączu wystąpi napięcie bariery potencjału lub krótko **bariera potencjału**, opisane wzorem

$$U_D = \frac{k \cdot T}{e} \ln \frac{N_a \cdot N_d}{n_i} = \frac{e}{2\epsilon} (N_d \cdot d_n^2 + N_a \cdot d_p^2) \quad (13.19)$$

gdzie:

k-stała Boltzmanna,

T-temperatura bezwzględna złącza,

e-ładunek elementarny,

$N_a$ -koncentracja domieszki akceptorowej,

$N_d$ -koncentracja domieszki donorowej,

$n_i$ -koncentracja ujemnego ładunku swobodnego (elektronów),

$\epsilon$ -przenikalność elektryczna półprzewodnika,

$d_n$ -szerokość bariery potencjału w materiale półprzewodnika typu n,

$d_p$ - szerokość bariery potencjału w materiale półprzewodnika typu p

Napięcie to zapobiega dalszemu przenikaniu ładunków przez obszar złącza. Warstwa ta staje się warstwą zaporową. Wychodząc z warunku równowagi ładunku w obszarze złącza

$$N_a \cdot d_p \cdot (-e) + N_d \cdot d_n \cdot e = 0 \quad (13.20)$$

można wyznaczyć **szerokość tej warstwy zaporowej** (szerokość złącza)

$$d = d_p + d_n = \sqrt{\frac{2\epsilon \cdot U_D \cdot (N_d + N_a)}{e \cdot N_d \cdot N_a}} \quad (13.21)$$

Warto zauważyć, że

$$\frac{d_n}{d_p} = \frac{N_a}{N_d} \quad (13.22)$$

co oznacza, że ładunek jonowy wnika głębiej w obszar słabiej domieszkowany.

Szerokość złącza jest funkcją napięcia bariery potencjału  $U_D$ . Przyjmując, że złącze ma powierzchnię S ładunki jonowe występujące po obu stronach złącza są sobie równe i zależą od bariery potencjału  $U_D$

$$Q_0 = S \cdot e \cdot d_n \cdot N_d = S \cdot e \cdot d_p \cdot N_a = S \sqrt{2e \frac{N_d \cdot N_a}{N_d + N_a} U_D} \quad (13.23)$$

Pojemność takiego niespolaryzowanego napięciem zewnętrznym złącza jest równa

$$C_{T0} = \frac{Q_0}{2U_D} \quad (13.24)$$

Po spolaryzowaniu złącza w kierunku zaporowym szerokość złącza zwiększa się

$$d = d_p + d_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon \cdot (U_D + U) \cdot (N_d + N_a)}{e \cdot N_d \cdot N_a}} \quad (12.25)$$

Złącze takie można traktować jak kondensator. Pojemność warstwy zaporowej jest w tym wypadku równa

$$C_T = \frac{dQ}{dU} = C_{T0} \sqrt{\frac{U_D}{U_D + U}} \quad (13.26)$$

Przy polaryzacji złącza w kierunku przewodzenia bariera potencjału znacznie obniża się ponieważ oba rodzaje nośników swobodnych (dziury i elektrony) poruszają się w kierunku złącza. Zmniejsza się szerokość i ładunek zgromadzony w warstwie zaporowej, maleje natężenie pola elektrycznego. W tym stanie rośnie gwałtownie dyfuzja nośników. Wzrasta liczba dziur przechodzących z obszaru półprzewodnika typu p do n i elektronów z obszaru n do p. Po przejściu przez złącze nośniki te stają się nośnikami mniejszościowymi i rekombinują, ale dzięki temu, że dołączono zewnętrzne źródło napięcia do materiału półprzewodnikowego dostarczane są nowe nośniki i przepływ prądu przez złącze jest podtrzymany.

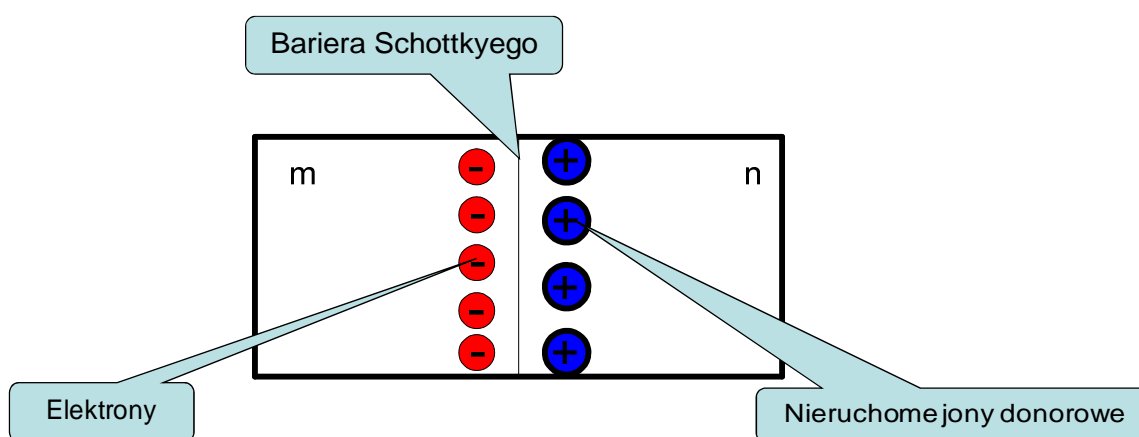
Ponieważ ładunek mniejszościowy wstrzykiwany do obszarów p i n w pobliżu złącza nie od razu rekombinuje można mu przypisać pewną pojemność elektryczną zwaną **pojemnością dyfuzyjną**. Ładunek dyfuzyjny wstrzykiwanych nośników mniejszościowych jest proporcjonalny do prądu  $I$  płynącego przez złącze, a ponieważ prąd  $I$  jest funkcją napięcia zasilania  $U$  to pojemność dyfuzyjną można obliczyć z zależności

$$C_D = \frac{dQ}{dU} = \frac{\tau}{U_D} \cdot I \quad (13.27)$$

gdzie  $\tau$  – czas życia nośników mniejszościowych (zakłada się, że czasy życia dziur i elektronów są jednakowe).

### 13.4.2. Złącze metal-półprzewodnik m-s

Złącze metal-półprzewodnik m-s (ang. metal-semiconductor) może być wytworzone w postaci złącza m-n lub złącza m-p. Zasada działania takiego złącza jest podobna do działania złącza p-n z tą różnicą, że w zjawiskach zachodzących w złączu bierze udział tylko jeden typ ładunków mniejszościowych – elektrony.



Rys.13.13. Złącze metal – półprzewodnik

Po zetknięciu metalu z półprzewodnikiem np. typu n elektrony przepływają swobodnie przez złącze, ale ponieważ elektrony w półprzewodniku charakteryzują się mniejszą pracą wyjścia niż elektrony w metalu znacznie więcej przepłynie ich do metalu niż do półprzewodnika. Warstwa przypowierzchniowa metalu zostanie naładowana ujemnie, a w warstwie przypowierzchniowej półprzewodnika pojawi się dodatni



ładunek jonowy. W ten sposób powstanie bariera potencjału, zwana **barierą Schottkyego**, której towarzyszy powstanie warstwy zaporowej (rys. 13.13.).

Przyłożenie zewnętrznego napięcia zasilającego w kierunku polaryzacji wstecznej zwiększy barierę potencjału i poszerzy warstwę zaporową. Dodatnie napięcie przyłożone pomiędzy elektrody połączone z metalem i półprzewodnikiem zmniejsza barierę potencjału i umożliwia przepływ prądu przez złącze.

### 13.4.3. Diody

W zależności od technologii wykonania wyróżniamy następujące, podstawowe rodzaje diod:

- diody sygnałowe
- diody mocy
- diody specjalne

Diody sygnałowe i diody mocy można z kolei podzielić na:

- diody bipolarne (złącze p-n)
- diody Schottkyego (złącze m-s)

Do grupy diod specjalnych zaliczamy:

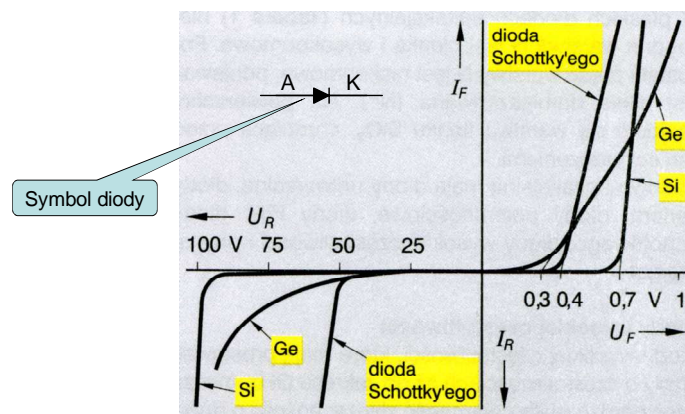
- stabilistory (diody Zenera, diody lawinowe)
- diody pojemnościowe
- diody p-i-n
- diody tunelowe
- fotodiody
- diody elektroluminescencyjne
- magnetodiody
- tranzystory jednozłączowe

**Diody sygnałowe** są wytwarzane dla małych wartości prądu, poniżej 1 A i niskich napięć, do 50 V. Stosuje się je w układach przetwarzających sygnały oraz prostownikach w zakresie niskich i wielkich częstotliwości. Wytwarza się je z germanu lub krzemu.

Diody sygnałowe, bipolarne są elementami ze złączem półprzewodnikowym p-n. Mają właściwości prostownicze, przewodzą prąd w jednym kierunku w zależności od zwrotu napięcia polaryzującego złącze. Napięcie progu załączenia diody bipolarnej zależy od materiału z jakiego ją wykonano. Dla krzemu jest to napięcie ok. 0,7 V, dla germanu ok. 0,4 V (rys.13.14.).

Wyprowadzenia diody to **anoda** A i **katoda** K. Anoda stanowi elektrodę dodatnią (warstwa półprzewodnika typu p), katoda elektrodę ujemną (warstwa półprzewodnika typu n). Wierzchołek trójkąta w symbolu wskazuje kierunek przepływu prądu w stanie przewodzenia.

Właściwości statyczne diod w ustalonych stanach pracy tj. w stanie zaporowym i w stanie przewodzenia, przedstawia się w postaci charakterystyki napięciowo – prądowej (rys.13.14). Podstawową cechą diody jest jej działanie zaporowe co oznacza, że przewodzi prąd tylko wtedy, kiedy anoda jest spolaryzowana dodatnio względem katody. Stan ten odpowiada odcinkowi charakterystyki zawartemu w I kwadrancie układu współrzędnych. Często w katalogach ta część charakterystyki diody prezentowana jest w skali półlogarytmicznej. Umożliwia to dokładny odczyt wartości prądów i napięć w odniesieniu do dużego obejmującego kilka dekad zakresu zmian prądu przewodzenia diody. Charakterystycznym parametrem diody w stanie przewodzenia jest  $I_F$  - maksymalny dopuszczalny prąd przewodzenia.

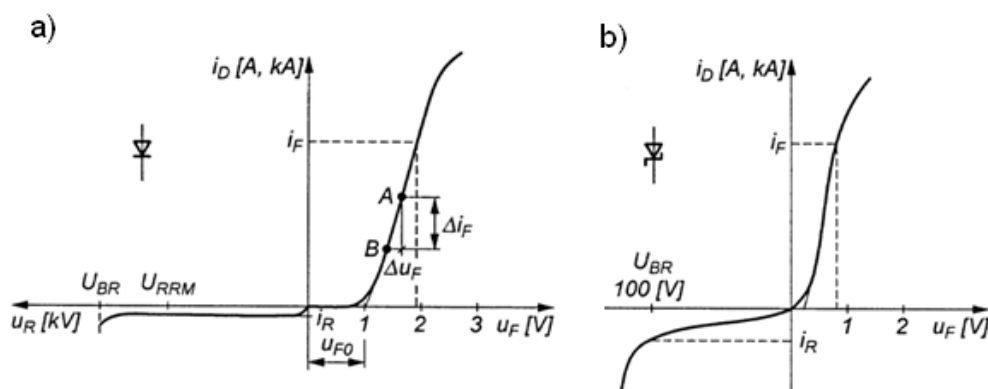


Rys.13.14. Charakterystyki diod sygnałowych wykonanych na bazie krzemu (Si), germanu (Ge) i diody Schottky'ego (złącze metal-półprzewodnik)

Jeżeli anoda jest spolaryzowana ujemnie względem katody to dioda jest w stanie zaporowym (złącze jest spolaryzowane wstecznie w kierunku zaporowym). Prąd płynący przez diodę jest pomijalnie mały i spowodowany wyłącznie ruchem ładunków przewodnictwa samoistnego (generacja termiczna). Charakterystycznym parametrem diody w stanie polaryzacji wstecznej jest dopuszczalne napięcie wsteczne  $U_R$ . Pozostałe istotne parametry diody to moc znamionowa  $P_{tot}$  oraz temperatura złącza  $t_j$ .

