Urządzenia Półprzewodnikowe 2

Ćw. X. Tyrystor

Cel ćwiczenia: Zapoznanie się z zasadą działania tyrystora, wyznaczenie charakterystyki statycznej oraz przebiegów czasowych podczas włączania tyrystora.

Zagadnienia: tyrystor, charakterystyka prądowo-napięciowa tyrystora.

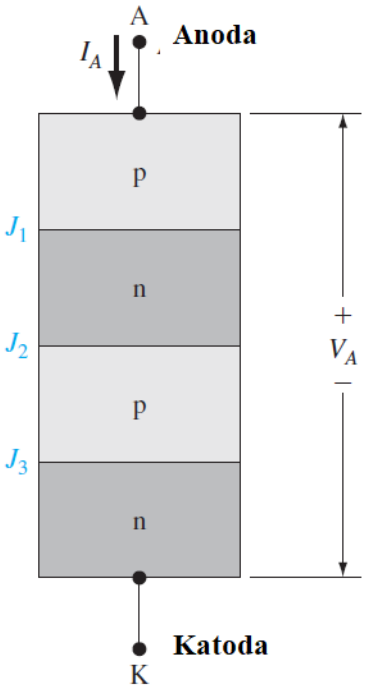
1. Wprowadzenie

Jednym z najważniejszych zastosowań urządzeń elektronicznych jest możliwość realizacji stanów przełączania „włącz/wyłącz" (ang. „on/off"). Należy do nich tranzystor, który może być włączany w zależności od rodzaju - albo prądowo (bipolarny), albo napięciowo (polowy). W przypadku tranzystora stan włączenia jest podtrzymywany odpowiednio przez prąd lub napięcie.

Tyrystor jest czteroelementowym urządzeniem pnpn, w którym stan włączenia jest podtrzymywany pomimo ustania przyczyny, która spowodowała jego przełączenie w ten stan. Tyrystor jest stosowany m.in. do włączania układów, w których płyną duże prądy przy niskich częstotliwościach, jak np. w urządzeniach przemysłowych pracujących przy częstotliwości sieciowej 50Hz.

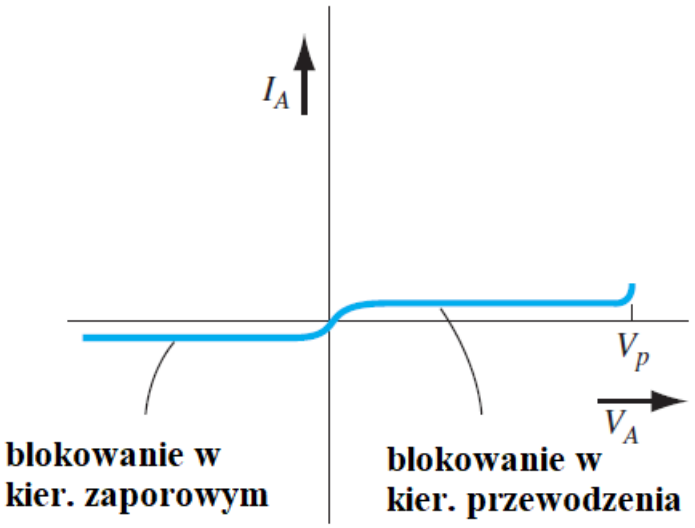
2. Budowa tyrystora

Na Rys. 1 przedstawiono strukturę pnpn tyrystora. Górny obszar p nazywa się anoda a dolny n – katodą.



