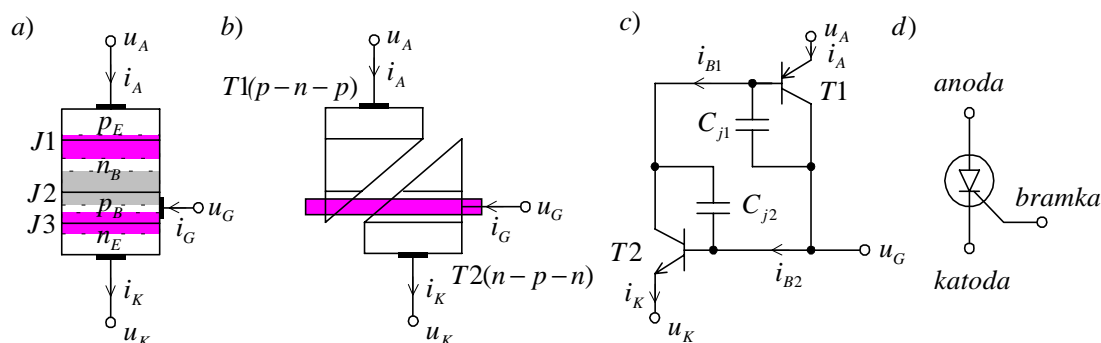


7 TYRYSTORY I TRIAKI

7.1. BUDOWA I DZIAŁANIE TYRYSTORA

Tyrystor jest przyrządem półprzewodnikowym zbudowanym z czterech naprzemian ułożonych warstw typu n i p, które tworzą trzy złącza p-n: J1, J2 i J3 (rys.7.1). Takie struktury złączowe mają wiele form konstrukcyjnych, które pracują jako przełączniki - nawet dość dużych mocy. Najprostszym przełącznikiem jest *dioda Shockleya* p-n-p-n. Dioda ta przy napięciu U_B przełącza się z wysokoomowego *stanu blokowania* do niskoomowego *stanu przewodzenia*. Przełączenie jest inicjowane przebiegiem lawinowym środkowego złącza J2. W tyrystorze wartość napięcia przełączenia jest kontrolowana prądem bramki I_G (rys.7.2).

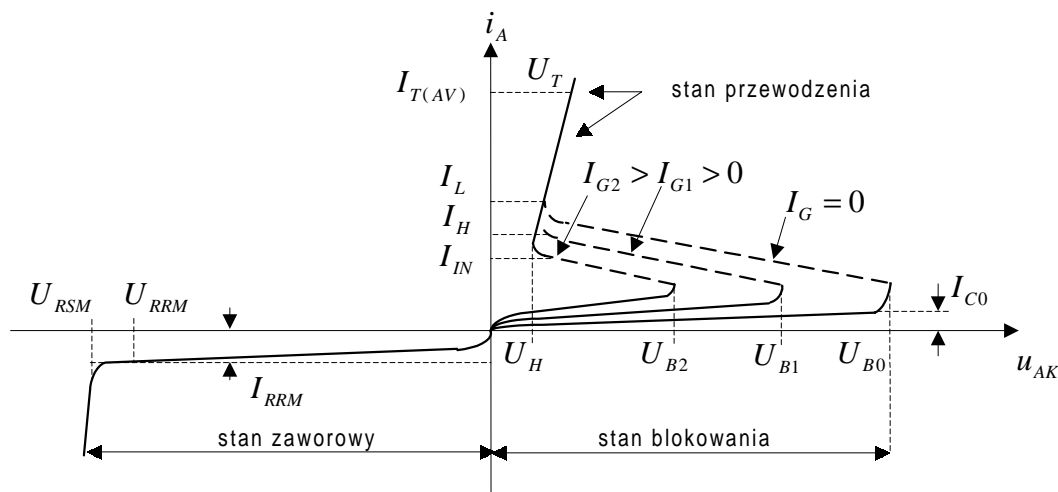
Tyrystor najlepiej jest przedstawić jako szeregowo-równoległy układ dwóch sterujących się wzajemnie tranzystorów bipolarnych p-n-p i n-p-n, jak to przedstawiono na rys.7.1c.