**Diody sygnałowe Schottky'ego** (rys.13.14) to elementy ze złączem metal – półprzewodnik m-n. Metal stanowi anodę A, półprzewodnik katodę K. Mają one podobnie jak diody bipolarne właściwości prostownicze. W obszarze złącza gromadzi się w stanie przewodzenia ładunek elektryczny, a ponieważ w złączu metal-półprzewodnik jest on bardzo mały to czas potrzebny na odprowadzenie go w czasie przejścia diody ze stanu przewodzenia do stanu zaporowego (nie przewodzenia) jest bardzo krótki rzędu kilkudziesięciu pikosekund i o kilka rzędów mniejszy niż w diodach bipolarnych. Diody Schottky'ego mają ponadto mniejsze napięcie progowe załączenia, zwykle ok. 0,3 V.

**Diody mocy** nazywane także **diodami energetycznym** są podstawowymi elementami układów energoelektronicznych, służą do przekształcania energii elektrycznej. Podobnie jak diody sygnałowe diody energetyczne mają właściwości prostownicze. W zależności od kierunku polaryzacji napięcia anoda-katoda mogą pracować w dwóch stanach. Jeżeli potencjał anody jest wyższy niż katody dioda jest w stanie przewodzenia. W przeciwnym przypadku, kiedy potencjał anody jest niższy niż katody dioda nie przewodzi i mówimy, że jest w stanie zaporowym. Charakterystyki bipolarne diod mocy przedstawiono na rys.13.15.a. Warto zauważyć, że w zakresie prądów większych niż prąd znamionowy napięcie na przewodzącej diodzie rośnie szybciej niż dla prądów mniejszych. Straty mocy w diodzie rosną więc również szybciej.

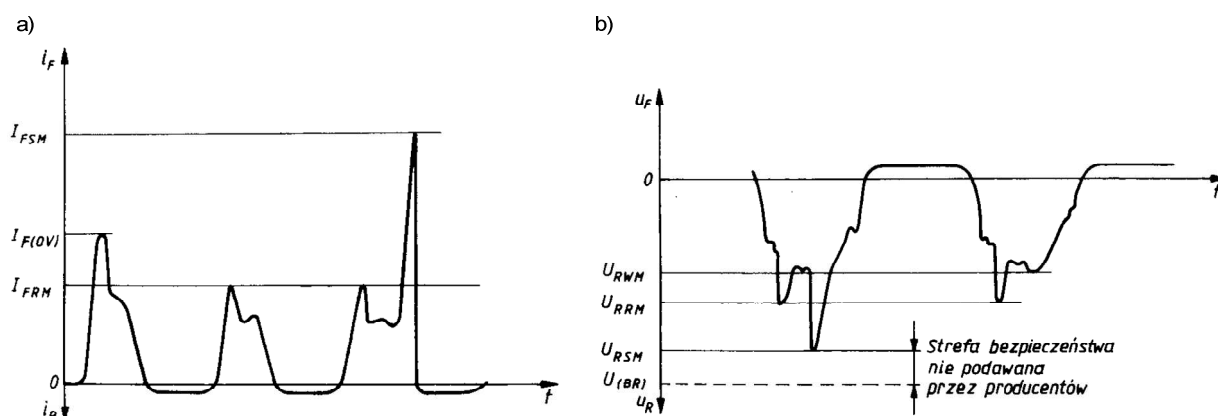


Rys.13.15. Charakterystyki i symbole diod mocy a) dioda bipolarna, b) dioda Schottkyego

**Bipolarne diody mocy** to obecnie największe z produkowanych diod. Do ich produkcji stosuje się krzem. Diody te mają napięcia wsteczne rzędu kilku kilowoltów i prądy przewodzenia rzędu kilku kiloamperów. Charakterystyczną cechą ich budowy jest to, że w obszarze złącza, pomiędzy półprzewodniki typu p i typu n, wprowadzono dodatkową warstwę półprzewodnika bardzo słabo domieszkowanego (samoistnego). Powoduje to poszerzenie obszaru złącza i zwiększenie jego wytrzymałości na przebicie elektryczne. Dioda o takiej konstrukcji to dioda pin (i oznacza półprzewodnik samoistny). Wprowadzenie dodatkowej warstwy półprzewodnika powoduje, że napięcie progowe załączania jest w tych diodach wyższe i waha się w granicach od 0,7 V do 1 V dla diod standardowych i od 1,1 V do 1,6 V dla diod szybkich.

**Diody mocy Schottkyego** mają w obszarze złącza, podobnie jak diody moc bipolarne, wprowadzoną dodatkową warstwę półprzewodnika słabo domieszkowanego. Warstwa ta poszerza złącze i powoduje, że napięcie zaworowe diody zwiększa się. Na rys.13.15b przedstawiono charakterystykę diody mocy Schottkyego. Obecnie produkowane diody tego rodzaju mają napięcia zaworowe (wsteczne) około 300 V i mogą przewodzić prądy, niższe niż w bipolarnych, rzędu kilkuset amperów (ok. 300 A). Napięcie progowe załączania jest w tych diodach niskie i nie przekracza wartości 0,6 V.

Na rys. 13.16a. przedstawiono przebieg prądu przewodzenia  $I_F$  diody mocy i zaznaczono charakterystyczne parametry stanu przewodzenia. Na rys.13.16b. przedstawiono przebieg napięcia wstecznego  $U_R$  i zaznaczono charakterystyczne parametry stanu zaworowego.



Rys.13.16. Przebiegi prądu i napięcia na diodzie mocy, a) prąd przewodzenia i b) napięcie wsteczne

Dla stanu przewodzenia można wyróżnić:

- $I_{F(AV)}$  - wartość średnia prądu przewodzenia, określana dla przebiegu sinusoidalnego i częstotliwości 50 Hz za okres przewodzenia  $2\pi$  (20 ms),
- $I_{F(RMS)}$  - wartość skuteczna prądu przewodzenia, określana dla dowolnego kształtu przebiegu za okres przewodzenia  $2\pi$  (20 ms),
- $I_{FSM}$  - niepowtarzalny szczytowy prąd przewodzenia, określany dla przebiegu sinusoidalnego i maksymalnej dopuszczalnej temperatury struktury półprzewodnikowej  $T_{jmax}$  za półokresu okresu przewodzenia  $\pi$  (10 ms),
- $I_{FRM}$  - powtarzalny szczytowy prąd przewodzenia,
- $I_{F(OV)}$  - przeciążeniowy prąd przewodzenia.

Dla stanu zaworowego najistotniejsze są:

- $U_{RSM}$  - niepowtarzalne szczytowe napięcie wsteczne, które może pojawić się na diodzie przypadkowo w znacznych odstępach czasu,

$U_{RRM}$  - powtarzalne szczytowe napięcie wsteczne, które może cyklicznie pojawiać się na diodzie.

W pracy diody mocy ważną rolę odgrywają jej właściwości dynamiczne. Proces przełączania diody mocy ze stanu przewodzenia do stanu zaporowego i odwrotnie nazywa się komutacją. Na **proces komutacji** składa się załączanie i wyłączanie. W obu tych procesach przez diodę płynie prąd znacznie większy od prądu wstecznego i jednocześnie na jej zaciskach występuje napięcie znacznie większe od napięcia przewodzenia. W efekcie impuls mocy chwilowej jaka wydziela się w diodzie ma znaczną wartość maksymalną i przy częstych przełączeniach (szczególnie przy wyższej niż sieciowa częstotliwości łączeń) kumulacja energii może być tak duża, że dioda ulegnie zniszczeniu w wyniku przegrzania struktury półprzewodnikowej.

W procesie załączania istotna jest także szybkość narastania prądu przewodzenia ponieważ na indukcyjności występującej w strukturze płytki krzemowej oraz na indukcyjności wyprowadzeń będą indukowały się napięcia, które dodając się do napięcia zasilania mogą spowodować przepięcia i w konsekwencji uszkodzenie diody. W procesie wyłączania istotny jest natomiast prąd wsteczny diody ponieważ przewodząca wstecznie dioda po dołączeniu innego elementu może spowodować niekontrolowane zwarcie w układzie przekształtnika.

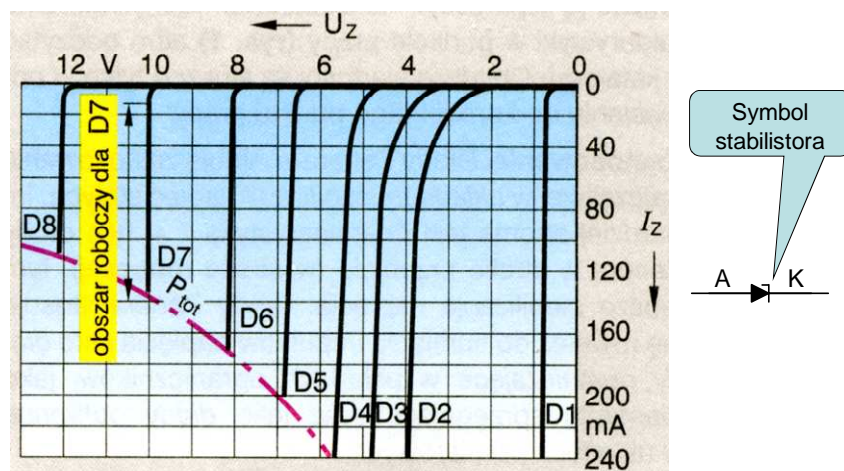
W procesie załączania istotnymi parametrami są zatem:

- $\frac{di_F}{dt}$  – maksymalna stromość narastania prądu przewodzenia
- $t_{fr}$  – czas ustalania się napięcia przewodzenia.

#### 13.4.4. Diody specjalne

Diody specjalne stanowią liczną grupę elementów jednozłączowych. Spośród nich szczegółowego zostaną omówione stabilistory, diody tunelowe, fotodiody, diody elektroluminescencyjne oraz magneto diody.

Stabilistory (**diody Zenera** i **diody lawinowe**) są diodami krzemowymi, które stosuje się do stabilizacji napięć stałych. Pracując w układach stabilizacji napięć stabilistory są zawsze spolaryzowane w kierunku wstecznym (III kwadrant charakterystyki). Przy polaryzacji złącza w kierunku zaporowym przewodzą prąd tylko wtedy, gdy napięcie na ich zaciskach przekroczy **napięcie przebicia**  $U_{Z0}$ . Napięcie to nazywamy napięciem Zenera.



Rys.13.17. Rodzina charakterystyk stabilistorów o mocy znamionowej 1,5 W

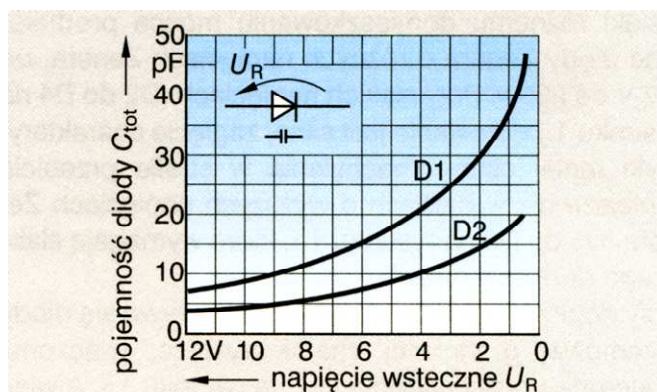
**Stabilistory** produkuje się w szeregach o stałej mocy strat na napięcie przebicia od 1 V do 200 V. Jeżeli napięcie na zaciskach stabilistora jest mniejsze od napięcia przebicia stabilistor nie przewodzi. Jeżeli złącze

jest spolaryzowane w kierunku przewodzenia stabilistor działa jak zwykła dioda prostownicza. Stabilistory o napięciu przebicia  $U_{Z0} < 6 \text{ V}$  mają ujemny współczynnik temperaturowy napięcia przebicia i dominującym jest w nich zjawisko Zenera, a w stabilistorach o  $U_{Z0} > 6 \text{ V}$  współczynnik temperaturowy napięcia przebicia jest dodatni i dominującym jest zjawisko lawinowe. Najlepsze z punktu widzenia stabilizacji napięcia (stroma charakterystyka prądowo - napięciowa i zerowy współczynnik temperaturowy napięcia przebicia) są diody Zenera o napięciu przebicia około 6 V.

