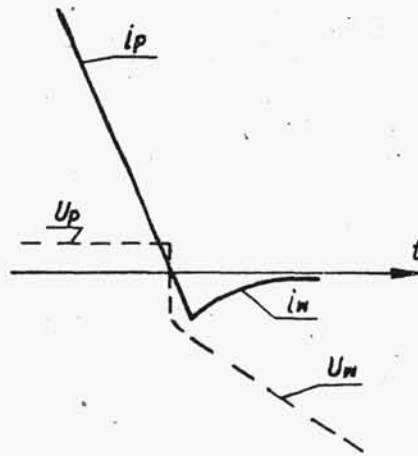


W dotychczasowych rozważaniach rozpatrywano złącza p-n symetryczne, w których obie warstwy półprzewodnikowe (p i n) były domieszkowane jednakowo. W tyrystorach występują złącza niesymetryczne, tj. takie, w których stopień domieszkowania obu warstw jest różny. Jeśli np. w warstwie n złącza występuje koncentracja donorów 100-krotnie wyższa niż koncentracja akceptorów w warstwie p, to przez złącze p-n przepływa jedynie jedna dziura na 100 elektronów. Oznacza to, że z obszaru n do p przepływa znacznie więcej elektronów niż dziur z obszaru p do n. Takie złącze niesymetryczne może być traktowane jako emiter elektronów. Odwrotnie, złącze, w którym warstwa p jest silniej domieszkowana niż warstwa n, będzie emitorem dziur.



Rys.6.7. Zmiana polaryzacji złącza p-n - prąd przewodzenia i_p - prąd wsteczny; U_p - napięcie w stanie przewodzenia; U_m - napięcie polaryzacji wstecznej

6.2. Zasada działania tyrystora

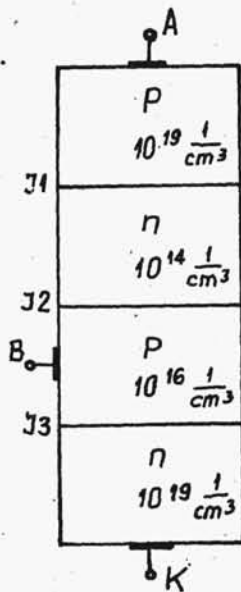
Na rys.6.8 przedstawiono ideowo strukturę tyrystora. Zewnętrzne warstwy półprzewodnikowe są znacznie silniej domieszkowane niż warstwy wewnętrzne tak, że zewnętrzna warstwa n może być traktowana jako emiter elektronów, a zewnętrzna warstwa p - jako emiter dziur.

W tyrystorze można rozróżnić trzy stany:

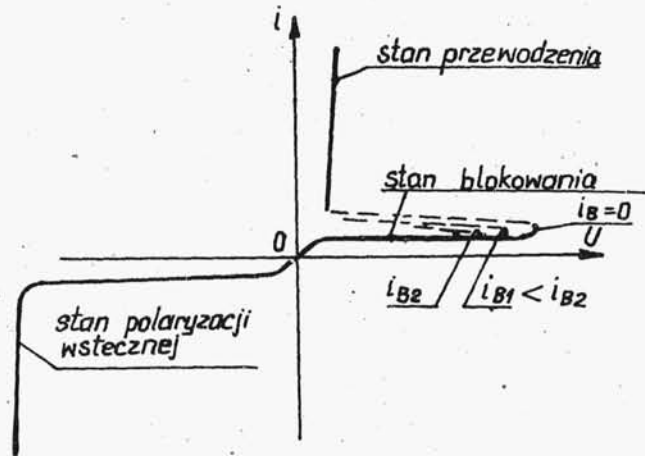
- polaryzacji wstecznej,
- blokowania przy polaryzacji w kierunku przewodzenia,
- przewodzenia.

Charakterystykę prądowo-napięciową dla wszystkich trzech stanów tyrystora przedstawiono na rys.6.9.

W stanie polaryzacji wstecznej (praca zaworowa) złącza J1 i J3 są spolaryzowane zaworowo, a złącze J2 w kierunku przewo-