Rys.7.1 a) Struktura złączowa tyrystora, b) modelowe rozdzielanie na dwie struktury tranzystorowe, c) tranzystorowy model tyrystora, d) symbol graficzny

Charakterystyki napięciowo-prądowe tyrystora odzwierciedlają zachowanie się poszczególnych złącz p-n (rys.7.2).

Przy polaryzacji rewersyjnej ($u_{AK} < 0$) złącza J1 i J3 są spolaryzowane zaporowo, podtrzymując prawie całkowitą różnicę potencjałów pomiędzy anodą i katodą. Przez tyrystor wtedy płynie minimalny prąd rewersyjny nasycenia obu złącz I_{RRM} , a przyrząd jest w tzw. *stanie zaporowym*. Przy napięciu U_{RSM} nastąpi przebiegiem lawinowe złącz J1 i J3.



Rys.7.2. Charakterystyka napięciowo prądowa tyrystora

Przy polaryzacji dodatniej ($u_{AK} > 0$) złącza emiterowe J1 i J3 są spolaryzowane w kierunku przewodzenia, zaś wspólne dla obu tranzystorów złącze kolektorowe J2 - zaporowo. Prąd całkowity tego złącza jest sumą prądu dziurowego przekraczającego bazę tranzystora p-n-p, prądu elektronowego tranzystora n-p-n oraz prądu nasycenia I_{C0} . Te trzy prądy stanowią prąd anodowy i_A , który przy odłączonej bramce ($i_G=0$), jest także prądem katody tyrystora. Stąd równanie kolektorowe dla złącza J2 ma postać

$$i_A = \alpha_{N1}i_A + \alpha_{N2}i_A + I_{C0} \quad (7.1)$$

albo

$$i_A = \frac{I_{C0}}{1 - (\alpha_{N1} + \alpha_{N2})} \quad (7.2)$$

gdzie α_{N1} i α_{N2} - stałoprądowe współczynniki wzmacnienia dla struktur tranzystorowych p-n-p i n-p-n. Przy napięciu u_{AK} bliskim U_{B0} zachodzi w obszarze złącza J2 powielanie lawinowe dziur i elektronów ze współczynnikami multiplikacji $M_h \approx M_e \approx M$ i prąd anodowy wynosi

$$i_A = \frac{MI_{C0}}{1 - (M\alpha_{N1} + M\alpha_{N2})} = \frac{MI_{C0}}{1 - M(\alpha_{N1} + \alpha_{N2})} \quad (7.2a)$$

Zakładając, dla uproszczenia rozważań, że $M > 1$ tuż przed napięciem przebicia, to z zależności (7.3) wynika, że tyrystor załączy się, gdy

$$M(\alpha_{N1} + \alpha_{N2}) \approx 1 \quad (7.3)$$

Prąd anodowy przy którym zachodzi warunek (7.3) jest prądem włączenia tyrystora I_{IN} przy napięciu U_{B0} (rys.7.1). Nieograniczone narastanie prądu $i_A > I_{IN}$ może być powstrzymane zmniejszeniem prądu

I_{CO} i współczynnika M . W tyrystorze zachodzi to w wyniku spadku napięcia na złączu kolektorowym J2. Przyjmuje się, że przy prądzie I_L napięcie na tym złączu jest równe zero, a $M=1$. W katalogach podawany jest prąd I_L jako minimalna wartość prądu tyrystora konieczna do jego pewnego przełączenia.