Do podstawowych parametrów stabilistorów zaliczamy:

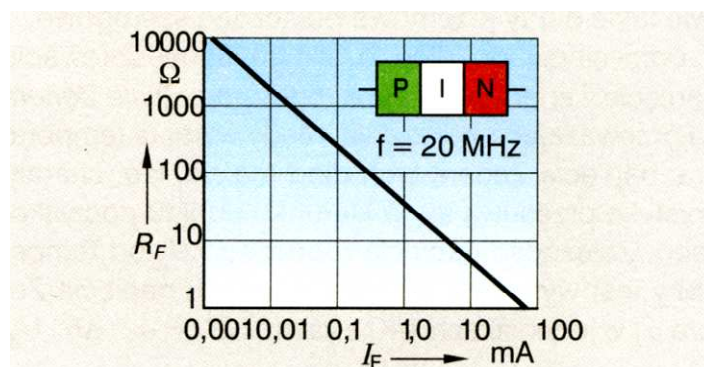
- $U_{Z0}$  – napięcie przebicia (napięcie Zenera)
- $r_z$  – rezystancję dynamiczną, gdzie  $r_z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z}$
- $P_{\text{tot}}$  – moc strat
- $\alpha_{U_Z}$  – temperaturowy współczynnik napięcia przebicia

**Diody pojemnościowe** pełnią w układach elektronicznych funkcję kondensatora. Podstawową rolę pełni tu złącze półprzewodnikowe spolaryzowane w kierunku wstecznym, w którym poprzez zmianę wstecznego napięcia polaryzującego możemy zmieniać pojemność elektryczną. Obszar złącza, pozbawiony ładunku możemy w tym stanie traktować jak dielektryk, a obszary półprzewodnika typu p i typu n jak okładki kondensatora. Specjalna konstrukcja diod pojemnościowych zapewnia dużą (w porównaniu z diodami sygnałowymi) pojemność warstwy zaporowej. Na rys.13.18. przedstawiono symbol graficzny i przykładowe charakterystyki  $C_{\text{tot}}=f(U_R)$  diod pojemnościowych. Zwiększanie napięcia wstecznego powoduje zmniejszanie się pojemności diody. Diody, w których dla dopuszczalnego zakresu zmian napięcia polaryzacji pojemność zmienia się kilkakrotnie (np. 6-7 razy) stosuje się do przestrajania obwodów rezonansowych.



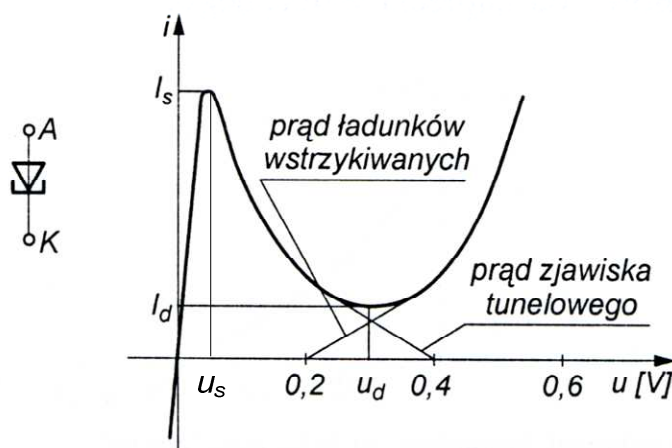
Rys.13.18. Symbol i charakterystyki diod pojemnościowych

**Diody pin** (rys.13.19.) mają dodatkową warstwę półprzewodnika samoistnego *i* (ang. intrinsic) o bardzo dużej rezystancji wbudowaną pomiędzy silnie domieszkowane, dobrze przewodzące obszary półprzewodnika typu *p* i typu *n*. Jeżeli przyłożymy do diody napięcie o częstotliwości poniżej 1 MHz będzie się ona zachowywać jak zwykła dioda prostownicza, przez którą płynie jednokierunkowy prąd pulsujący. Dla częstotliwości powyżej 1 MHz (1 – 20 MHz) dioda traci właściwości prostownicze i zachowuje się jak zwykły rezystor (rys.13.19.), którego wartość można zmieniać wymuszając w kierunku przewodzenia przepływ składowej stałej prądu. Diody pin stosuje się w układach wielkiej częstotliwości (w.cz.) do modulacji amplitudy lub jako elementy sterowanych dzielników napięcia i obwodów tłumiących.



Rys.13.19. Diody specjalne, a) symbol i charakterystyki diod pojemnościowych, b) struktura i charakterystyka diody pin w zakresie bardzo wysokich częstotliwości

**Diody tunelowe** wykonane są z materiałów o dużej zawartości domieszek, a zatem mają bardzo wąskie złącza (rzędu nm). W tego typu złączach powstaje silne pole elektryczne, pod wpływem którego następuje rozerwanie wiązań kowalencyjnych tzn. jonizacja atomów sieci krystalicznej podobnie jak w zjawisku Zenera i złącze znajduje się w stanie przewodzenia. Efektem tego jest powstanie po obu stronach złącza ładunków mniejszościowych o energii mniejszej niż energia potrzebna do pokonania bariery potencjału. Zjawisko przenikania tych nośników przez barierę potencjału nazywamy efektem tunelowym.



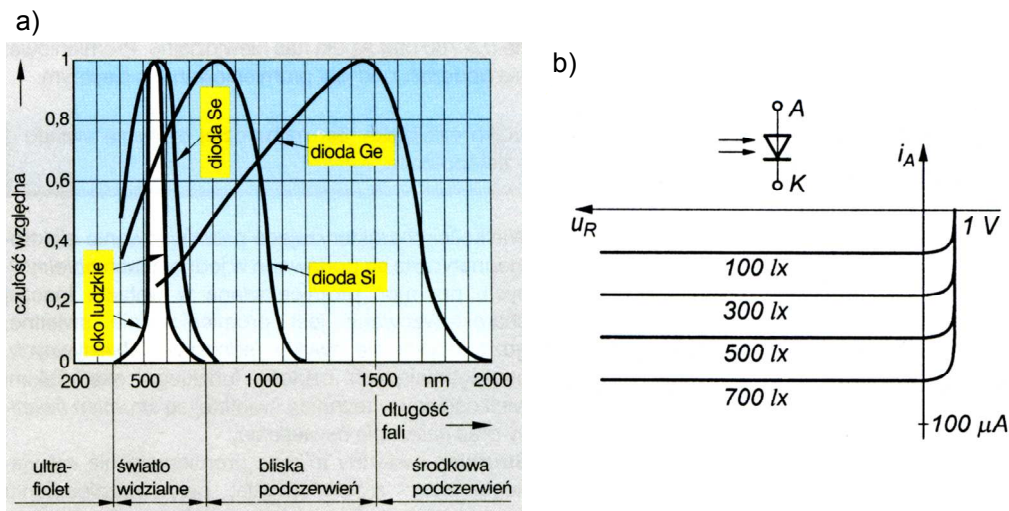
Rys.13.20. Symbol i charakterystyka diody tunelowej

Polaryzując złącze w kierunku przewodzenia zmniejszamy pole elektryczne w obszarze złącza i zjawisko Zenera stopniowo zanika. Dioda zaczyna zachowywać się jak zwykła dioda sygnałowa. Charakterystykę prądowo-napięciową diody tunelowej przedstawiono na rys.13.20. Ma ona dwa charakterystyczne punkty: punkt szczytu ( $I_s$ ,  $U_s$ ) i punkt doliny ( $I_d$ ,  $U_d$ ). Pomiedzy punktami szczytu i doliny dioda tunelowa ma ujemną rezystancję dynamiczną. Jeżeli rezystancja obwodu dołączonego równolegle do diody tunelowej jest większa od ujemnej rezystancji dynamicznej diody powstały w ten sposób układ będzie niestabilny. Tę właściwość diody tunelowej wykorzystano przy odłumianiu obwodów rezonansowych w prostych generatorach z obwodami rezonansowymi LC w zakresie wielkich częstotliwości.

W **fotodiodach** wykorzystano tzw. **efekt fotoelektryczny prosty**, który polega tym, że pod wpływem światła padającego na złącze w materiale półprzewodnikowym następuje jonizacja atomów sieci krystalicznej

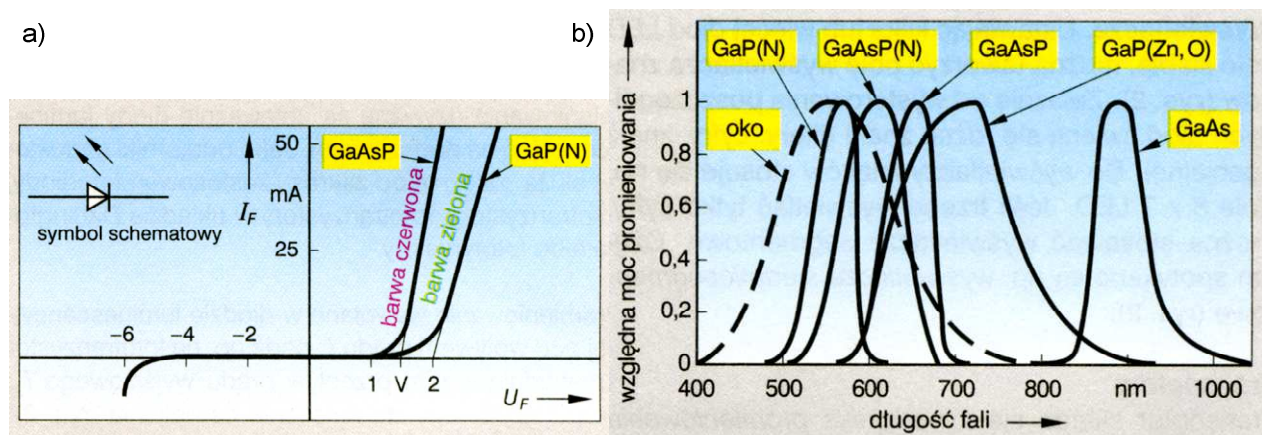


i generacja par elektron-dziura. W tym wypadku strumień fotonów oddaje swoją energię elektronom walencyjnym powodując silną jonizację atomów w obu obszarach złącza, w obszarze p i w obszarze n.



Rys.13.21. Fotodiody, a) Krzywe czułości na światło oka ludzkiego i fotodiod, b) symbol i charakterystyki

Symbol graficzny i charakterystyki prądowo napięciowe **fotodiody** przedstawiono na rys.13.21. W fotodiodach wykorzystano tzw. efekt fotoelektryczny prosty, który polega tym, że pod wpływem światła padającego na złącze w materiale półprzewodnikowym następuje jonizacja atomów sieci krystalicznej i generacja par elektron-dziura. W tym wypadku strumień fotonów oddaje swoją energię elektronom walencyjnym powodując silną jonizację atomów w obu obszarach złącza, w obszarze p i w obszarze n. Znaczny wzrost liczby nośników mniejszościowych powoduje zwiększenie prądu wstecznego w złączu. Prąd ten praktycznie nie zależy od wartości przyłożonego napięcia wstecznego. Ponieważ liczba nośników większościowych w poszczególnych obszarach półprzewodnika typu p i typu n jest wielka, przy polaryzacji złącza w kierunku przewodzenia, oświetlenie złącza nie ma praktycznie wpływu na wartość przepływającego przez fotodiodę prądu.