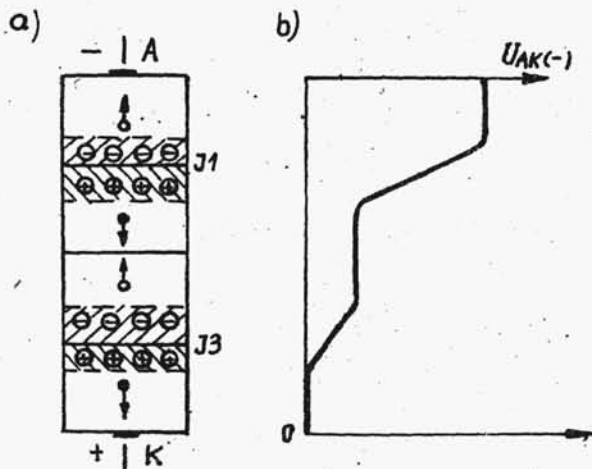


Rys.6.8. Stopień domieszkowania struktur tyrystora



Rys.6.9. Charakterystyka napięciowo-prądowa tyrystora

dzenia (rys.6.10). Napięcie polaryzacji wstecznej rozdziela się na złącza J1 i J3 proporcjonalnie do ich oporu elektrycznego. Złącze J3 (katodowe) ma znacznie mniejszy opór elektryczny (z uwagi na różnice w domieszkowaniu) niż złącze J1 (anodowe), tak, że praktycznie całe napięcie polaryzacji wstecznej występuje na złączu J1. Rozkład napięcia na poszczególnych warstwach tyrystora przedstawiono na rys.6.10b.



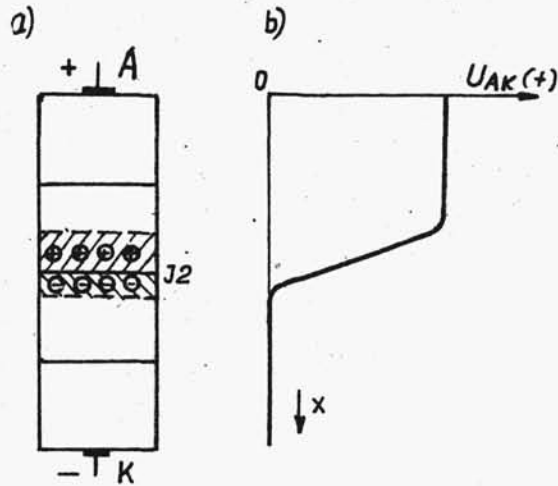
Rys.6.10. Tyrystor w stanie zaworowym
a) struktura, b) rozkład napięcia

Przy polaryzacji w kierunku przewodzenia (rys.6.11) występuje w tyrystorze stan blokowania, tak, że mimo dodatniej polaryzacji anody tyrystor nie przewodzi. Złącza J1 i J3 są spolaryzowane w kierunku przewodzenia, ale środkowe złącze J2 ma polaryzację

wsteczną i blokuje przepływ prądu. Dla uzyskania stanu przewodzenia tyrystora niezbędne jest zniwelowanie blokującego działania złącza J2.

Przejście ze stanu blokowania do stanu przewodzenia może być osiągnięte przez doprowadzenie dodatniego sygnału elektrycznego do obwodu bramka-katoda.

Dla wyjaśnienia zjawisk występujących przy załączaniu (przełączaniu) tyrystora, tj. przechodzenie od stanu blokowania do stanu przewodzenia pod wpływem sygnału bramkowego wygodnie jest posługiwać się schematem zastępczym, w którym tyristor jest przedstawiony jako połączenie dwóch tranzystorów (rys.6.12).