Przy $\alpha_{N1} + \alpha_{N2} \approx 1$ prąd anodowy, zgodnie z zależnością (7.2), także powinien nieograniczenie narastać, jednakże struktury tranzystorowe przechodzą w stan nasycenia, w którym współczynniki wzmocnienia pozostają na niskim poziomie. Prąd anodowy, przy którym $\alpha_{N1} + \alpha_{N2} \approx 1$, jest określany jako *prąd podtrzymania* (wyłączenia) tyrystora I_H - jest to najmniejsza stabilna wartość prądu w stanie przewodzenia. Mała wartość *napięcia podtrzymania (resztkowego)* $U_H \approx 1V$, występująca przy prądzie podtrzymania I_H , potwierdza że struktury tranzystorowe są w stanie nasycenia, a tyrystor stanowi sobą obwód prawie zwarty. Średni prąd przewodzenia $I_{T(AV)}$, przy napięciu przewodzenia U_T , ogranicza od góry obszar stanu przewodzenia.

W tyrystorach obszary baz są zwykle poszerzone i słabiej zdomieszkowane niż obszary anody i katody, aby nie dopuścić do spełnienia warunku (7.3) - jonizacji lawinowej przy małych wartościach u_{AK} , bez udziału prądu bramki.

Prąd bramki i_G , jako prąd p-bazy, zwiększa prąd anodowy w stanie blokowania

$$i_A = \frac{I_{CO} + \alpha_{N2} i_G}{1 - (\alpha_{N1} + \alpha_{N2})} \quad (7.4)$$

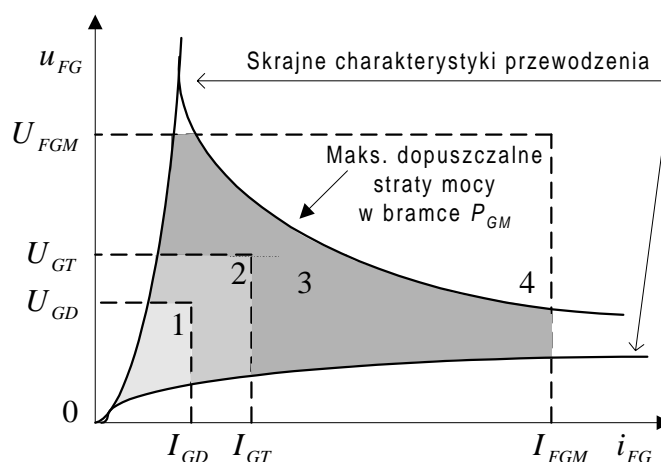
Prąd bramki zwiększa także wartość współczynnika α_{N2} . Gdy suma współczynników wzmocnienia osiągnie wartość bliską 1 oraz $M > 1$, to tyrystor przechodzi ze *stanu blokowania* w *stan załączenia* przy napięciu mniejszym niż U_{B0} poprzez metastabilny zakres ujemnej rezystancji dynamicznej od punktów (U_{BX}, I_{IN}) do punktu (U_{IN}, I_{IN}) na charakterystyce $i_A = i_A(u_{AK})$. Położenie pierwszego punktu zależy od wartości prądu bramki I_G .

W warunkach dynamicznych pracy tyrystora małosygnalowe współczynniki wzmocnienia prądowego α są większe od stałoprądowych: $\alpha > \alpha_N$, co umożliwia załączenie przy znacznych prądach bramki ($i_G \gg 0$) przed pojawieniem się przebiegu lawinowego. Zatem przyrosty prądu anodowego wywołane małymi zmianami prądu bramki też będą większe

$$\frac{\Delta i_A}{\Delta i_G} = \frac{I_a}{I_g} \approx \frac{\alpha_2}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (7.4a)$$

Ponadto, aby α_2 było szybko rosnącą funkcją I_g wiele typów tyrystorów ma tzw. ścieżkę rezystywną bocznikującą złącze J3, uzyskaną przez poszerzenie elektrody katody na obszar p-bazy. W schemacie zastępczym tyrystora pojawia się wówczas niewielka rezystancja r_{GK} , która umożliwi przepływ prądu dziurowego z anody do katody już przy niewielkich napięciach na bramce $u_{GK} < 0,7$ V, czyli zanim złącze J3 zostanie wystarczająco spolaryzowane w kierunku przewodzenia. Rezystancja ta spełnia również inną pożyteczną rolę: zabezpiecza tyrystor przed przypadkowymi sygnałami mogącymi załączyć tyrystor.