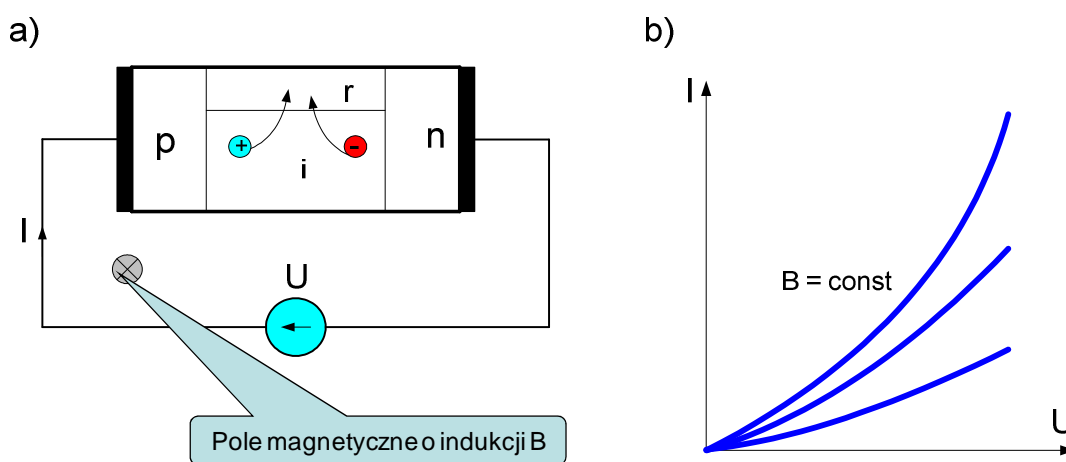
Rys.13.22. Diody elektroluminescencyjne, a) charakterystyki prądowo – napięciowe, b) charakterystyki promieniowania

W **diodach elektroluminescencyjnych** wykorzystuje się tzw. efekt fotoelektryczny odwrotny, w którym dioda emituje światło pod wpływem przepływającego przez złącze prądu. Przy polaryzacji w kierunku zaporowym dioda elektroluminescencyjna zachowuje się jak zwykła dioda sygnałowa. Przy polaryzacji

w kierunku przewodzenia zjawisko dyfuzji nośników mniejszościowych do obszarów o określonym typie przewodnictwa jest podobne jak w diodach sygnałowych z tym, że podczas rekombinacji tych nośników z nośnikami większościowymi następuje wypromieniowanie energii w postaci fotonu, a nie jak w zwykłych diodach w postaci fononu. Długość emitowanej fali świetlnej zależy od szerokości pasma zabronionego, a zatem od materiału półprzewodnikowego z jakiego zbudowano diodę.

Charakterystyka prądowo-napięciowa diody elektroluminescencyjnej ma kształt podobny do charakterystyki diody sygnałowej (rys. 13.22a). Napięcia przebicia są niewielkie od 3 V do 10 V. Spadek napięcia przy polaryzacji w kierunku przewodzenia (dioda świeci) leży w zakresie wartości od 1,2 V do 5 V. Na rys.13.22b przedstawiono współzależność względnej mocy promieniowania i długości fali światła emitowanego przez różne rodzaje diod świecących.

**Magnetodiody** wykorzystują efekt działania pola magnetycznego na ładunki swobodne w złączu półprzewodnikowym.



Rys.13.23. Magnetodiody, a) struktura, b) charakterystyki prądowo – napięciowe

W magnetodiodzie pod wpływem zewnętrznego poprzecznego pola magnetycznego zmienia się rezystancja złącza spolaryzowanego w kierunku przewodzenia. Pomiędzy obszarami typu p i typu n znajduje się stosunkowo szeroki obszar niejednorodnego półprzewodnika samoistnego. Umownie można ten obszar podzielić na część o dużej rezystywności oznaczoną na rysunku literą *i* oraz dołączoną do niej równolegle wąską część o małej rezystywności oznaczoną literą *r*. Nośniki mniejszościowe dyfundujące z obszarów p do n oraz n do p przechodzą przez oba obszary *i* oraz *r*. Pod wpływem pola magnetycznego torów ruchów tych ładunków zakrzywiają się tak, że większość z nich, zależnie od kierunku i natężenia pola, znajduje się w jednym z tych obszarów. Oznacza to, że prąd diody płynie przez mniejszą lub większą rezystancję półprzewodnika samoistnego. Efektem takiego działania diody jest zmiana charakterystyki prądowo-napięciowej, jak to przedstawiono na rys.13.23. Magnetodiody są stosowane do pomiaru indukcji magnetycznej.

## 13.5. Elementy wielozłączowe

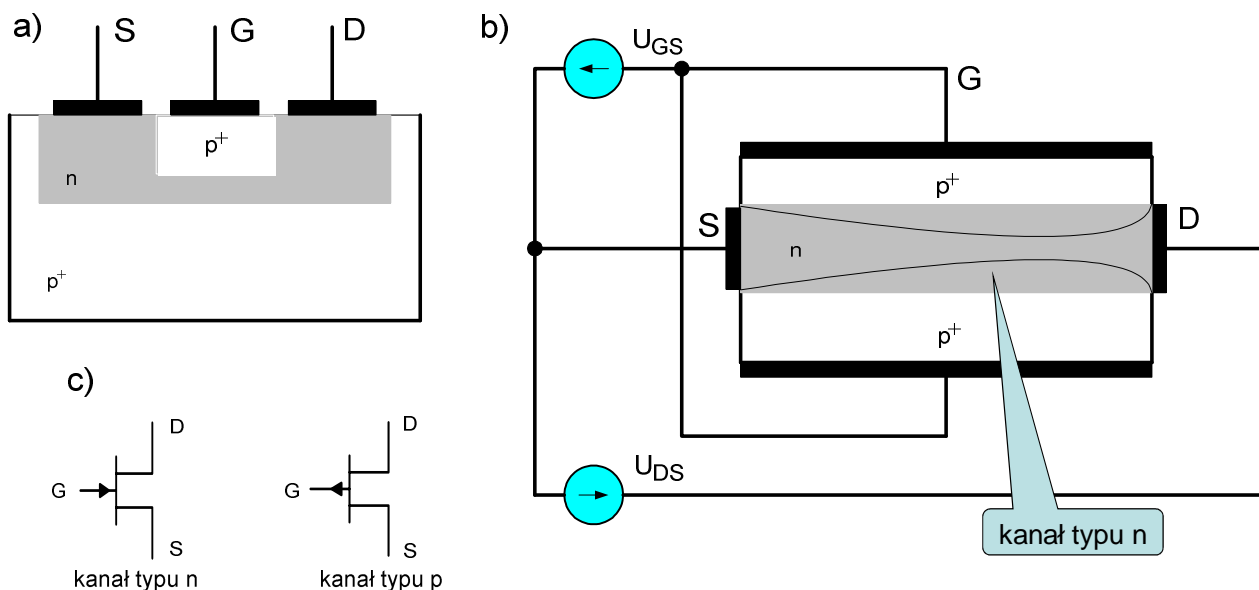
### 13.5.1. Złączowe tranzystory unipolarne

Złączowy tranzystor unipolarny **JFET** (ang. Junction-Field-Effect-Transistor) ma właściwości podobne do tranzystora unipolarnego z izolowaną bramką. Na rys.13.24a,b. przedstawiono modele struktury takiego tranzystora.

Na podłożu B np. z półprzewodnika typu  $p^+$  wytwarza się obszar o przewodnictwie typu n, w którym z kolei jest wytworzona ponownie warstwa  $p^+$ . Warstwa ta jest wyprowadzona na zewnątrz i stanowi bramkę (G).



Obydwa końce kanału n są wyposażone w elektrody; dren D i źródło S. Struktura jest symetryczna, a zatem przypisanie elektrodom funkcji drenu i źródła jest umowne.



Rys.13.24. Tranzystor JFET, a) struktura podstawowa, b) struktura symetryczna, c) symbole

Jeżeli bramka tranzystora nie jest zasilana ( $U_{GS} = 0$ ) to pod wpływem zewnętrznego źródła napięcia polaryzującego elektrody D i S w kanale popłynie prąd drenu  $I_D$ . Przy zwiększaniu napięcia  $U_{DS}$  w zakresie  $0 < U_{DS} < U_P$  rezystancja drenu jest praktycznie stała i prąd  $I_D$  jest proporcjonalny do napięcia  $U_{DS}$ . Dla napięcia  $U_{DS} \approx U_P$  kanał zaczyna zwężać się, rezystancja zaczyna rosnać i prąd  $I_D$  rośnie wolniej niż napięcie  $U_{DS}$ . Jeżeli napięcie  $U_{DS}$  będzie większe od napięcia  $U_P$  zwanego napięciem progu lub zaciśnięcia kanału (ang. pinch-off) prąd drenu jest praktycznie stały i nie zależy od napięcia  $U_{DS}$ .

Kiedy pomiędzy bramką i źródło przyłożymy napięciem  $U_{GS}$  tak, że złącze bramka-kanał będzie spolaryzowane w kierunku zaporowym szerokość i kształt kanału dla napięć  $U_{DS} < U_{GS} - U_P$  przy założeniu, że  $|U_{GS}| < |U_P|$ , będzie zależał tym razem od obu napięć  $U_{GS}$  oraz  $U_{DS}$ . Ten zakres pracy nazywamy

liniowym albo nienasycenia. Dla napięć  $U_{DS} > U_{GS} - U_P$  prąd drenu zależy wyłącznie od napięcia  $U_{GS}$  (zakres nasycenia lub nieliniowy). W tym przypadku kanał będzie silniej zaciskany w pobliżu tej elektrody (drenu lub źródła), której potencjał względem bramki będzie większy. Obraz takiego kanału w symetrycznej strukturze tranzystora przedstawiono na rys.13.24.c linią przerywaną.

Tranzystory unipolarne złączowe mogą mieć kanał typu n lub kanał typu p (rys. 13.24.c). Sterowanie tego typu tranzystorów polega zawsze na zubożaniu kanału, aż do całkowitego jego zaciśnięcia, gdy  $U_{GS} = U_P$ . Są to zatem tranzystory normalnie złączone.

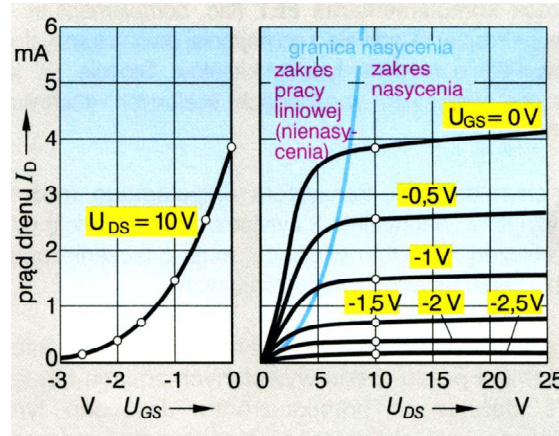
Na rys.13.25. przedstawiono typowe charakterystyki prądowo-napięciowe złączowego tranzystora unipolarnego:

1. Charakterystyki wyjściowe

$$I_D = f(U_{DS}) \Big|_{U_{GS} = \text{const}} \quad (13.28)$$

2. Charakterystyki przejściowe (bramkowe lub sterowania)

$$I_D = f(U_{GS}) \Big|_{U_{DS}=const} \quad (13.29)$$



- Rys.13.25. Charakterystyki tranzystora JFET, a) bramkowa, b) wyjściowe

Podobnie jak dla tranzystorów z izolowaną bramką występują tutaj dwa zakresy pracy: liniowy (nienasycenia, triodowy) i nasycenia (nieliniowy, pentodowy). Granicę obu obszarów wyznacza napięcie

$$U_{DS} = U_{GS} - U_p \quad (13.30)$$

Z charakterystyki wyjściowej można wyznaczyć **dynamiczną rezystancję wyjściową** tranzystora

$$r_{DS} = \frac{\partial U_{DS}}{\partial I_D} \Big|_{U_{GS}=const} \quad (13.31)$$

Inny istotny z punktu widzenia wzmacniania sygnałów elektrycznych parametr, tzw. **transkonduktancja  $g_m$**  lub inaczej **nachylenie charakterystyki bramkowej  $S$** , może być wyznaczony z charakterystyki bramkowej:

$$g_m = S = \frac{\partial I_D}{\partial U_{GS}} \Big|_{U_{DS}=const} \quad (13.32)$$

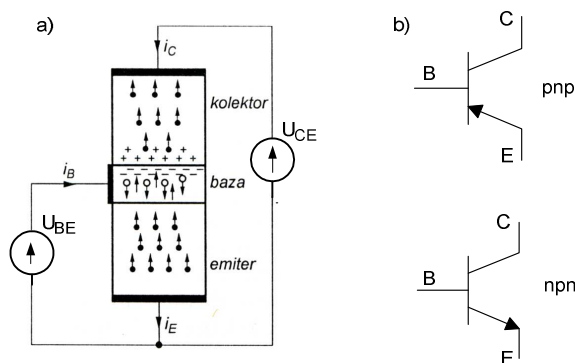
Charakterystyka bramkowa (przejściowa) tranzystora jest opisana zależnością kwadratową:

$$I_D = I_{DSS} \left( 1 - \frac{U_{GS}}{U_p} \right)^2 \quad (13.33)$$

przy czym prąd  $I_{DSS}$  wyznacza się z charakterystyki bramkowej przy  $U_{GS} = 0$  V.