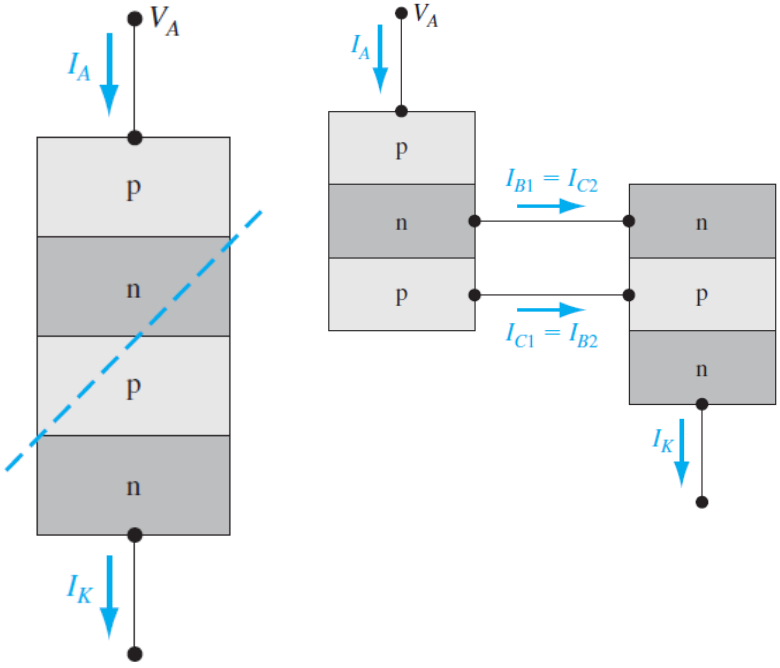
Rys. 1. Budowa tyrystora

Jeśli anoda jest na potencjale dodatnim względem katody, to złącza J_1 i J_3 są spolaryzowane w kierunku przewodzenia ale złącze J_2 - w kierunku zaporowym i tyrystor nie przewodzi prądu. Jest w stanie blokowania przy polaryzacji w kierunku przewodzenia. Jeśli polaryzacja jest przeciwna, przewodzi tylko złącze J_2 i tyrystor jest zablokowany ponownie – tj. blokowanie w kierunku zaporowym. Charakterystyka prądowo-napięciowa odpowiadająca stanowi blokowania tyrystora jest przedstawiona na Rys. 2.



Rys. 2. Charakterystyka I-V tyrystora w stanie blokowania.

Aby zrozumieć działanie tyrystora w stanie włączenia, można zamodelować tyrystor jako połączenie dwóch tranzystorów: pnp i npn, tak jak to pokazano na Rys. 3a.



Rys. 3a) Model tyrystora jako połączenie dwóch tranzystorów bipolarnych : pnp i npn. 3b) Równoważny obwód elektryczny.

Jak wynika z Rys. 3b, baza tranzystora pnp jest jednocześnie kolektorem tranzystora npn, zatem prąd bazy pnp jest równy prądowi kolektora npn: $I_{B1} = I_{C2}$. Podobnie kolektor tranzystora pnp jest jednocześnie bazą tranzystora npn, więc $I_{C1} = I_{B2}$. W tej konfiguracji (+ baterii podłączony do anody) złącza BK w obydwu tranzystorach są spolaryzowane w kierunku zaporowym a BE w kierunku przewodzenia. Prąd kolektora w tranzystorze pnp:

$$I_{C1} = \alpha_1 I_A + I_{C01} = I_{B2}\,, \tag{1}$$

natomiast prąd kolektora w tranzystorze npn:

$$I_{C2} = \alpha_2 I_K + I_{C02} = I_{B1}. \tag{2}$$

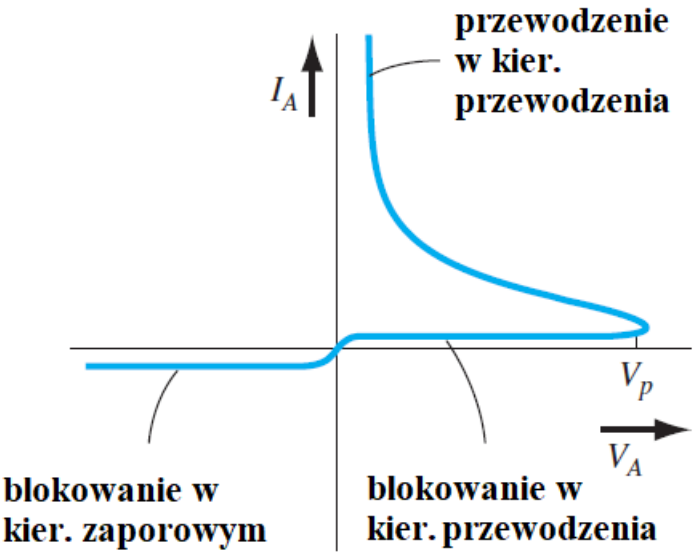
We wzorach (1) i (2) I_{C1}, I_{C2} oznaczają prąd kolektora, I_{B1}, I_{B2} – prąd bazy, I_{C01}, I_{C02} - prąd złącza kolektorowego spolaryzowanego zaporowo przy $I_B = 0$, odpowiednio dla tranzystora pnp i npn. W układzie o wspólnej bazie $\alpha = \frac{I_C - I_{Co}}{I_E}$, gdzie I_E – prąd emitera. Tu rolę prądów emitera odgrywają I_A i I_K. Po dodaniu wzorów (1) i (2) i skorzystaniu z relacji $I_A = I_K$ otrzymujemy:

$$I_{C1} + I_{C2} = I_A = (\alpha_1 + \alpha_2) I_A + I_{C01} + I_{C02}\,, \tag{3}$$

a stąd po przekształceniu

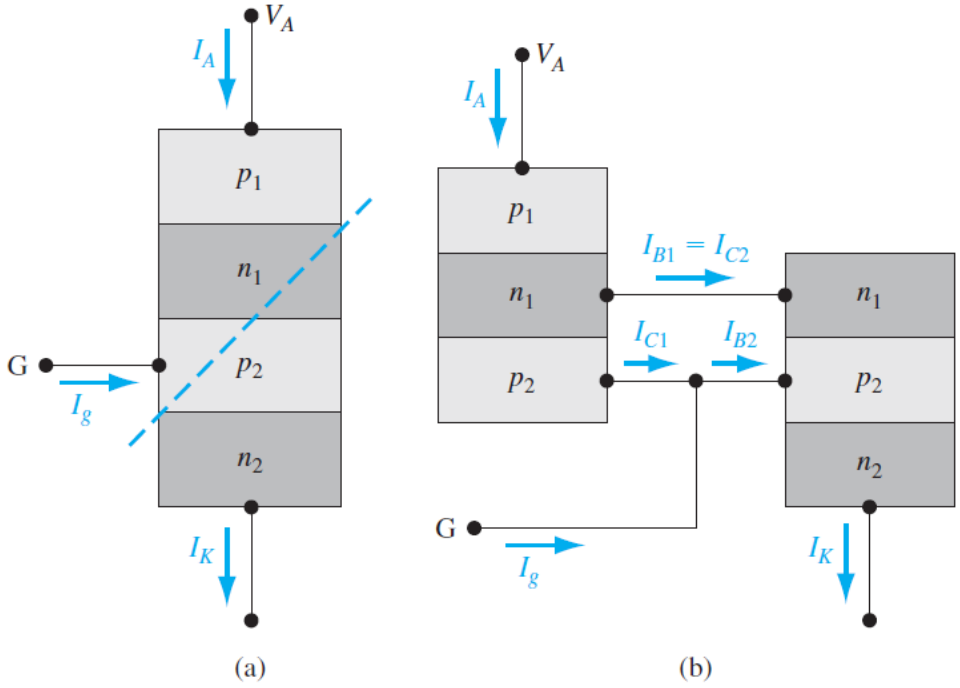
$$I_A = \frac{I_{C01} + I_{C02}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}\,. \tag{4}$$

Dopóki $(\alpha_1 + \alpha_2)$ jest małe, tyrystor pozostaje w stanie blokowania. Jeśli jednak spowoduje się włączenie złącza J_2 to suma $(\alpha_1 + \alpha_2)$ stanie się bliska 1 i prąd I_A wzrośnie tak, że tyrystor przejdzie w stan przewodzenia. Włączenie złącza J_2 może nastąpić albo poprzez podanie wysokiego napięcia na anodę albo poprzez wstrzyknięcie nośników do złącza J_2. W efekcie, charakterystyka I-V tyrystora wygląda tak, jak przedstawiono na Rys. 4.



Rys. 4. Charakterystyka I-V tyrystora w stanie blokowania i przewodzenia.

Rys. 5 przedstawia trójelektrodowy tyrystor w którym trzecią elektrodą jest bramka. Prąd bramki służy do odblokowania tyrystora.



Rys. 5. a) Trójelektrodowy tyrystor b) schemat zastępczy tyrystora z rys. a).