Dla właściwego zaprojektowania układu sterowania ważne są charakterystyki wejściowe tyrystora (rys.7.3).



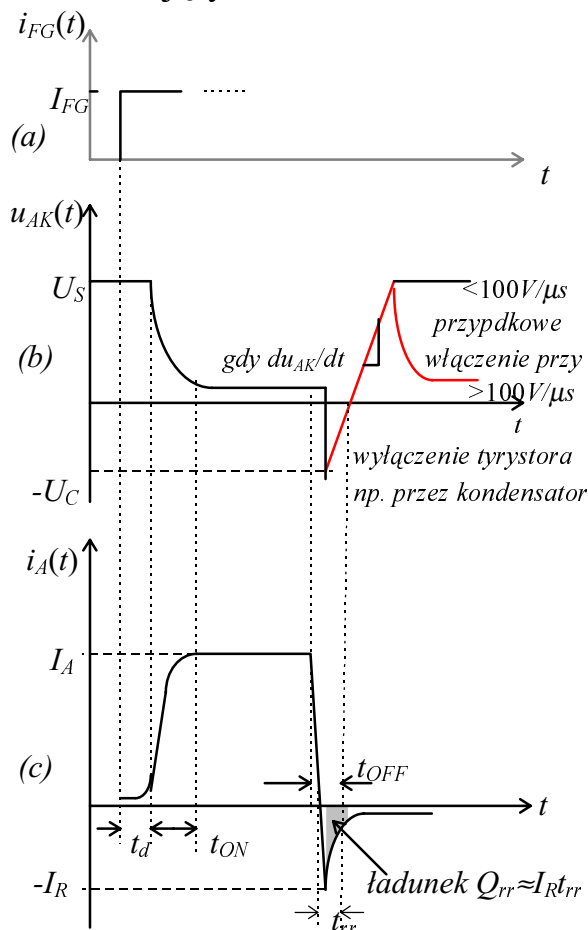
Rys.7.3. Charakterystyki bramkowe z obszarami rozrzutu technologicznego dla danego typu tyrystorów: 1 - obszar nieprzełączania, 2 - obszar możliwych przełączeń, 3 - obszar pewnych przełączeń, 4 - obszar szkodliwych przełączeń

Na charakterystykach bramkowych dla każdego typu tyrystorów są zaznaczone trzy obszary napięciowo-prądowe: 1 - ograniczony napięciem U_{GD} i prądem I_{GD} , nie przełączającymi tyrystora, 2 - ograniczony napięciem U_{GT} i prądem I_{GT} , mogącymi przełączyć tyrystor, 3 - ograniczony wartościami maksymalnymi napięcia U_{FGM} i prądu I_{FGM} bramki, gwarantującymi przełączenie tyrystora ze stanu blokowania do stanu przewodzenia. W tym obszarze należy zapewnić punkt pracy na prostej obciążenia w obwodzie bramki. Przełączanie w obszarze 4 może uszkodzić tyrystor, bowiem przekroczona została hiperbola dopuszczalnych strat mocy w bramce P_{GM} .

O jakości danego typu tyrystora decydują: jak najmniejszy prąd bramki $I_{FG} \ll I_{T(AV)}$ (kilkunastokrotnie mniejszy od I_A) oraz jak najkrótszy czas załączania rzędu 1...2 μ s.

Tyrystory pracują przede wszystkim jako elementy załączające i przełączające duże prądy przy częstotliwościach sieciowych (rys.7.4).