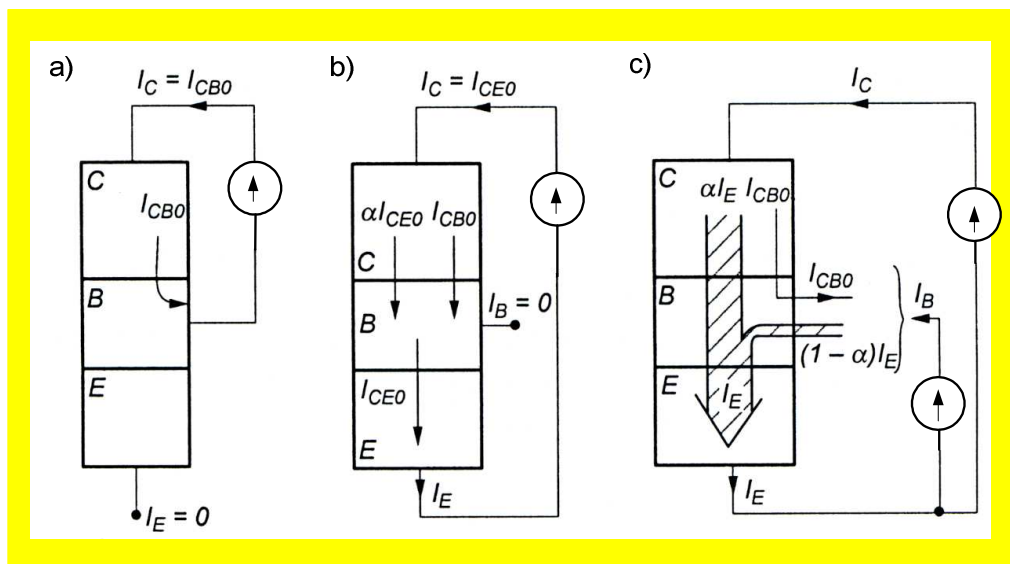
### 13.5.2. Tranzystory bipolarne

Bipolarny tranzystor warstwowy **BJT** (ang. Bipolar-Junction-Transistor) jest przyrządem dwuzłazkowym (rys.13.26.a), w którym przepływ prądu jest wynikiem ruchu dwóch rodzajów ładunków: ładunku ujemnego-elektronów i ładunku dodatniego-dziur. Wyróżnia się dwa typy struktur tranzystorów bipolarnych: **typ npn** i **typ pnp**. Symbole graficzne obu typów przedstawiono na rys.13.26.b.



Rys.13.26. Tranzystor bipolarny, a) model struktury, b) typy i symbole

W praktyce częściej stosuje się tranzystory typu npn. Zasada działania obu typów tranzystorów jest podobna przy czym zmiana typu tranzystora wymaga zmiany biegunowości napięć polaryzujących elektrody i zmiany kierunków wszystkich prądów w tranzystorze. Dwuwymiarowy płaski model struktury tranzystora bipolarnego typu npn przedstawiono na rys.13.26a.



Rys.13.27. Rozpływ prądów zerowych w tranzystorze npn

Obszar, który jest źródłem nośników ładunku nazywa się **emiterem** (E), środkowa, cienka warstwa nazywa się **bazą** (B) i steruje przepływem ładunku, a ostatnia warstwa to **kolektor** (C łac. collectus-zbieranie), który zbiera ładunki. Tranzystor bipolarny ma dwa złącza półprzewodnikowe. Złącze baza-emiter nazywa się złączem emiterowym, a złącze kolektor-baza nazywa się złączem kolektorowym. Działanie tranzystora bipolarnego opiera się na zjawiskach zachodzących w obu złączach przy udziale przepływu ładunków mniejszościowych przez cienką warstwę bazy. Należy zauważyć, że polaryzując elektrody tranzystora typu npn z zewnętrznych źródeł napięcia  $U_{CE}$  i  $U_{BE}$  ( $U_{CE} > U_{BE}$ ) złącze baza-emiter jest spolaryzowane w kierunku przewodzenia, a złącze kolektor-baza w kierunku zaporowym. W tym przypadku bariera potencjału w złączu emiterowym zmniejsza się, a w złączu kolektorowym powiększa się. Na przewodzącym złączu baza-emiter występuje spadek napięcia poniżej 1 V, a na złączu kolektor-baza, w nowoczesnych tranzystorach może odkładać się napięcie nawet rzędu 1 kV.

Zakładając wstępnie, że baza tranzystora nie jest zasilana ( $I_B = 0$ ) sytuacja nie zmienia się. Nadal złącze baza-emiter będzie spolaryzowane w kierunku przewodzenia, a złącze kolektor-baza w kierunku zaporowym. Oba złącza połączone są szeregowo i zasilane ze źródła zewnętrznego napięcia  $U_{CE}$ , przy czym należy

zauważyć, że poza niewielką częścią polaryzującą złącze baza-emiter w kierunku przewodzenia, praktycznie całe napięcie źródła zasilania  $U_{CE}$  odkłada się na wstecznie spolaryzowanym złączu kolektor-baza. Przez tranzystor płynie niewielki prąd generacji termicznej, tzw. **prąd zerowy**  $I_{CE0}$ , który składa się z dwóch części prądu zerowego  $I_{CB0}$  płynącego we wstecznie spolaryzowanym złączu kolektor-baza oraz części  $\alpha_0 \cdot I_{CE0}$  wynikający z efektu tranzystorowego polegającego na przechwytywaniu przez kolektor części elektronów (ładunek mniejszościowy) wstrzykiwanych z emitera do bazy, tworząc w złączu baza-emiter prąd  $I_{CE0}$ . Pozostała część elektronów tworzących prąd  $I_{CE0}$  rekombinuje w bazie równoważąc składową  $I_{CB0}$ . Można zatem napisać (rys.13.27.b):

$$\alpha_0 \cdot I_{CE0} + I_{CB0} = I_{CE0} \quad (13.34)$$

Zatem prądy zerowe w tranzystorze wiąże równanie

$$I_{CE0} = I_{CB0} \frac{1}{1 - \alpha_0} \quad (13.35)$$

Prądy zerowe w tranzystorze są efektem zjawiska generacji termicznej nośników mniejszościowych. W złączu kolektor-baza jest to prąd wsteczny tego złącza. Można go zmierzyć przy odłączonym emiterze w układzie jak na rys.13.27.a.

Kiedy baza tranzystora jest dodatkowo zasilana ze źródła napięcia  $U_{BE}$  w emiterze popłynie prąd o wartości znacznie większej niż prąd zerowy  $I_{CE0}$ . Część elektronów wstrzykiwanych do bazy (podobnie jak poprzednio) będzie rekombinowała z dziurami, a pozostała część  $\alpha_0 \cdot I_E$ , która nie zdąży się zrekombinować, pod wpływem silnego pola elektrycznego w złączu kolektorowym, będzie przechwycona przez kolektor. Zatem prąd jaki płynie w spolaryzowanym zaporowo złączu kolektor-baza nie jest wynikiem wstrzykiwania nośników do kolektora, lecz przechwytywania ich z bazy. Zjawisko to nosi nazwę **efektu tranzystorowego** i występuje tylko wtedy, gdy obszar bazy jest odpowiednio wąski.

Prąd kolektora jest zatem opisany równaniem (13.27.c)

$$I_C = \alpha_0 \cdot I_E + I_{CB0} \quad (13.36)$$

Współczynnik  $\alpha_0$  nazywamy **statycznym współczynnikiem wzmocnienia prądowego** w układzie wspólnej bazy.

$$\alpha_0 = \frac{I_C - I_{CB0}}{I_E} \cong \frac{I_C}{I_E} \quad (13.37)$$

Uwzględniając w zależności (13.35) związek pomiędzy prądami tranzystora

$$I_E = I_B + I_C \quad (13.38)$$

równanie prądu kolektora przyjmie postać:

$$I_C = \beta_0 \cdot I_B + (1 + \beta_0) \cdot I_{CB0} = \beta_0 \cdot I_B + I_{CE0} \quad (13.39)$$

Z tej zależności można wyznaczyć statyczny współczynnik wzmocnienia prądowego  $\beta_0$  dla układu wspólnego emitera:

$$\beta_0 = \frac{I_C - I_{CB0}}{I_B + I_{CB0}} = \frac{\alpha_0 \cdot I_E}{I_B + I_C - \alpha_0 \cdot I_E} = \frac{\alpha_0}{1 - \alpha_0} \cong \frac{I_C}{I_B} \quad (13.40)$$

a zatem

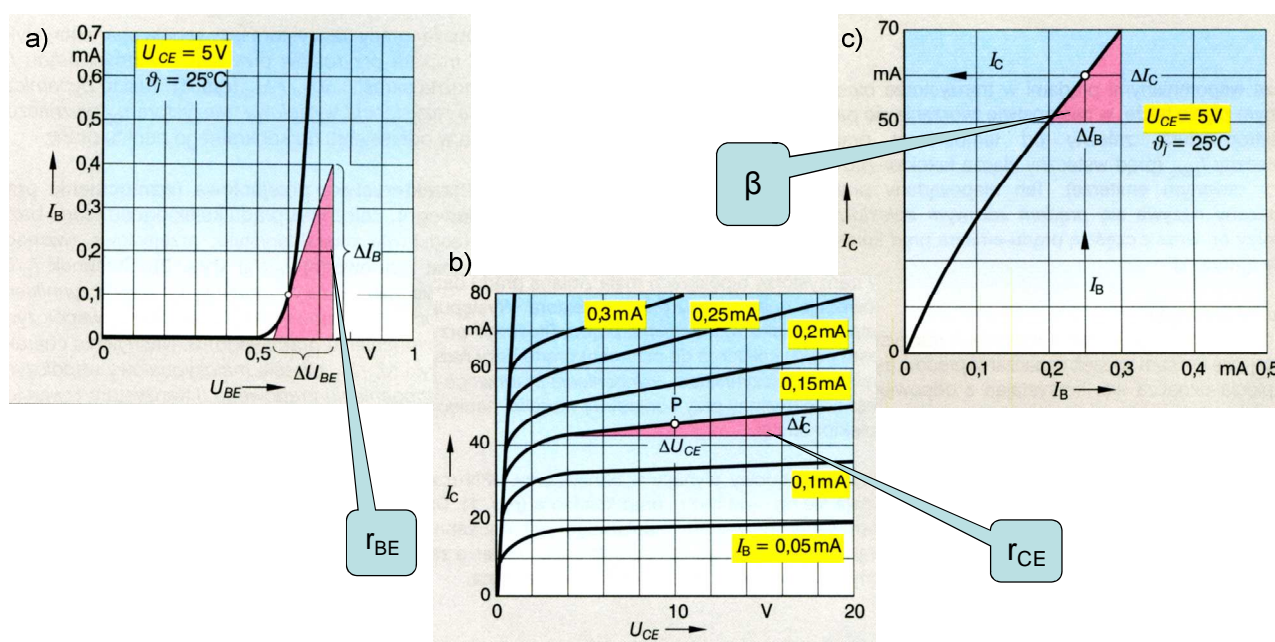
$$\beta_0 = \frac{\alpha_0}{1 - \alpha_0} \quad \text{oraz} \quad \beta_0 + 1 = \frac{1}{1 - \alpha_0} \quad (13.41)$$

Oprócz statycznych współczynników wzmocnienia prądowego (definiowanych dla dużych wartości sygnałów stałych i wolnozmiennych) stosuje się także **dynamiczne** (małosygnałowe, przyrostowe) **współczynniki wzmocnienia prądowego dla składowej zmiennej**. Definicje tych współczynników są następujące:

$$\alpha = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta I_E} \right|_{U_{CB}=\text{const}} \quad \text{lub} \quad \alpha = \left. \frac{i_C}{i_E} \right|_{u_{CB}=0} \quad (13.42)$$

$$\beta = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \right|_{U_{CE}=\text{const}} \quad \text{lub} \quad \beta = \left. \frac{i_C}{i_B} \right|_{u_{CE}=0} \quad (13.43)$$

Podstawowe charakterystyki tranzystora bipolarnego przedstawiono na rys.13.28. Przyjmując, że emiter jest elektrodą wspólną można wyróżnić w tranzystorze bipolarnym dwa obwody: obwód baza-emiter, zwany często wejściowym (sterującym) i obwód kolektor-emiter, zwany wyjściowym.



