Tranzystory bipolarne mocy

BOGDAN WILAMOWSKI

Rozwój urządzeń energetycznych prądu stałego stwarza coraz większe zapotrzebowanie na półprzewodnikowe przyrządy do kontroli obwodów prądu stałego. Tradycyjne półprzewodnikowe przyrządy energetyczne, takie jak tyrystory lub triaki praktycznie nie nadają się do tych zastosowań, ponieważ nie jest możliwe wyłączenie ich napięciem bramki.

Dynamicznie rozwijają się ostatnio tranzystory mocy MOS, lecz ze względu na stosunkowo dużą rezystancję szeregową kanału nie mogą służyć — jak na razie — do przełączania bardzo dużych prądów. Najlepsze rozwiązania w technologii MOS to około 200 A i 50 V lub 10 A i 1000 V. Tak więc maksymalna moc kluczowana tranzystorami MOS nie przekracza 10 kW. Znacznie lepiej do tego celu nadają się tranzystory bipolarne, głównie ze względu na niewielki spadek napięcia w stanie nasycenia. Są produkowane tranzystory bipolarne, które umożliwiają kluczowanie mocy przekraczających 200 kW.

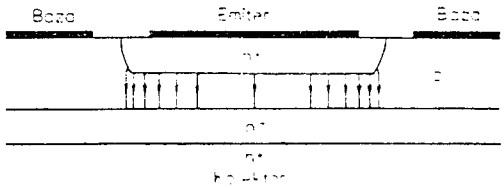
Tranzystory bipolarne mocy charakteryzują się specyficzną konstrukcją, umożliwiającą im pracę ze skrajnie dużymi prądami i napięciami. W związku z tym wiele efektów, zwykle drugorzędnych odgrywa w nich istotną rolę. Zjawiska te zostaną omówione kolejno.

W celu uzyskania dużych napięć przebicia między bazą a kolektorem zawsze wprowadza się słabo domieszkowaną, grubą warstwę. Im większa jest jej rezystywność, tym pole elektryczne jest bardziej równomierne, a napięcie przebicia wyższe. Z drugiej jednak strony, przy dużych gęstościach prądu liczba ruchomych nośników może znacznie przewyższyć koncentrację domieszek w tym obszarze i w efekcie następuje sztuczne zwiększenie grubości bazy. Mówimy, że mamy do czynienia z efektem Kirka. Powoduje on zmniejszenie współczynnika wzmocnienia prądowego. W tranzystorach mocy w zakresie dużych prądów współczynnik wzmocnienia h_{FE} maleje odwrotnie proporcjonalnie do prądu kolektora.

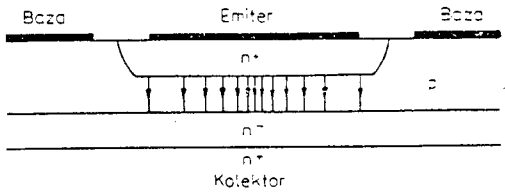
Dodatkową komplikacją, powstałą na skutek większych koncentracji ruchomych nośników niż koncentracji domieszek w obszarze przejściowym między bazą i kolektorem, jest to, że zmodyfikowany zostaje rozkład pola elektrycznego, co prowadzi do znacznego zmniejszenia napięcia przebicia. Innymi słowy, napięcie przebicia złącza kolektor-baza staje się funkcją jego prądu. Im większa gęstość prądu, tym mniejsze napięcie przebicia.

Napięcia przebicia samych złączy nie mówią nam jednak wiele, jakie napięcia mogą być kluczowane tranzystorem. Tranzystor należy charakteryzować raczej obszarem bezpiecznej pracy. W celu zwiększenia tego obszaru stosuje się często łagodny profil domieszek w złączu baza-kolektor. Jest to pewnego rodzaju kompromis. Napięcie przebicia samego złącza kolektor-baza maleje, ale jednocześnie zwiększa się obszar bezpiecznej pracy tranzystora.