Praca dynamiczna w takich warunkach zależy od zachowania się ładunków nadmiarowych w obu bazach po wyłączeniu elementu, które tutaj są rozpatrywane wspólnie jako tzw. ładunek przejściowy Q_{rr} , pozostający jeszcze przez okres czasu t_{rr} w bazach. Dopiero po tym czasie tyrystor odzyskuje właściwości do ponownego załączenia przez układ sterujący bramki.



Rys.7.4. a) Załączanie tyrystora prądem bramki, b) zmiany napięcia $u_A(t)$ podczas wyłączenia, c) odpowiedź prądowa tyrystora

Innym ograniczeniem czasowym tyrystora jest tzw. *krytyczna stromość* narastania napięcia blokowania

$$\left(\frac{du_{AK}}{dt} \right)_s \quad [\text{V}/\mu\text{s}]$$

Jest to największa wartość stromości narastania tego napięcia, nie powodująca przełączenia tyrystora ze stanu blokowania do stanu przewodzenia w określonych warunkach zewnętrznych (np. przy określonej temperaturze). Należy bowiem pamiętać, że przy polaryzacji tyrystora napięciem $u_{AK} < U_{B0}$ poszerza się obszar ładunku przestrzennego złącza J2, którego pojemność wynosi C_{j2} (rys.7.1). Zbyt szybko usuwane nośniki z obszaru złącza, zgodnie ze zmianami napięcia du_{AK}/dt , tworzą prąd anodowy proporcjonalny do tych zmian. Prąd może

być na tyle duży, że załączy się tyristor dużo wcześniej, zanim suma współczynników α obu tranzystorów w schemacie zastępczym osiągnie 1 - zgodnie z zależnością

$$i_A = \frac{C_{j2} \frac{du_{AK}}{dt}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (7.5)$$

Ponadto, prąd ten jest wzmacniany wewnętrznym efektem Millera. W ten sposób zwiększa się pojemność złącza do pojemności efektywnej

$$C_{eff} = \frac{C_{j2}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (7.6)$$

Jedynym sposobem wyłączenia dwóch tranzystorów w strukturze tyristora jest zmniejszenie prądu kolektorowego do poziomu, przy którym zostanie przerwany mechanizm powielania lawinowego.

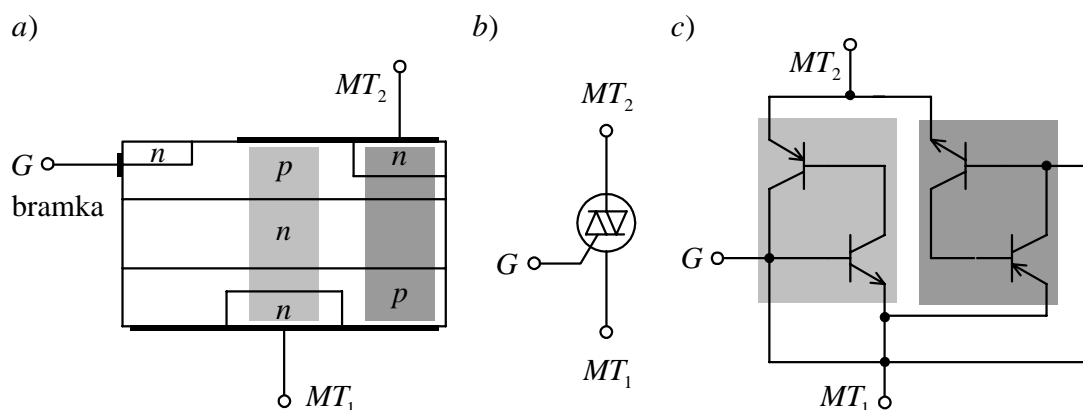
7.2. TRIAKI

Triak umożliwia sterowanie sygnałów zmiennoprądowych, bowiem jego konstrukcja jest antyrównoległym złożeniem dwóch złączowych struktur tyristorowych n-p-n-p i p-n-p-n (rys.7.5a). W przekroju widoczne są symetryczne dwa obszary typu n wdyfundowane w strukturę złączową p-n-p. Elektrody wyprowadzeń głównych (*main termials*), nazywanych także *anodami*, zachodzą częściowo na obszar baz.