Rys.13.28. Charakterystyki tranzystora bipolarnego, a) wejściowa, b) wyjściowa, c) przejściowa

Dla obwodu wejściowego wyznacza się **charakterystykę wejściową**. Jest to zależność  $I_B = f(U_{BE})$  przy  $U_{CE} = \text{const}$ . Ponieważ wpływ napięcia  $U_{CE}$  na przebieg tej charakterystyki jest nieznaczny w szerokim zakresie zmienności tego napięcia, rodzinę tych charakterystyk wyznacza krzywa przedstawiona na rys.13.28.a. Z charakterystyki tej można wyznaczyć **dynamiczną rezystancję wejściową** tranzystora  $r_{BE}$

$$r_{BE} = \left. \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} \right|_{U_{CE}=\text{const}} \quad (13.44)$$

Dla obwodu wyjściowego wyznacza się **rodzinę charakterystyk wyjściowych** tranzystora (rys.13.28.b). Jest to zależność  $I_C = f(U_{CE})$  przy  $I_B = \text{const}$ .

Z charakterystyki wyjściowej można wyznaczyć **dynamiczną rezystancję wyjściową** tranzystora  $r_{CE}$

$$r_{CE} = \left. \frac{\Delta U_{CE}}{\Delta I_C} \right|_{I_B=\text{const}} \quad (13.45)$$

Zależność  $I_C = f(I_B)$  przy  $U_{CE} = \text{const}$  przedstawia **charakterystykę przejściową** tranzystora (rys.13.28.c). Z tej charakterystyki wyznacza się **statyczny  $\beta_0$  i dynamiczny  $\beta$  współczynnik wzmocnienia prądowego**.

W przypadku tranzystorów bipolarnych ważna informacja zawarta jest w zbiorze parametrów granicznych. Parametry graniczne to takie wartości prądów i napięć, które nie mogą być przekraczane bez ryzyka uszkodzenia tranzystora. Zaliczamy do nich:

- $P_C$  lub  $P_{tot}$  – maksymalną moc strat w kolektorze lub tranzystorze
- $U_{CEmax}$  – maksymalne napięcie kolektor-emiter (wartość zależy od sposobuysterowania tranzystora)
- $I_{Cmax}$  – maksymalny prąd kolektora
- $U_{BEmax}$  – maksymalne napięcie wsteczne baza-emiter
- $I_{Bmax}$  – maksymalny prąd przewodzenia złącza baza-emiter

Do parametrów granicznych zalicza się także częstotliwości graniczne tranzystora, w tym

- częstotliwość  $f_\alpha$  – częstotliwość przy której wartość współczynnika  $\alpha$  zmniejszy się o 3 dB w stosunku do wartości  $\alpha_0$
- częstotliwość  $f_\beta$  – częstotliwość przy której wartość współczynnika  $\beta$  zmniejszy się o 3 dB w stosunku do wartości  $\beta_0$
- częstotliwość  $f_T$  – częstotliwość przy której wartość współczynnika  $\beta$  zmniejszy się do wartości 1

Dla częstotliwości granicznych zachodzi nierówność

$$f_\alpha > f_T > f_\beta \quad (13.46)$$

a związki między nimi opisują zależności

$$f_\alpha = (1 + \beta_0) \cdot f_\beta \quad f_T = \beta_0 \cdot f_\beta \quad (13.47)$$

Na parametry tranzystora bipolarnego istotny wpływ wywiera temperatura pracy. Prądy zerowe rosną wraz z temperaturą  $T_j$  struktury półprzewodnikowej wg wzoru

$$I_{CB0}(T) = I_{CB0}(T_j) \cdot e^{b \cdot (T - T_j)} \quad (13.48)$$

gdzie  $b = 0,07$  dla Ge,  $b = 0,12$  dla Si. Ponieważ prądy zerowe podwajają swoją wartość w germanie co 10 K, a w krzemie co 6 K można to zapisać w postaci:

$$\begin{aligned} & \text{dla germanu} \quad I_{CB0}(T) = I_{CB0}(T_j) \cdot 2^{\frac{T - T_j}{10}} \\ & \text{dla krzemu} \quad I_{CB0}(T) = I_{CB0}(T_j) \cdot 2^{\frac{T - T_j}{6}} \end{aligned} \quad (13.49)$$

$$\begin{aligned} & \text{dla krzemu} \quad I_{CB0}(T) = I_{CB0}(T_j) \cdot 2^{\frac{T - T_j}{6}} \\ & \text{dla germanu} \quad I_{CB0}(T) = I_{CB0}(T_j) \cdot 2^{\frac{T - T_j}{10}} \end{aligned} \quad (13.50)$$

Także napięcie na złączu baza-emiter zmienia się w funkcji temperatury. Współczynnik temperaturowy tego napięcia jest ujemny (napięcie maleje ze wzrostem temperatury) i ma wartość 2,3 mV/K.

Temperatura struktury półprzewodnikowej (złącza)  $T_j$  zależy od trzech czynników:

- mocy traconej w tranzystorze  $P_C = U_{CE} \cdot I_C + U_{BE} \cdot I_B \approx U_{CE} \cdot I_C$
- temperatury otoczenia  $T_a$
- rezystancji termicznej  $R_{th}$  przejścia złącze-obudowa-radiator-otoczenie

$$T_j = T_a + P_C \cdot R_{th} \quad (13.51)$$

Jeżeli znana jest moc  $P_C$  tranzystora, to dla określonej temperatury otoczenia i założeniu dopuszczalnej temperatury złącza rezystancję termiczną  $R_{th}$  można obliczyć ze wzoru:

$$R_{th} = \frac{T_j - T_a}{P_C} \quad (13.52)$$



Projektując zatem elementy odprowadzające ciepło ze struktury półprzewodnikowej, umieszczonej wewnątrz obudowy tranzystora do otoczenia, należy dobrać radiator tak, żeby jego rezystancja termiczna  $R_{th\ r-a}$  spełniał następującą zależność:

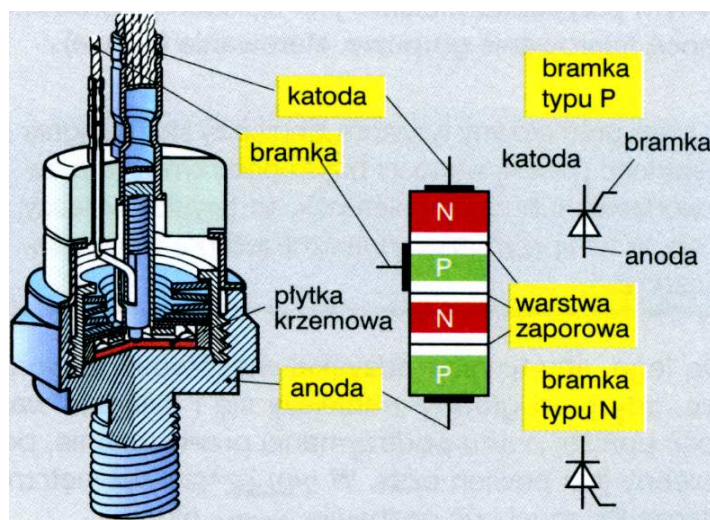
$$R_{th\ r-a} \leq R_{th} - R_{th\ j-o} - R_{th\ o-r} \quad (13.53)$$

gdzie  $R_{th\ j-o}$  jest rezystancją termiczną przejścia złącze-obudowa, a  $R_{th\ o-r}$  przejścia obudowa-radiator.

### 13.5.3. Tyrystory

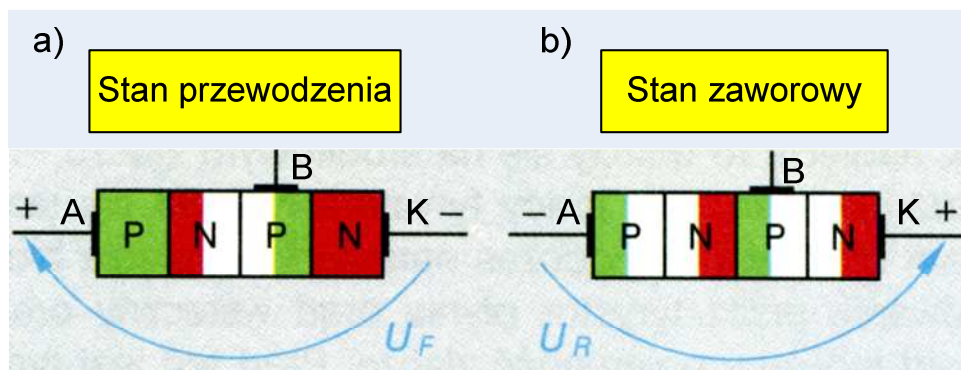
Tyrystory stanowią grupę przyrządów półprzewodnikowych wielowarstwowych. Są nazywane także zaworami sterowanymi i składają się co najmniej z czterech warstw półprzewodnika (rys.13.29.), np. struktura pnpn. Jednym z najpopularniejszych tyrystorów jest tyrystor triodowy blokujący wstecznie, często nazywany także **tyrystorem konwencjonalnym SCR** (ang. Silicon-Controlled-Rectifier).

Obecnie stosowane tyrystory mają możliwości blokowania wysokich napięć do 10 kV i przewodzenia prądów roboczych do około 5 kA. Dlatego wykorzystuje się je do budowy przekształtników energoelektronicznych największych mocy (rzędu MW) stosowanych w elektroenergetyce.



Rys.13.29. Budowa wewnętrzna, struktura i symbol tyrystora

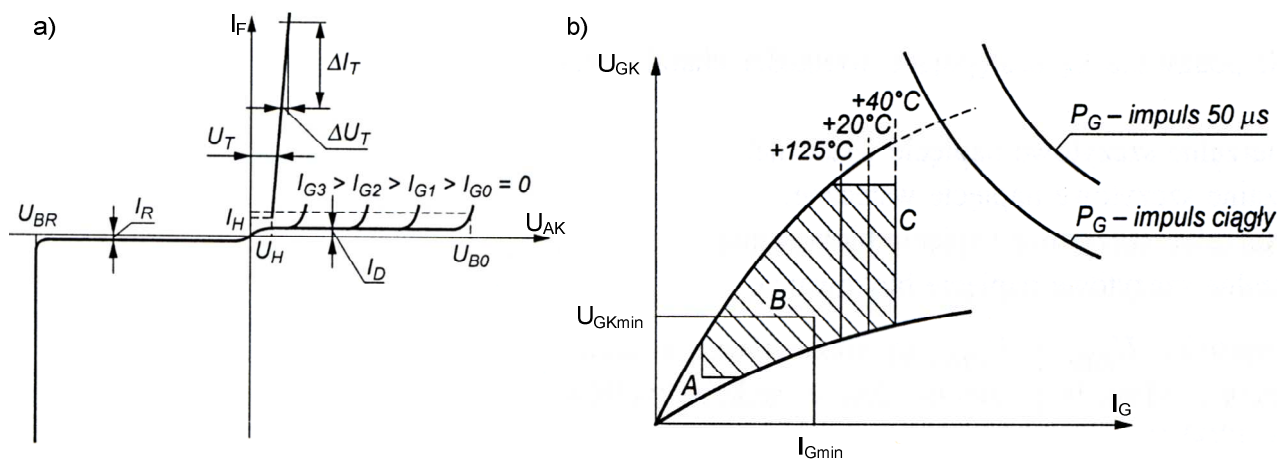
Elektroda wyprowadzenia zewnętrznej warstwy półprzewodnika p nazywa się **anodą** (A), a elektroda wyprowadzenia zewnętrznej warstwy półprzewodnika n, **katodą** (K). Najczęściej na zewnątrz wyprowadzona jest elektroda z wewnętrznej warstwy p, która stanowi **bramkę** (G). Oprócz tyrystorów, w których bramka jest sterowana względem katody, produkuje się także tyrystory, w których bramka jest wyprowadzona z wewnętrznej warstwy n i jest sterowana względem anody.



