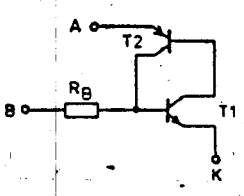
Tyrystory

BOGDAN WILAMOWSKI

Tyrystory są obecnie podstawowymi, półprzewodnikowymi przyrządami przełączającymi, służącymi do kontroli znacznych mocy, głównie w obwodach prądu zmiennego. Ich dużą zaletą jest to, że są to przyrządy typowo dwustanowe. Pracują albo w stanie włączenia, albo w stanie wyłączenia, a tym samym moc wydzielana na samym tyrystorze jest niewielka, zaś moc kontrolowana w obciążeniach może być bardzo duża. Zewnętrznie tyrystor w stanie włączenia przypomina diodę prostowniczą, a w stanie wyłączenia jest elementem rozwartym dla obu kierunków polaryzacji.

Fizycznie tyrystor jest czterowarstwową strukturą p-n-p-n, której uproszczony schemat zastępczy przedstawiono na *rys. 1*. W stanie wyłączenia żaden z tranzystorów obwodu zastępczego nie przewodzi. Dopiero przyłożenie dodatniego impulsu bramki powoduje, że zaczyna przewodzić tranzystor *T1*, który z kolei wysterowuje bazę tranzystora *T2*. Od tego momentu dalsze sterowanie tyrystora z obwodu bramki jest zbędne, bowiem baza tranzystora *T1* jest zasilana z anody poprzez tranzystor *T2*. Tyrystor jest w stanie włączenia. Można teraz zauważyć, że w celu wyłączenia tyrystora należy odłączyć napięcie zasilania anody lub nawet odwrócić polaryzację napięcia anodowego. Wszelkie próby wyłączenia tyrystora napięciem bramki zakończą się raczej niepowodzeniem, gdyż duża rezystancja szeregowa bramki R_B uniemożliwi skuteczne zatkanie tranzystora *T1*.

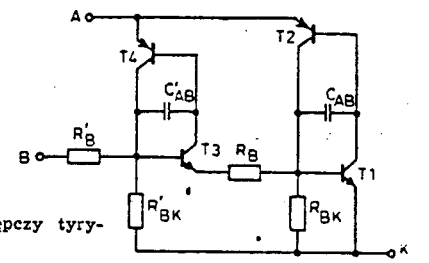


Rys. 1. Schemat zastępczy prostej struktury tyrystora

Niedogodnością prostej struktury tyrystora jest to, że może być ona przypadkowo włączona szybką zmianą napięcia anodowego nawet o stosunkowo niewielkiej amplitudzie. Dzieje się tak dlatego, że w fizycznej strukturze tyrystora istnieje stosunkowo duża pojemność pasożytnicza zaporowo spolaryzowanego złącza między anodą i bramką. Tak więc szybka zmiana napięcia anodowego przenosi się w obwód bramki i powoduje niezamierzone włączenie tyrystora. Mówimy, że parametr dV/dt ma małą wartość.

W celu uodpornienia tyrystora na przypadkowe włączanie, wprowadza się — w trakcie procesu technologicznego — dodatkową rezystancję R_{BK} pomiędzy bramką i katodą, a dokładniej, pomiędzy bazą i emiterem tranzystora *T1*. Taki tyrystor jest odporny na szybkie zmiany napięcia anodowego, jeśli tylko $dV/dt < R_{BK} \cdot 0{,}6/C_{AB}$. Sposób ten powoduje jednocześnie eliminacje przypadkowego włączania się tyrystora wskutek nadmiernego wzrostu prądów zerowych ze wzrostem temperatury.

Do włączenia takiego tyrystora wymagany jest jednak znacznie większy prąd sterujący bramki. Tę niedogodność rozwiązano przez wprowadzenie zintegrowanej struktury tyrystora złożonego, którego uproszczony schemat zastępczy przedstawiono na *rys. 2*. Tyrystor złożony składa się z tyrystora zasadniczego (*T1*, *T2*) i tyrystora sterującego (*T3*, *T4*). Niewielki prąd bramki włącza tyrystor pomocniczy, który następnie dużym prądem z obwodu anody zasila wewnętrzną bramkę tyrystora zasadniczego. Produkowane obecnie tyrystory mocy mają średnice kilku centymetrów i istotne jest jak najszybsze włączenie całej struktury. W tym celu stosuje się odpowiednie geometrie bramek oraz często wiele wewnętrznych tyrystorów sterujących, włączających jednocześnie odległe od siebie obszary struktury.