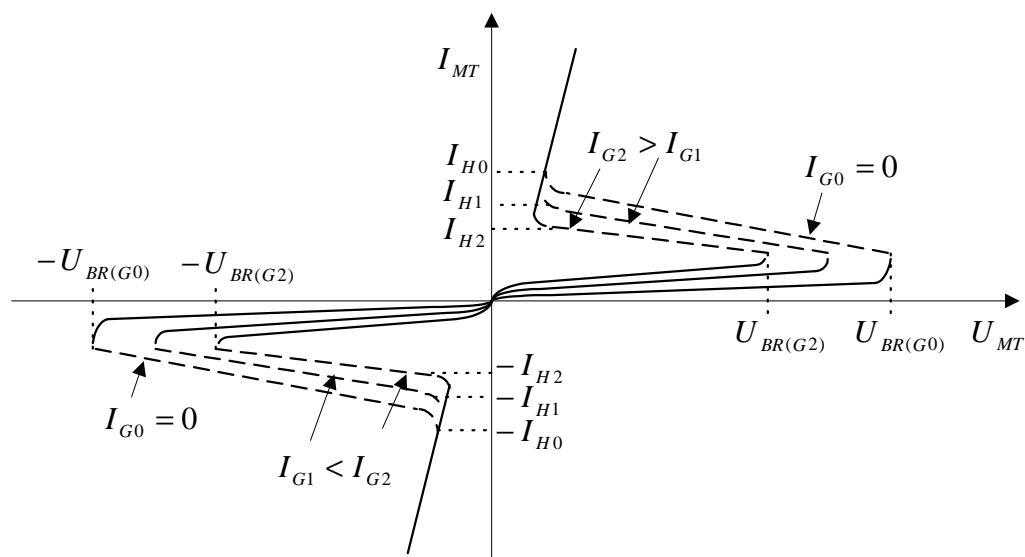
Symetria struktury przenosi się na symetrię charakterystyk napięciowo-prądowych (rys.7.6) oraz schematu zastępczego triaka(rys.7.5c).

Triak można załączyć poprzez bramkę dodatnim lub ujemnym impulsem prądowym dwukrotnie w każdym okresie prądu zmiennego - co daje cztery kombinacje kierunków napięć U_{MT} i prądów I_G załączających przyrząd.

Ponadto triak załączy się sam, jeżeli zostanie przekroczone napięcie przebicia $U_{BR(GO)}$ w jednym z kierunków oraz przy zbyt szybkim wyłączaniu napięcia - podobnie jak w tyristorze. Te dwa ostatnie sposoby normalnie nie są stosowane w układach elektrycznych, ale wyznaczają pewne ograniczenia w wykorzystaniu triaków; np. triaki nie mogą pracować przy obciążeniu indukcyjnym.



Rys.7.5. a) Struktura złączowa, b) symbol graficzny, c) model tranzystorowy triaka