Rys.13.30. polaryzacja złączy tyrystora, a) stan przewodzenia, b) stan zaworowy

Wewnętrzna struktura tyrystora zawiera trzy złącza półprzewodnikowe (rys.12.30.). Jeżeli pomiędzy anodę i katodę przyłożą się napięcie to zawsze któreś złącze będzie spolaryzowane w kierunku zaporowym i przez tyrystor nie będzie płynął prąd. Gdy napięcie  $U_{AK} > 0$ , tzn. anoda ma wyższy potencjał niż katoda, tylko jedno złącze jest spolaryzowane zaporowo i stan, w którym znajduje się tyrystor nazywamy **stanem blokowania**. W tym stanie, po wymuszeniu w obwodzie bramkowym prądu o odpowiedniej wartości można załączyć tyrystor i wymusić w obwodzie anoda-katoda prąd roboczy  $I_F$ . Przy polaryzacji przeciwnej tj.  $U_{AK} < 0$  dwa złącza są spolaryzowane w kierunku zaporowym i stan, w którym znajduje się tyrystor nazywamy **stanem zaporowym**. Tyrystor zachowuje się zatem jak sterowana dioda półprzewodnikowa, dlatego można je zastosować w układach prostowników sterowanych lub łącznikach bezstykowych. Aby przerwać przepływ prądu głównego w załączonym tyrystorze i odzyskać właściwości zaporowe przyrządu należy zmienić kierunek przepływu prądu głównego. Tyrystor wyłączy się, tzn. odzyska właściwości zaporowe wtedy, kiedy prąd główny zmniejszy swoją wartość poniżej prądu podtrzymania  $I_H$  (rys.13.31.a). Jeżeli tyrystor pracuje w obwodzie prądu przemiennego to przy końcu każdej dodatniej półfali napięcia zasilającego prąd przewodzenia w sposób naturalny jest mniejszy od prądu  $I_H$  i tyrystor wyłączy się. W obwodach, w których nie występuje **komutacja naturalna** należy zastosować specjalne obwody zwane **obwodami komutacyjnymi**, które wymuszają przez odpowiednio długi czas przepływ prądu wstecznego w tyrystorze i w ten sposób zmniejszą prąd przewodzenia poniżej wartości prądu podtrzymania wyłączając tyrystor. **Czas wyłączania tyrystora** potrzebny na odprowadzenie ładunku z wewnętrznego złącza przyrządu jest stosunkowo długi od 100  $\mu s$  do 300  $\mu s$ . W tyrystorach szybkich może być krótszy (rzędu 5  $\mu s$ ).

Podczas narastania napięcia blokowania przez tyrystor płynie prąd ładujący pojemność złącza. Prąd ten jest tym większy im szybciej narasta napięcie blokowania. Wewnętrzne złącze może być tak silnie wzbogacane ładunkiem, że tyrystor bez udziału prądu bramki samoczynnie załączy się. Aby temu zapobiec **szybkość narastania napięcia blokowania** nie może być większa od wartości dopuszczalnej. Wartość ta leży w zakresie od 50 V/ $\mu s$  do 1000 V/ $\mu s$ . Podczas załączania prąd główny (anodowy) tyrystora również nie może narastać zbyt szybko, np. przy złączaniu obciążenia o charakterze pojemnościowym lub rezystancyjnym, ponieważ w tym wypadku pastylka krzemowa może ulec uszkodzeniu przez punktowe przegrzanie struktury. Dopuszczalne wartości **prędkości narastania prądu anodowego** w zależności od typu tyrystora zmieniają się w zakresie od 100 A/ $\mu s$  do 1000 A/ $\mu s$ .



Rys.13.31. Charakterystyki tyrystora, a) anodowa, b) bramkowa



Dla tyrystorów podaje się dwie podstawowe charakterystyki prądowo-napięciowe: charakterystykę obwodu głównego (nazywana także anodową)  $I_F = f(U_{AK})$  przy  $I_G = \text{const}$  (rys.13.31.a) oraz charakterystykę obwodu bramki (zwaną krótko bramkową)  $U_{GK} = f(I_G)$  przedstawioną na rys.13.31.b. Zwiększanie wartości prądu bramki powoduje zmniejszanie się napięcia  $U_{B0}$ , przy którym następuje załączenie tyrystora, zwanego krótko napięciem przełączania.

Charakterystyka bramkowa tyrystora obejmuje pewną powierzchnię ograniczoną rozrzutem technologicznym parametrów obwodu bramki dla tego samego typu przyrządu, na którym zaznaczone są obszary, w których:

A – nie jest możliwe załączenia tyrystora

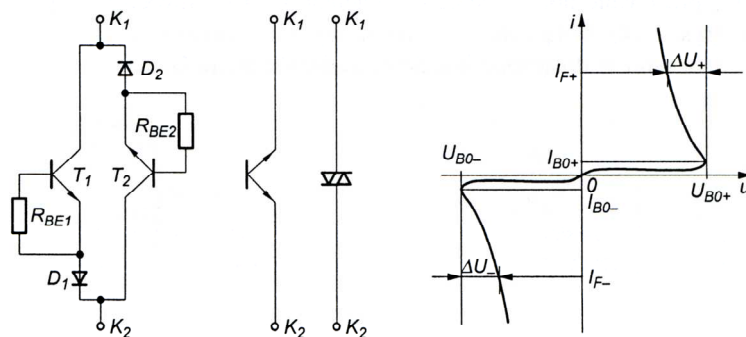
B – załączenie tyrystora jest możliwe

C – załączenie tyrystora jest pewne

Wartości prądu i napięcia impulsu załączającego tyrystor generowanego w obwodzie zasilającym bramkę powinny znajdować się w obszarze C.

#### 13.5.4. Diak

Diak (ang. DIAC Diode-AC-Switch) jest elementem dwuzłączowym o symetrycznej strukturze tranzystora npn lub pnp, w którym dzięki odpowiedniemu domieszkowaniu kolektor i emiter są wzajemnie wymienne, a baza nie jest wyprowadzona. Schemat ideowy zastępczego układu diaka z zastosowaniem tranzystorów bipolarnych przedstawiono na rys.13.32. Układ składa się z dwóch jednokierunkowych łączników progowych połączonych odwrotnie równolegle. Złącza kolektorowe tranzystorów obu łączników, w zależności od polaryzacji napięcia zewnętrznego, pracują w zakresie tzw. drugiego przebiecia. Kształt charakterystyki prądowo-napięciowej diaka wynika z faktu, że przy nie spolaryzowanej bazie ( $I_B = 0$ ) napięcie przebiecia  $U_{CE0}$  jest dużo mniejsze niż napięcie  $U_{CB0}$ . charakterystyka prądowo-napięciowa diaka jest symetryczna.

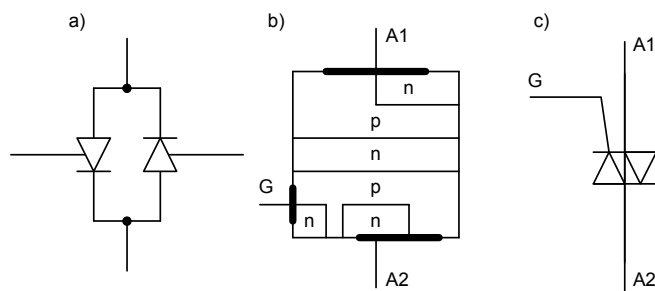


Rys.13.32. Diak, a) model tranzystorowy, b) symbol, c) charakterystyki prądowo - napięciowe

Do podstawowych parametrów tego elementu zaliczamy napięcia przełączania  $U_{B0+}$ ,  $U_{B0-}$ , symetryczne dla obu polaryzacji (typowa wartość  $32 \pm 4$  V), skok napięcia po przełączeniu  $\Delta U = \Delta U_- = \Delta U_+$  (około 8 V przy  $I_F = 10$  mA) oraz moduł różnicy napięć przełączania  $|U_{B+} - U_{B-}|$ , który jest miarą asymetrii charakterystyki prądowo-napięciowej (około 3 V). Diaki są stosowane w układach obróbki sygnałów do przełączania i formowania impulsów synchronizujących oraz uzależnień czasowych lub układach załączających inne łączniki np. wyzwalań bramkowych tyrystorów lub triaków.

#### 13.6.5.Triak

Triak (ang. Triode-for-Alternating-Current) jest nazywany także tyrystorem symetrycznym. Jest zbudowany z dwóch tyrystorów tworzących łącznik odwrotnie równoległy (rys. 13.33.a). Najczęściej wykonany jest jako struktura pięciowarstwowa (rys.13.33.b) i ma trzy wyprowadzenia: dwie anody A1, A2 oraz bramkę G.



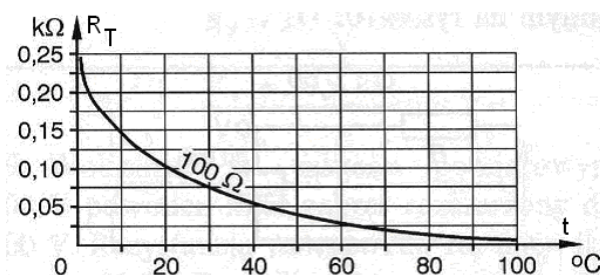
Rys.13.33. Triak, a) jako połączenie odwrotnie równoległe dwóch tyrystorów, b) struktura, c) symbol

Charakterystyki prądowo-napięciowe triaka mają symetryczny przebieg w I i III ćwiartce układu współrzędnych, a ich kształt jest identyczny jak tyrystora w zakresie I ćwiartki (rys. 13.31.a). Triak jest sterowany impulsowo prądem bramki względem dowolnej anody A1 lub A2. Zazwyczaj producent podaje biegunowość oraz wartości napięcia i prądu impulsu załączającego, dla występującej pomiędzy anodami, dodatniej i ujemnej wartości napięcia  $U_{A1A2}$ .

## Ćwiczenia

### Ćwiczenie 13.1.

Dla termistora NTC, którego charakterystykę  $R = f(T)$  przedstawiono na rysunku wyznaczyć temperaturowy współczynnik rezystancji  $d_{20}$ .



Rys, 13.34

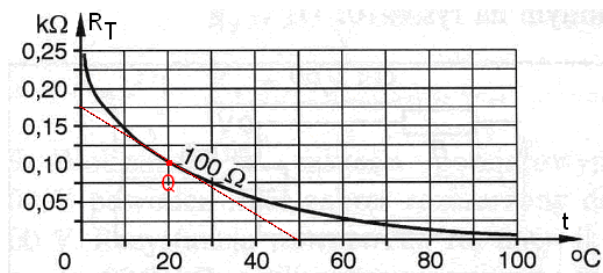
### Rozwiązanie:

Temperaturowy współczynnik rezystancji termistora  $d_{20}$  najczęściej jest podawany w procentach i można go obliczyć ze wzoru:

$$d_{20} = \frac{1}{R_{20}} \frac{dR_T}{dT} 100\% \approx \frac{1}{R_{20}} \frac{\Delta R_T}{\Delta T} 100\%$$

Z charakterystyki odczytujemy, że w temperaturze  $t = 20^\circ\text{C}$  rezystancja termistora  $R_T = R_{20} = 100 \Omega$ .