Rozważmy ponownie równania (1) i (2).

$$I_{C1} = \alpha_1 I_A + I_{C01} \tag{5}$$

$$I_{C2} = \alpha_2 I_K + I_{C02}, \tag{6}$$

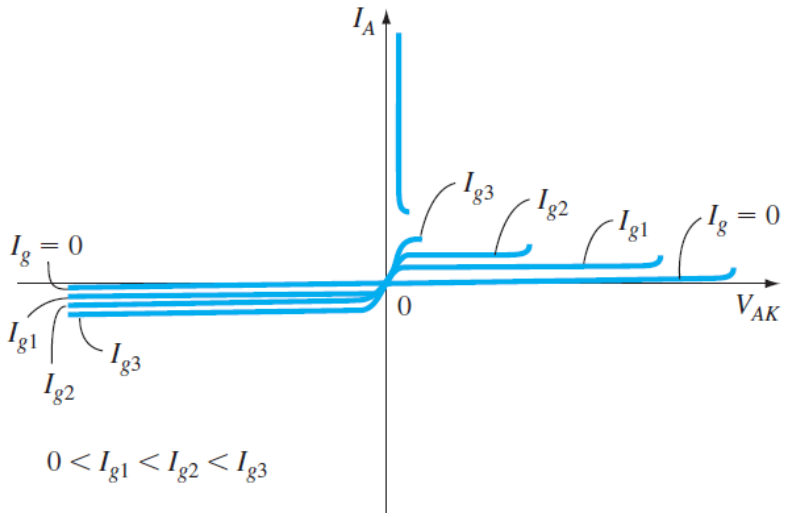
ale teraz $I_K = I_A + I_G$ podczas gdy nadal $I_{C1} + I_{C2} = I_A$. Po dodaniu (5) i (6) mamy:

$$I_{C1} + I_{C2} = I_A = (\alpha_1+\alpha_2)I_A + \alpha_2 I_G + I_{C01} + I_{C02}, \tag{7}$$

a po przekształceniu mamy:

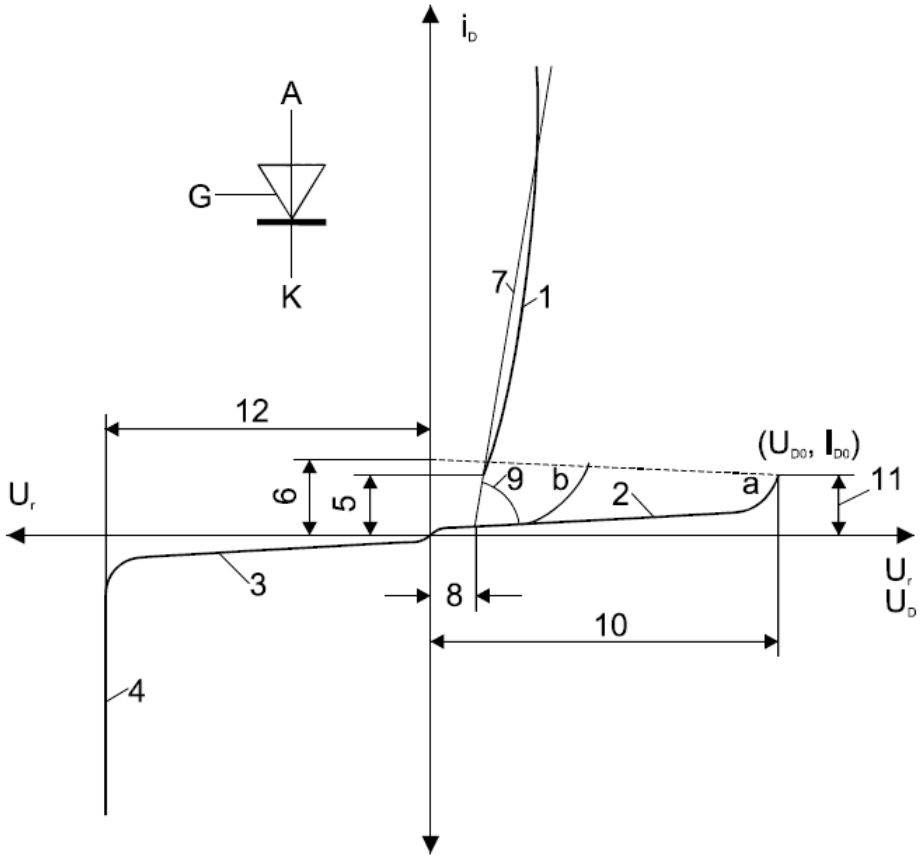
$$I_A = \frac{\alpha_2 I_G + I_{C01} + I_{C02}}{1-(\alpha_1+\alpha_2)}. \tag{8}$$

Prąd bramki stanowią dziury, które są wstrzykiwane do obszaru p_2 w tranzystorze npn. Dodatkowe dziury powodują wzrost potencjału tego obszaru, napięcie BE rośnie i tranzystor npn zaczyna przewodzić prąd. To powoduje wzrost prądu kolektora I_{C2} tranzystora npn i w efekcie wzrost prądu bazy tranzystora pnp i przełączenie tyrystora w stan przewodzenia. Na rysunku 6 przedstawiono charakterystyki I-V tyrystora dla kilku prądów bramki. Prąd bramki zwykle jest rzędu mA podczas gdy prąd I_A może być rzędu setek A.