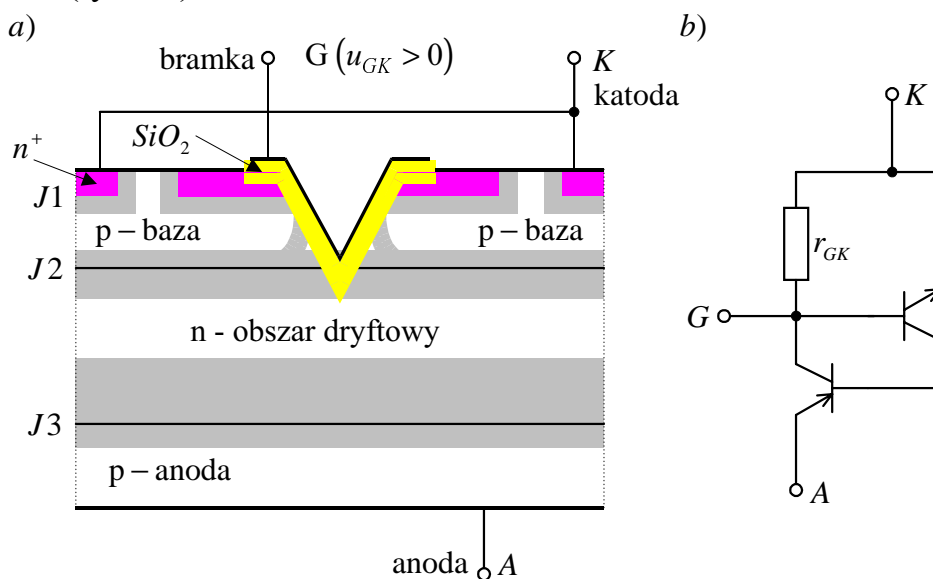
Rys.7.6. Charakterystyki napięciowo prądowe triaka

Diak ma podobną symetryczną strukturę jak triak, ale nie ma elektrody bramki. Załącza się tylko po przekroczeniu charakterystycznych napięć: $U_{BR(F)}$ przy $u_{MT} > 0$ i $-U_{BR(R)}$ przy $u_{MT} < 0$ w sposób podobny jak triak przy napięciach $U_{BR(G0)}$ i $-U_{BR(G0)}$.

7.3. STRUKTURY TYRYSTOROWE V-MOS I D-MOS

W technologii MOS wytwarzane są tyrystory kontrolowane napięciem bramki - jak w tranzystorach MOS. Mają one dość złożone struktury złączowe i są trudne do wykonania. Ich zasadniczą zaletą jest wyeliminowanie możliwości samoczynnego załączenia.

Struktury tyrystorowe V-MOS mają bramkę MOS w wytrawionym izotropowo sześciokątnym zagłębieniu, które przechodzi przez cały obszar p-bazy struktury złączej $n^+ - p - n - p^+$ tyrystora (rys.7.7).



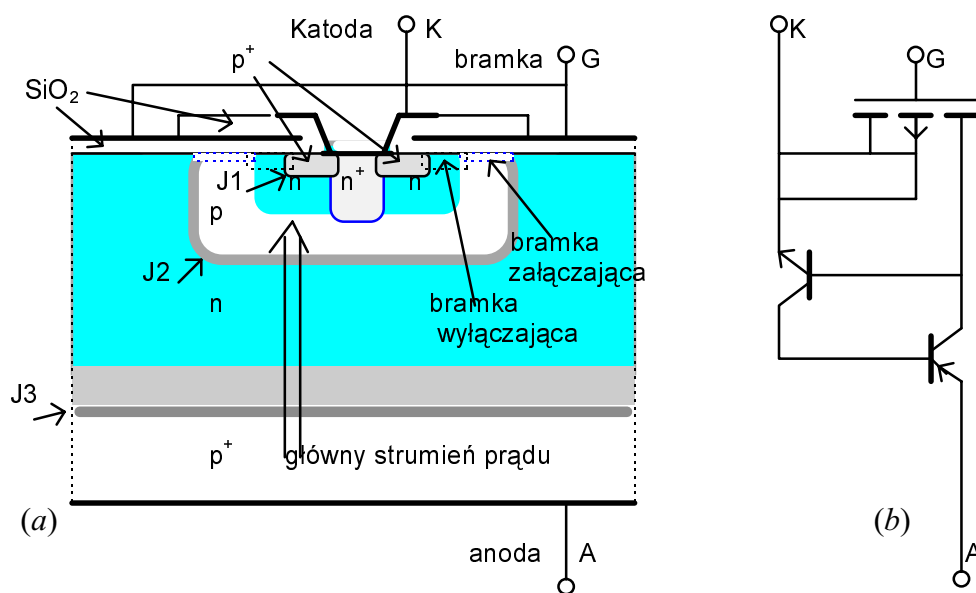
Rys.7.7. a) Struktura złączowa tyrystora z izolowaną bramką typu V-MOS, b) schemat zastępczy