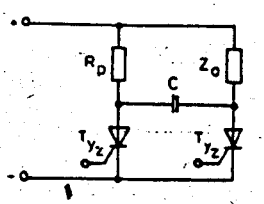


Rys. 2. Schemat zastępczy tyrystora złożonego

Tyrystor złożony charakteryzuje się również krótkim czasem włączania, określanym przez parametr di/dt. Parametr ten jest tym większy, im większa energia jest doprowadzana do obwodu bramki tyrystora zasadniczego.

Koncepcja tyrystorów złożonych pozwala również na znaczne zmniejszenie prądu bramki, tak że jego wyzwolenie możliwe jest prądem zintegrowanej w strukturze fotodiody. Takie tyrystory wyzwalane światłem zwane są fototyrystorami. Pozwalają one na znaczne uproszczenie układów sterujących kaskadowo połączonych tyrystorów w celu przełączania obwodów o bardzo wysokich napięciach.

Prawie wszystkie obecnie wytwarzane tyrystory są faktycznie złożone i jest oczywiste że takiego tyrystora nie wyłączy się prądem bramki. W obwodach prądu przemiennego polaryzacja napięcia anody zmienia się kilkadziesiąt razy na sekundę, a tym samym tyrystor jest wyłączany też z tą samą częstotliwością. To naturalne wyłączanie się tyrystora bardzo ułatwia projektowanie tyrystorowych układów sterujących prądu przemiennego. W celu kontroli mocy doprowadzonej do obciążenia można włączać tyrystor tylko w niektórych okresach. Innym bardziej rozpowszechnionym sposobem jest kontrolowanie momentu włączenia tyrystora, a tym samym sterowanie kątem przepływu.



Rys. 3. Układ pary tyrystorów do przełączania obwodów prądu stałego

W obwodach prądu stałego, gdzie nie ma naturalnego mechanizmu wyłączania tyrystora, sytuacja jest bardziej złożona, a układy sterujące bardziej skomplikowane. Zwykle stosuje się dodatkowe tyrystory, których jedynym zadaniem jest wyłączanie tyrystora zasadniczego. Przykładowy układ tyrystorowy dla obwodów prądu stałego przedstawiono na *rys. 3*.

cd. na str. 14

u.sc. można dokładnie określić i zminimalizować ten czas w wypadku badań układów wykonywanych inną technologią lub starzonych w niesprawdzonych warunkach. Za wystarczający uznaje się czas, po którym wyniki starzenia prowadzą do takich samych wniosków, jak wyniki badań długotrwałych.

Wczesne uszkodzenia, występujące w pierwszym okresie starzenia, oznaczają, że nie wszystkie u.sc. potencjalnie wadliwe zostały wyeliminowane. Zbyt prędkie pojawianie się nowych uszkodzeń w późniejszym okresie starzenia, przy braku wcześniejszych uszkodzeń, świadczy o negatywnym wpływie przeprowadzonych testów selekcyjnych na poziom niezawodności układów (czyli o zbyt dużym potencjale testów) lub o niezadowalającej jakości całej partii. Stopniowe występowanie uszkodzeń w ciągu całego okresu starzenia jest związane z ograniczonym poziomem tzw. niezawodności wbudowanej, charakterystycznej dla danej partii u.sc. Znajomość i uwzględnienie tzw. współczynnika przyspieszenia, wiążącego np. intensywność uszkodzeń u.sc. lub wielkości procentowe uszkodzeń w temperaturze podwyższonej i w pokojowej ułatwia odróżnienie typowego, oczekiwanego poziomu uszkodzeń od wypadków niewłaściwego doboru testów selekcyjnych lub gorszej jakości całej partii.

Skuteczność wybranych testów selekcyjnych i ich zestawów

Przeprowadzono badania rejestrów przesuwających typu MCY 7501N i MCY 7505N (w u.sc. MCY 7501 wyróżnia się dwa identyczne rejestry o pojemności po 1024 bity mogące funkcjonować oddzielnie; gdy tylko jeden z nich jest sprawny stosuje się oznaczenia MCY 7505A lub MCY 7505B). Badania stanowiły kombinacje następujących testów:

— dodatkowe wygrzewanie (poza przewidzianym w technologii wytwarzania u.sc. w obudowach plastykowych w celu dotwardzenia tłoczywa): $T = 150°C$, $t = 48$ h;
— cykliczne zmiany temperatury: $T_1 = -65°C$, $T_2 = 150°C$, liczba cykli $N_c = 5$, czas cyklu $t_c = 1$ h (po 30 minut w temperaturach T_1 i T_2);
— spadki swobodne: wysokość $H = 1$ m, liczba spadków $N_s = 5$.

Wyniki tych badań wskazują na przewagę zestawów testów obejmujących zarówno cykliczne zmiany temperatury jak i dodatkowe wygrzewanie.