Rys. 6. *Charakterystyki I-V tyrystora dla kilku prądów bramki.*

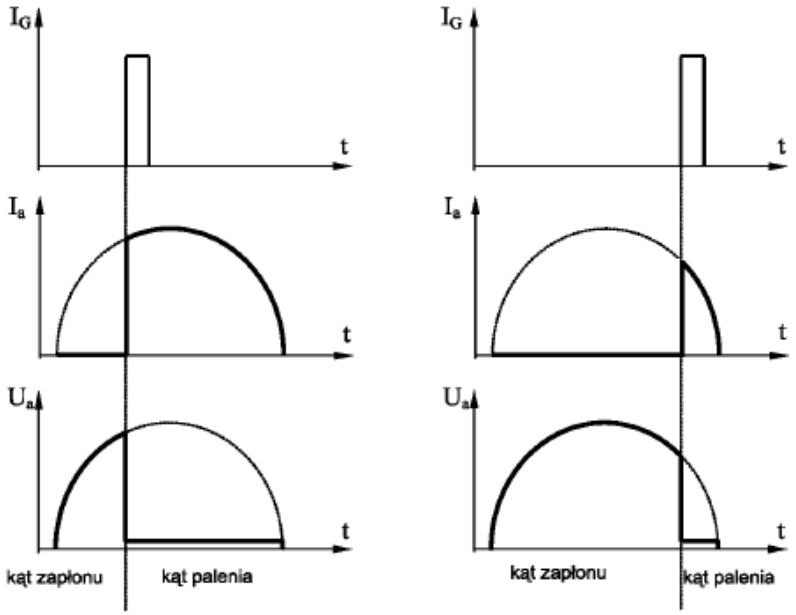
Na Rys. 7 przedstawiono charakterystykę prądowo-napięciową tyrystora.



Rys. 7. Charakterystyka napięciowo-prądowa obwodu głównego tyrystora:

a-bez prądu bramki, b-z prądem bramki, 1-charakterystyka w stanie przewodzenia, 2-charakterystyka w stanie blokowania, 3-charakterystyka w stanie zaporowym, 4-obszar przebicia, 5-prąd podtrzymania, 6-prąd włączania, 7-aproksymacja prostoliniowa w stanie przewodzenia, 8-napięcie progowe, 9-rezystancja dynamiczna w stanie przewodzenia, 10-napięcie przełączania, 11-prąd przełączania, 12-napięcie przebicia

Tyrystor może być wyzwalany napięciem stałym, przemiennym lub za pomocą impulsu.
Na rys. 8 przedstawiono przebiegi napięcia i prądu tyrystora dla różnych faz impulsu załączającego. Do momentu podania na bramkę tyrystora impulsu wyzwalającego tyrystor nie przewodzi. Napięcie na jego anodzie odpowiada zmianom wartości chwilowej napięcia zasilania, a przez tyrystor i obciążenie praktycznie nie płynie prąd. W chwili włączenia tyrystora, napięcie na nim spada do poziomu wartości napięcia występującego na przewodzącym tyrystorze, a przez tyrystor i obciążenie zaczyna płynąć prąd. Moment załączenia tyrystora, przez doprowadzenie do bramki impulsu wyzwalającego odpowiada kątowi załączenia nazywanego również *kątem zapłonu* (jest to inaczej czas włączenia). Natomiast kąt (czas) kiedy tyrystor przewodzi nazywamy *kątem palenia.*
Suma czasów (kątów) zapłonu i palenia jest stała i wynosi $\pi/2$ dla prostownika dwupołówkowego i π dla prostownika jednopołówkowego.



Rys. 8 Przebiegi napięcia U_a i prądu I_a tyrystora dla dwóch faz impulsu wyzwalającego I_G