Wgłębienie jest pasywowane SiO₂, a struktura bramki MOS sięga aż do n-bazy (obszaru dryftowego n, który podtrzymuje prawie całe napięcie u_{AK}). Przy polaryzacji zerowej bramki obszar zubożenia złącza J2, sięgający w głąb p-bazy, jest płaski i równoległy do krawędzi złącza. Wzmocnienie tranzystora $n^+ - p - n$ jest małe ($\alpha < 0.3$). Przy polaryzacji dodatniej na bramce obszar zubożenia poszerza się i unosi od złącza (patrz rys.7.7). Jednocześnie od strony katody (n^+ -emitera) obszar neutralny bazy staje się coraz cieńszy; wzrasta wzmocnienie tranzystora. Przy napięciu progowym MOS-bramki elektrony są wstrzykiwane przez zaindukowany kanał do obszaru dryftowego typu n. Potencjał na tym obszarze natychmiast spada do wartości polaryzacji w kierunku przewodzenia złącza J3.

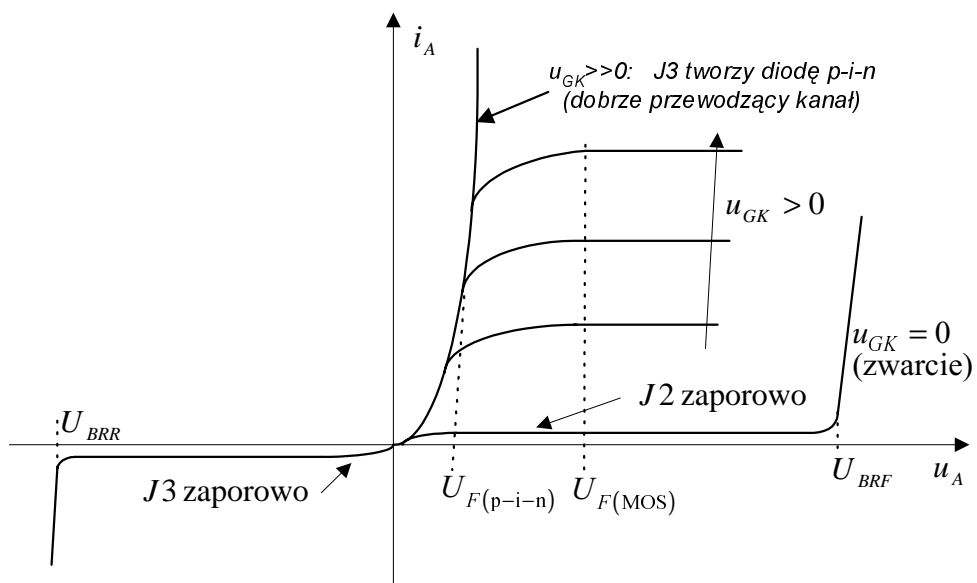
Tyrystory V-MOS blokują napięcia rzędu 600 V przy stromości nawet do $du_{AK} / dt \leq 1000$ V/s. Załączają się w ciągu 20 ns, ale nie są wyłączalne napięciem bramki.

Strukturę tyrystora wyłączalnego, wykonanego w technologii D-MOS, przedstawia rys.7.8 [20].

Charakterystyka napięciowo-prądowa takiego przyrządu jest złożeniem charakterystyk tyrystora, tranzystora i diody p-i-n w zależności od napięcia na bramce (rys.7.9)



Rys.7.8. a) Struktura złączowa wyłączalnego tyrystora MOS, b) jego model tranzystorowy



Rys.7.9. Charakterystyki napięciowo-prądowe wyłączalnego tyrystora MOS