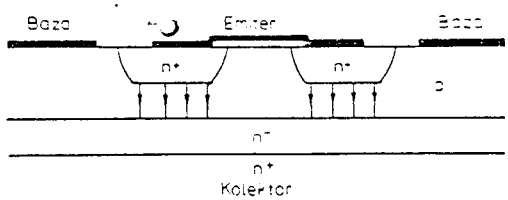
Innym zjawiskiem jest efekt zagęszczania prądu w złączu baza-emiter. Przy dużym prądzie bazy następuje spadek napięcia wzdłuż niej, a więc różne fragmenty złącza emiter-baza są polaryzowane różnymi napięciami i stąd nierównomierny rozpływ prądu w złączu. Efekt jest taki, że zasadnicza część prądu płynie przy krawędziach emitera bliskich kontaktom bazy (*rys. 1*). Powoduje to, że dla zwiększenia maksymalnego prądu tranzystora niecelowe jest proste zwiększanie jego powierzchni; należy raczej wykonać większą liczbę wąskich pasków emitera.



Rys. 1. Efekt zagęszczania prądu przy dużym prądzie sterującym bazy



Rys. 2. Efekt zagęszczania prądu w sytuacji wyłączania bazy dużym napięciem zaporowym



Rys. 3. Przekrój struktury tranzystora odpornej na wyłączanie dużym napięciem zaporowym

Z zagęszczaniem prądu mamy do czynienia również przy wyłączaniu tranzystora, gdy złącze baza-emiter jest polaryzowane zaporowo. Jest to szczególnie wyraźne wtedy, gdy w celu szybszego wyłączenia tranzystora do bazy przykładamy bardzo duże napięcie blokujące. Obszary przy krawędziach emiterów wyłączane są wówczas jako pierwsze, a zagęszczenie prądu następuje w okolicy środka emitera (*rys. 2*). W konsekwencji powoduje to znaczny wzrost gęstości prądu i temperatury na tym obszarze.

Dodatkowo duża gęstość prądu powoduje modyfikację rozkładu pola elektrycznego i może wywołać efekt drugiego przebicia typu lawinowego. Oczywiście może również wystąpić efekt drugiego przebicia typu termicznego, a ma to miejsce wtedy, gdy wskutek zagęszczenia prądu i mocy lokalnie wzrośnie temperatura do tego stopnia, że złącze utraci właściwości blokujące. W celu wyeliminowania tego niepożądanego zjawiska zagęszczania prądu w czasie wyłączania tranzystora stosuje się czasami zabieg wytwarzania pasków emitera bez jego środków (*rys. 3*).

Tranzystory mocy nie mogą też mieć dużych współczynników wzmocnienia prądowego h_{FE} z kilku powodów. Po pierwsze, im większy współczynnik wzmocnienia, tym mniejsze jest napięcie przebicia U_{CE} w stosunku do napięcia U_{CB}. Po drugie, im większe wzmocnienie i cieńsza baza, tym większa jest rezystancja obszaru bazy, a tym samym efekty zagęszczania prądów są bardziej dokuczliwe. Wreszcie po trzecie, cienka i słabo domieszkowana baza może doprowadzić do przebicia skrośnego bazy.

Niewielkie współczynniki wzmocnienia prądowego bipolarnych tranzystorów mocy są ich dużą wadą. W celu sztucznego zwiększenia współczynników wzmocnienia wytwarza się czasami struktury tranzystorów mocy w układzie Darlingtona, złożonego z dwóch lub więcej tranzystorów w jednej strukturze. W tych wypadkach efektywne współczynniki wzmocnienia prądowego sięgają 1000, a tranzystor może być wtedy sterowany stosunkowo niewielką mocą. Wadą tego rozwiązania jest jednak to, że wzrasta wtedy spadek napięcia na tranzystorze w stanie nasycenia i oczywiście rośnie tracona moc.