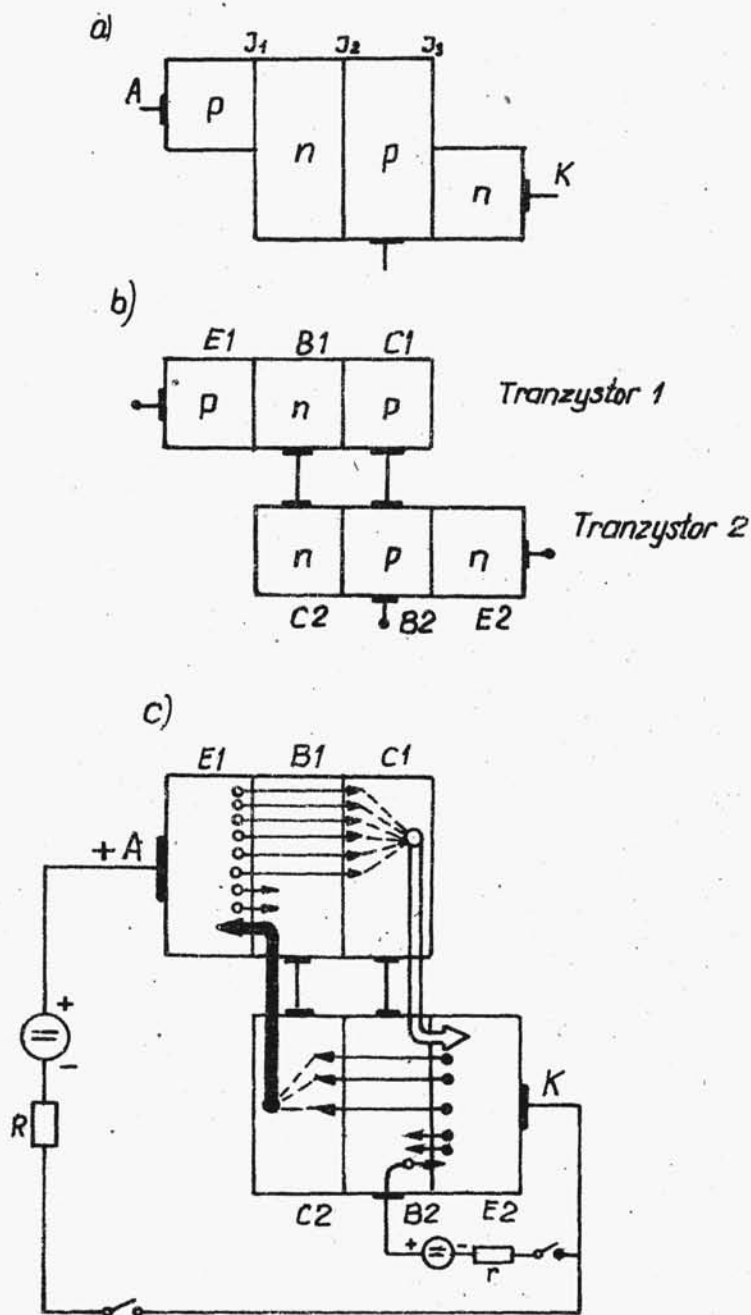


Rys.6.11. Tyrystor w stanie blokowania a) struktura, b) rozkład napięcia

W stanie blokowania całe napięcie zewnętrzne występuje na środkowym złączu J2, co oznacza, że kolektor C1 tranzystora T1 ma ujemną polaryzację względem emitera E1, a kolektor C2 jest dodatnio spolaryzowany względem emitera E2.

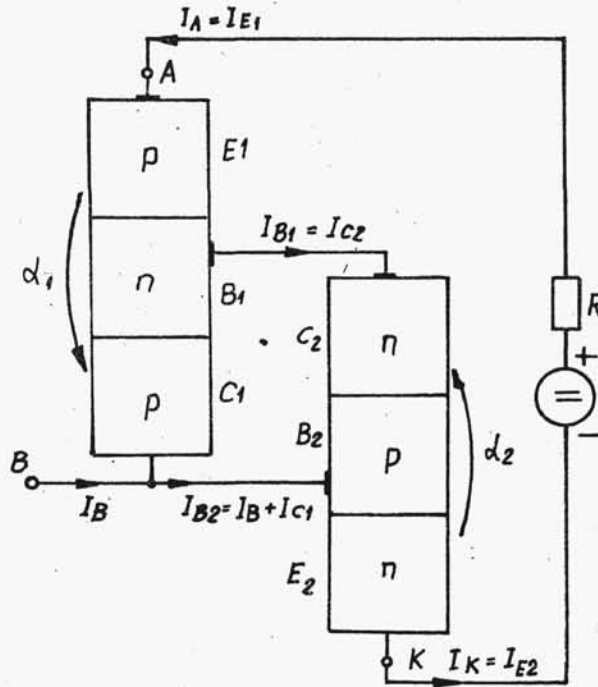
Do złączenia tyrystora potrzebny jest krótkotrwały dodatni sygnał prądowy w obszarze B2-E2 (między bramką sterującą a katodą tyrystora)^{x)}. W wyniku tego sygnału z bazy B2 (o strukturze p) spolaryzowanej dodatnio popłyną do emitera E2 dziury (rys.6.12c). Dodatnia polaryzacja B2 względem E2 wywoła, znacznie większą niż wymieniony uprzednio prąd dziurowy, emisję elektronów z silnie domieszkowanej warstwy n emitera B2. Elektrony te częściowo rekombinują w bazie B2 (o strukturze p), częściowo dochodzą do warstwy ładunku przestrzennego złą-

x) Podobny efekt załączenia tyrystora można uzyskać przy ujemnym sygnale bramkowym i bramce umieszczonej w wewnętrznej strukturze n (drugiej od góry na rys.6.1).



Rys.6.12. Przejście tyrystora od stanu blokowania do przewodzenia a) schemat wyjściowy, b) tranzystorowy schemat zastępczy, c) przepływ ładunków

cza J2 i zostają przechwycone przez kolektor C2 (o polaryzacji dodatniej). Prąd kolektora C2 jest jednocześnie prądem bazy B1 (rys.6.13) tranzystora T1. Wywołuje on z silnie domieszkowanej warstwy p emitera E1 wzmocniony prąd dziurowy, którego część rekombinuje w bazie B1 (o strukturze n), a część przepływa przez złącze J2 do kolektora C1, stając się prądem bazy B2, wywołując następnie wzmocnioną emisję



Rys.6.13. Schemat zastępczy tranzystorowy do analizy przejścia tyrystora ze stanu blokowania do stanu przewodzenia

elektronów z emitera E2 itd. Zjawisko opisane powyżej powtarza się, przy czym z każdym powtórzeniem wzrastają strumienie przepływających przez złącze J2 elektronów i dziur. Obszar ładunku przestrzennego w pobliżu złącza J2 jest obecnie wypełniony nośnikami ładunku (elektronami i dziurami), jego opór elektryczny wydatnie maleje a złącze przechodzi w stan przewodzenia.