Zestawy testów obejmujące dodatkowe wygrzewanie w podwyższonej temperaturze zmniejszają liczbę przyszłych braków funkcjonalnych w związku ze stabilizacyjnym działaniem wysokiej temperatury na u.sc. Uważa się, że mimo nieznacznego, w porównaniu w innymi testami, wkładu wygrzewania stabilizacyjnego w eliminację wczesnych uszkodzeń u.sc. wyprodukowanych w optymalnych warunkach technologicznych, test ten jest niedrogim sposobem zabezpieczenia się przed skutkami przypadkowej utraty kontroli nad procesem wytwarzania u.sc. [3].

Charakterystyczne jest niewystępowanie braków na kontakty w tych układach, które przed starzeniem poddano testowi cykli temperaturowych, eliminującemu zwykle takie braki. Świadczy to o dużym znaczeniu tego testu przy wykrywaniu potencjalnych braków katastroficznych. Test ten jest jednak niewystarczający do eliminacji innych braków.

Zastosowanie spadków swobodnych po uprzednim poddaniu u.sc. działaniu cykli temperaturowych i podwyższonej temperatury może wyeliminować układy o granicznych stanach połączeń drutowych, a także te, w których występują duże naprężenia struktur, wprowadzane w procesie montażu, wpływające na funkcjonowanie układu lub prowadzące do pękania struktur, a w konsekwencji do niedziałania u.sc.

Stosowanie badań starzeniowych jako metody oceny skuteczności testów selekcyjnych przy uwzględnieniu różnych parametrów i kombinacji dużej liczby testów umożliwia — dla u.sc. wykonywanych określoną technologią — dobór optymalnych testów selekcyjnych w zależności od wymaganego poziomu jakości i kosztów, jakie może ponieść nabywca układów w związku z dodatkowym prowadzeniem testów selekcyjnych.

Literatura

[1] Hanlon E.: *Burn-in.* Circuits Manufacturing, nr 7, 1980.
[2] Kuo W., Kuo Y.: *Facing the headaches of early failures: a state-of-the-art review of burn-in decisions.* Proceedings of the IEEE, vol. 71, nr 11, 1983.
[3] Foster R.: *Why consider screening, burn-in, and 100-percent testing for commercial devices?.* IEEE Transactions on Manufacturing Technology, vol. MFT-5, nr 3, 1976.
[4] Bułaciński A.: *Wykorzystanie badań starzeniowych układów scalonych do oceny skuteczności testów selekcyjnych.* Prace ITE (w przygotowaniu).
[5] Bułaciński A.: *Przyspieszone badania starzeniowe układów scalonych jako metoda oceny skuteczności testów selekcyjnych.* II Konferencja „Technologia Elektronowa", Rynia 1984.

cd. ze str. 12

Załóżmy, że tyrystor zasadniczy Ty_z jest włączony, spadek napięcia na nim jest niewielki i przez obciążenie Z_o płynie prąd. W tym czasie tyrystor pomocniczy Ty_P jest wyłączony i na kondensatorze C panuje duże napięcie. Włączenie tyrystora pomocniczego Ty_P powoduje, poprzez kondensator C, zmianę polaryzacji napięcia anodowego tyrystora zasadniczego Ty_z oraz jego wyłączenie. Analogicznie ponowne włączenie tyrystora zasadniczego wyłączy tyrystor pomocniczy.

W praktyce układy te są bardziej skomplikowane, a tyrystory w obwodach prądu stałego stosowane niechętnie. Stosuje się tu specjalne tranzystory bardzo dużych mocy lub też specjalną modyfikację tyrystorów wyłączalnych prądem bramki, zwanych tyrystorami GTO (Gate Turn Off).

Specjalne konstrukcje tyrystorów wyłączalnych prądem bramki GTO są prostymi strukturami o schemacie zastępczym jak na rys. 1. Cechą znamienną tych konstrukcji jest to, że charakteryzują się one bardzo małą rezystancją szeregową bramki, co umożliwia zatkanie tranzystora T1 prądem bramki i tym samym wyłączenie tyrystora. Drugą cechą struktur GTO jest taka konstrukcja wewnętrznych tranzystorów, że $h_{21e1} \gg 1$, $h_{21e2} < 1$ oraz $h_{21e1} \cdot h_{21e2} > 1$. Spełnienie tych warunków pozwala wyłączać tyrystory GTO niewielkimi prądami bramki.

Inną koncepcją tyrystorów wyłączalnych jest wprowadzenie w miejsce tranzystora T1 — tranzystora typu SIT (Static Induction Transistor). Tyrystory te znane są jako tyrystory SIT lub FCT (Field Control Thyristor) i charakteryzują się znacznie większą szybkością działania niż tradycyjne tyrystory typu GTO.