Wartość wyrażenia można oszacować rysując styczną do wykresu charakterystyki  $R_T = f(t)$  w punkcie Q (20, 100).



Rys. 13.35

Wartość tego wyrażenia oraz współczynnik  $d_{20}$  są równe:

$$\frac{\Delta R_T}{\Delta T} = -\frac{175}{50} = -3,5$$

$$d_{20} = -\frac{3,5}{100} \cdot 100\% = 3,5\%$$

**Odp.**  $d_{20} = 3,5 \%$

### Ćwiczenie 13.2.

Obliczyć szerokość bariery potencjału w złączu półprzewodnikowym w temperaturze 300 K, jeżeli koncentracje atomów domieszki donorowej jest równe  $N_d = 10^{20} \text{ m}^{-3}$ , a domieszki akceptorowej  $N_a = 1,5 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$ . Koncentracja nośników samoistnych  $n_i = 10^{19} \text{ m}^{-3}$ , stała Boltzmanna  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ , ładunek elementarny  $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .

#### Rozwiązanie:

Bariera potencjału jest wytworzona przez różnoimienne, nieruchome jony atomów tkwiące w siatce krystalicznej w pobliżu obszaru złącza półprzewodnikowego. Można ją obliczyć ze wzoru:

$$U_D = U_T \ln \frac{N_a \cdot N_d}{n_i^2}$$

Potencjał termokinetyczny  $U_T$  zależy od temperatury i jest równy:

$$U_T = \frac{kT}{e} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,602 \cdot 10^{-19}} = 25,84 \text{ mV}$$

Zatem napięcie bariery potencjału  $U_D$  dla tego złącza ma wartość:

$$U_D = 25,84 \cdot 10^{-3} \ln \frac{1,5 \cdot 10^{20} \cdot 10^{20}}{10^{19}^2} = 1,26 \text{ V}$$

**Odp.** Napięcie bariery potencjału  $U_D = 1,26 \text{ V}$

### Ćwiczenie 13.3.

Tranzystor krzemowy pracuje w zakresie temperatur od  $20^\circ\text{C}$  do  $40^\circ\text{C}$ . Wiedząc, że w temperaturze  $25^\circ\text{C}$  prąd zerowy tranzystora  $I_{CB0(25)} = 0,1 \text{ mA}$  obliczyć, w jakim zakresie zmienia się wartość tego prądu. Przyjmując, że w przyjętym zakresie temperatur statyczny współczynnik wzmocnienia prądowego tranzystora nie zmienia i ma wartość  $\beta_0 = 300$  obliczyć zmianę prądu  $I_{CE0}$ .

### Rozwiązanie:

Prądy zerowe tranzystorów krzemowych podwajają swoją wartość przy każdym wzroście temperatury o 6 °C. Można to zapisać w postaci:

$$I_{CB0}(T) = I_{CB0(25)} \cdot 2^{\frac{T-T_{25}}{6}}$$

Podstawiając dane z zadania otrzymujemy:

$$I_{CB0}(20) = 0,1 \cdot 2^{\frac{20-25}{6}} = 0,056 \text{ mA} \quad I_{CB0}(40) = 0,1 \cdot 2^{\frac{40-25}{6}} = 0,566 \text{ mA}$$

Zmiana prądu  $\Delta I_{CB0}$ , w zadanym zakresie zmian temperatury, jest zatem równa:

$$\Delta I_{CB0} = I_{CB0}(40) - I_{CB0}(20) = 0,566 - 0,056 = 0,51 \text{ mA}$$

Prąd  $I_{CE0}$  zależy od prądu  $I_{CB0}$  ze współczynnikiem proporcjonalności  $\beta_0 + 1$ . Można więc napisać:

$$\Delta I_{CE0} = \Delta I_{CB0} (\beta_0 + 1) = 0,51 \cdot (300 + 1) = 153,5 \text{ mA}$$

**Odp.**  $\Delta I_{CB0} = 0,51 \text{ mA}$ ,  $\Delta I_{CE0} = 153,5 \text{ mA}$

### Zadania sprawdzające

#### Zadanie 13.1.

Obliczyć długość ścieżki rezystora półprzewodnikowego o rezystancji  $R = 2 \text{ k}\Omega$  wykonanego w technice scalonej, jeżeli ścieżka ma szerokość  $a = 10 \text{ }\mu\text{m}$ , a rezystywność powierzchniowa warstwy oporowej jest równa  $R_0 = 100 \text{ }\Omega$ .

**Odp.**  $200 \text{ }\mu\text{m}$

#### Zadanie 13.2.

Obliczyć rezystywność materiału półprzewodnikowego  $\rho$  i rezystywność powierzchniową warstwy oporowej  $R_0$ , jeżeli ścieżka o rezystancji  $R = 4 \text{ k}\Omega$  ma wymiary: długość  $l = 160 \text{ }\mu\text{m}$ , szerokość  $a = 10 \text{ }\mu\text{m}$  i wysokość  $h = 10 \text{ }\mu\text{m}$ .

**Odp.**  $\rho = 40 \cdot 10^{-3} \text{ }\Omega\text{m}$ ,  $R_0 = 250 \text{ }\Omega$

#### Zadanie 13.3.

Dla termistora NTC typu UUA32J3, dla którego wyznaczono charakterystykę  $R_t = f(t)$  oszacować stałe materiałowe A i B.

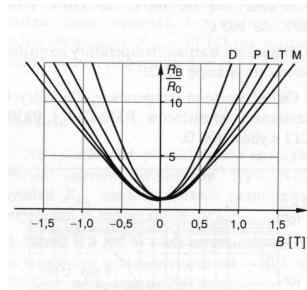
t	°C	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
R <sub>t</sub>	Ω	75780	39860	21460	12460	7353	4481	2813	1814	1200	811,4	560,3	394,6	283,3	206,7	153,1

**Odp.**  $A \approx 6,6 \cdot 10^{-3} \text{ }\Omega$ ,  $B \approx 3900 \text{ K}$

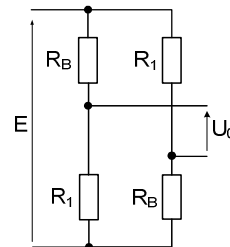
**Zadanie 13.4.**

W układzie pomiarowym (rys.13.1b) zastosowano dwa magnetorezystory o charakterystyce  $P$  przedstawionej na rys.13.1a. Narysować charakterystykę  $U_0 = f(B)$  w zakresie zmian indukcji od 0 do 1 T. Rezystancja  $R_0 = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $E = 5 \text{ V}$ ,  $R_1 = 2 \text{ k}\Omega$ .

a)



b)



Rys.13.36

**Odp.**  $U_0 = E \frac{R_1 - R_B(B)}{R_1 + R_B(B)}$

**Zadanie 13.5.**

Obliczyć dynamiczną rezystancję  $r_{DS}$  tranzystora MOSFET pracującego w zakresie liniowym, jeżeli  $I_D = 0,4 \text{ mA}$ ,  $U_{DS} = 2,5 \text{ V}$ .

**Odp.**  $r_{DS} = 6,25 \text{ k}\Omega$

**Zadanie 13.6.**

Wykazać, że w zakresie pracy nieliniowej tranzystora MOSFET nachylenie charakterystyki bramkowej opisane jest wzorem  $S = \frac{2}{U_{th}^2} \sqrt{I_{DSS} I_D}$ .

**Zadanie 13.7.**

Obliczyć szerokość złącza półprzewodnikowego spolaryzowanego napięciem wstecznym  $U = 5 \text{ V}$ , pracującego w temperaturze  $300 \text{ K}$ , jeżeli koncentracja atomów domieszki donorowej jest równa  $N_d = 10^{20} \text{ m}^{-3}$ , a domieszki akceptorowej  $N_a = 1,5 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$ . Koncentracja nośników samoistnych  $n_i = 10^{19} \text{ m}^{-3}$ , stała Boltzmanna  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$  i ładunek elementarny  $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .

**Odp.**  $11,5 \text{ }\mu\text{m}$

**Zadanie 13.8.**

Obliczyć statyczne współczynniki wzmacnienia prądowego  $\alpha_0$  i  $\beta_0$  tranzystora bipolarnego, jeżeli  $I_E = 2 \text{ mA}$ ,  $I_B = 10 \text{ }\mu\text{A}$  i prąd zerowy  $I_{CB0} = 0,1 \text{ mA}$ .

**Odp.**  $\alpha_0 = 0,94$ ,  $\beta_0 = 17$

**Zadanie 13.9.**

Jakie będą miały wartość: rezystancja dynamiczna  $r_{BE}$  i współczynnik wzmocnienia prądowego tranzystora bipolarnego  $\beta$  przy  $I_C = 2 \text{ mA}$ ,  $U_{CE} = 6 \text{ V}$ , jeżeli przy  $I_C = 5 \text{ mA}$ ,  $U_{CE} = 5 \text{ V}$   $r_{BE} = 800 \text{ }\Omega$ ,  $\beta = 150$ .

**Odp.**  $r_{BE} = 1950 \text{ }\Omega$ ,  $\beta = 150$

**Zadanie 13.10.**

Obliczyć rezystancję termiczną przejścia struktura półprzewodnikowa – radiator, jeżeli znane są napięcia i prądy tranzystora  $I_C = 20 \text{ A}$ ,  $U_{CE} = 3 \text{ V}$ ,  $I_B = 2,5 \text{ A}$ ,  $U_{BE} = 0,7 \text{ V}$ . Temperatura otoczenia  $t_a = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ , a dopuszczalna temperatura pracy złącza  $t_j = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Odp.**  $R_{th\ a-j} = 1,2 \text{ K/W}$

**Test do wykładu 13**

Elementami bezzłączowymi są:

- xa) termistor, warystor, fotorezystor, piezorezystor
- b) magnetorezystor, hallotron, dioda, tranzystor npn
- c) tyrystor, MOSFET, JFET, dioda Schottkyego

13.2. Ze wzrostem temperatury rezystancja termistora NTC

- a) zwiększa się
- xb) zmniejsza się
- c) nie zależy od temperatury

13.3. Rezystancja fotorezystora jest zależna:

- a) od siły nacisku
- b) od natężenia pola magnetycznego
- xc) od natężenia oświetlenia

13.4. Do tranzystorów unipolarnych bezzłączowych zaliczamy:

- a) JFET, MOSFET
- xb) IGFET, MOSFET
- c) MOSFET, BJT

13.5. W diodach Schottkyego jest złącze:

- a) półprzewodnika – izolatora
- b) półprzewodnik – półprzewodnik
- xc) metel – półprzewodnik

13.6. Napięcie progu załączenia diody Schottkyego w stosunku do diody złączowej jest

- xa) mniejsze
- b) większe
- c) takie samo

- 13.7. Główną cechą diody tunelowej jest
- a) duża pojemność warstwy złącza
  - b) zawsze dodatnia rezystancja dynamiczna
  - xc) dodatnia i ujemna rezystancja dynamiczna
- 13.8. Tranzystor JFET jest
- xa) normalnie załączonym
  - b) normalnie wyłączonym
  - c) załączenie tranzystora zależy wyłącznie od napięcia  $U_{GS}$
- 13.9. Prąd kolektora w tranzystorze bipolarnym typu npn w stanie aktywnym
- a) maleje wraz ze wzrostem prądu bazy
  - xb) rośnie proporcjonalnie do prądu bazy
  - c) nie zależy od prądu bazy
- 13.10. Tyristor jest elementem
- a) trójwarstwowym (dwuzłączowym)
  - b) dwuwarstwowym (jednozłączowym)
  - xc) czterowarstwowym (trójzłączowym)
- 13.11. Tyristor można wprowadzić w stan przewodzenia, jeżeli napięcie:
- a)  $U_{AK} > 0$
  - xb)  $U_{AK} > 0$  i w obwodzie bramka-katoda wystąpi impuls prądu  $I_G$
  - c) napięcie  $U_{AK} < 0$  i w obwodzie bramka-katoda wystąpi impuls prądu  $I_G$

Odpowiedzi do testu: 13.1a, 13.2b, 13.3c, 13.4b, 13.5c, 13.6a, 13.7c, 13.8a, 13.9b, 13.10c, 13.11b.