Zjawisko załączenia tyrystora (tj. przejście od stanu blokowania do stanu przewodzenia) można również rozpatrywać analitycznie (rys.6.13).

Dla tranzystora "1" można napisać:

$$I_{B1} = (1 - \alpha_1) I_{E1} - I_{CO1}, \quad (6.1)$$

przy czym:

I_{B1} - prąd bazy tranzystora "1",

α_1 - współczynnik wzmocnienia prądowego tranzystora "1",

$I_{E1} = I_A$ - prąd emitera tranzystora "1" równy prądowi anodowemu,

I_{CO1} - prąd upływu tranzystora "1".

Podobnie dla tranzystora "2" będzie:

$$I_{C2} = \alpha_2 I_{E2} + I_{CO2}, \quad (6.2)$$

przy czym:

$I_{C2} = I_{B1}$ - prąd kolektora tranzystora "2",

$I_{E2} = I_K$.

Pamiętając, że $I_K = I_A + I_B$ (I_B - prąd bramki) oraz przyjmując powyższe zależności, otrzymuje się po przekształceniach:

$$I_A = \frac{\alpha_2 I_B + I_{CO1} + I_{CO2}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}. \quad (6.3)$$

Jeśli $\alpha_1 + \alpha_2 \ll 1$, wartość prądu anodowego I_A jest również bardzo mała i odpowiada to stanowi blokowania.

Jeśli $\alpha_1 + \alpha_2 \rightarrow 1$, prąd anodowy silnie wzrasta, co oznacza, że tyrystor przechodzi w stan przewodzenia. Od tej chwili przestaje również obowiązywać tranzystorowy schemat zastępczy tyrystora.

Warunek załączenia tyrystora można więc sformułować:

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 1. \quad (6.4)$$

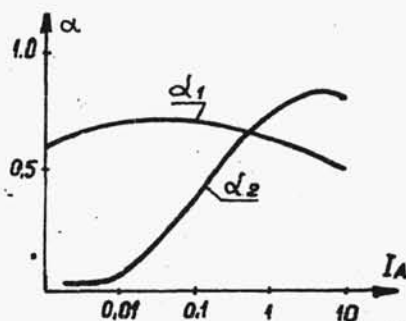
Możliwość przejścia tyrystora od stanu blokowania ($\alpha_1 + \alpha_2 \ll 1$) do stanu przewodzenia ($\alpha_1 + \alpha_2 = 1$) wynika z fak-

tu, że współczynniki α_1 i α_2 są funkcjami prądu anodowego (rys.6.14). Jednoczesna analiza rys.6.14 i wzoru 6.3 pozwala na wyjaśnienie kilku możliwych mechanizmów załączenia tyrystora, a mianowicie załączenia bramkowego, napięciowego i temperaturowego.

Gdy prąd bramki będzie miał dostatecznie dużą wartość, to wówczas zgodnie z wzorem (6.3) prąd anodowy osiągnie również wystarczająco dużą wartość, przy której (patrz wykresy na rys.6.14) $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$. Po przejściu w stan przewodzenia, sygnał bramkowy nie jest potrzebny do utrzymania tyrystora w tym stanie. Przewodzi on bowiem aż do momentu, gdy prąd płynący przez tyrystor zmaleje poniżej wartości nazywanej prądem podtrzymania. Napięcie na tyrystorze w stanie przewodzenia spada do bardzo małej wartości (ok. 1 V) i w niewielkim stopniu zależy od prądu płynącego przez tyrystor.

Załączenie napięciowe przy braku sygnału bramkowego ($I_B = 0$) ma miejsce wówczas, gdy wartość napięcia anodowego będzie na tyle duża, że prąd upływu ($I_{CO1} + I_{CO2}$), wzrastający wraz z napięciem anodowym, osiągnie wartość, przy której prąd anodowy spowoduje spełnienie warunku $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$.

Prąd upływu wzrasta wykładniczo wraz z temperaturą, tak, że przy dostatecznie wysokiej temperaturze może wystąpić załączenie tyrystora przy braku sygnału bramkowego i napięciu anodowym niższym od napięcia załączenia wymienionego powyżej.



Rys.6.14. Zależność $\alpha = f(I_A)$

6.3. Zasada działania symistora

Opisany w poprzednim punkcie tyrystor działa jedynie przy określonej polaryzacji napięcia zasilającego^{x)} oraz sygnału

^{x)} W związku z tym jest nazywany również diodą sterowaną