



ELEMENTY UKŁADÓW ENERGOELEKTRONICZNYCH

3. Przegląd właściwości łączników mocy

3.7 Nietypowe i rzadko stosowane łączniki mocy/

Kierunki rozwoju i specyfika aplikacji
nowoczesnych łączników mocy

Mieczysław Nowak

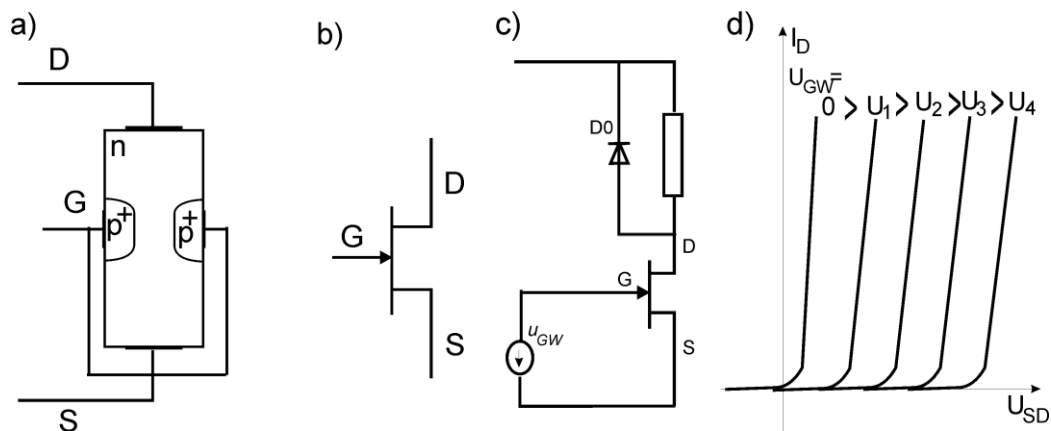


Tranzystor JFET czyli tranzystor polowy złączowy ma budowę która schematycznie jest zobrazowana na rys a) w postaci segmentu stanowiącego wycinek całej struktury. Wskazuje to na ogólną cechę pokrewną tranzystorom MOS polegającą na fragmentaryzacji kompletnego obszaru na małe komórki. Symbol JFET'a z kanałem typu „n” podany jest na rys.b. Elektrody oznaczone w sposób typowy dla tranzystorów polowych (S - source, D- drain, G- gate) są w przypadku tranzystora z kanałem typu „n” polaryzowane zgodnie ze schematem podanym na rys.c przy czym jeżeli napięcie bramki jest ujemne i dostatecznie duże bariera złączowa pomiędzy obszarami P i N- rozpościera się tak, że nie jest możliwy przepływ prądu pomiędzy drenem i źródłem. W przypadku braku napięcia polaryzującego bramkę JFET pozostaje w stanie przewodzenia.

Odpowiednią charakterystykę przedstawiającą zależność prądu drenu od napięcia z uwzględnieniem napięcia bramki U_{GS} podano na rys d. Potwierdzają one wskazaną już wadę tranzystorów polowych złączowych - pełne otwarcie przy braku napięcia bramka-źródło co w praktyce nie jest akceptowane szczególnie w odniesieniu do przekształtników większej mocy. Z tego powodu nie spotyka się obecnie w ofercie tego typu przyrządów o strukturach krzemowych. **Ponieważ wykonywanie tranzystorów MOS z zastosowaniem węgla krzemu napotyka na znaczne trudności pierwsze doświadczalne serie tranzystorów polowych z tego nowego materiału to właśnie struktury złączowe (JFET).**

Wykonywane są struktury JFET-SiC normalnie wyłączone i po doprowadzeniu dodatniego napięcia (do 3V) przechodzą do przewodzenia

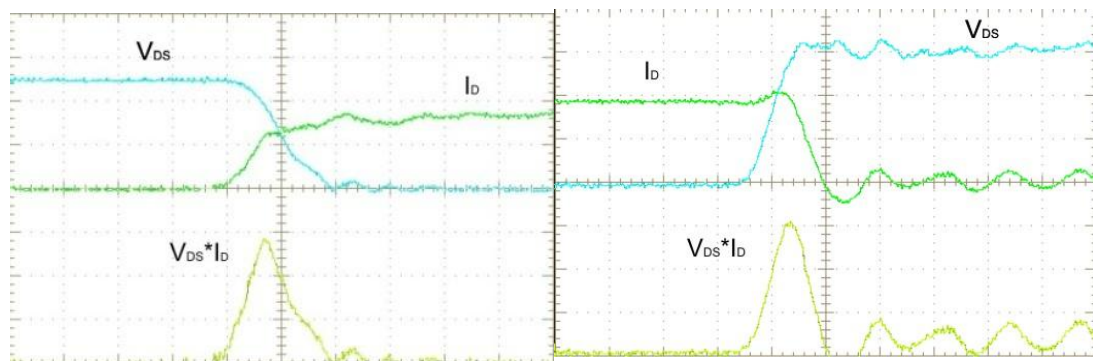
M. Nowak Elementy
Energoelektroniki



Prototypowy JFET - parametry (2009 r):

- 2,4x2,4mm powierzchni aktywnej w obudowie TO220
- 1,5kV napięcie przebicia wstecznego
- 5A prąd nominalny
- Rezystancja $R_{on}=0,35\Omega$
- Napięcie zatkania kanału -19,5 do -24,5V
- Dopuszczana maksymalna temperatura pracy – 175 C

Właściwości dynamiczne:



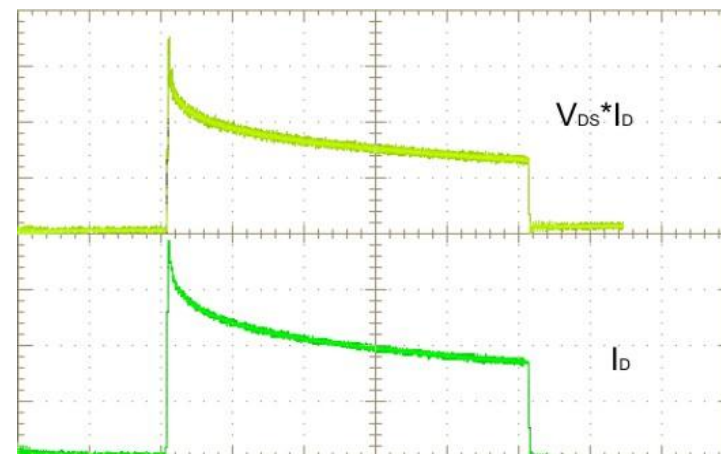
Energia tracona przy przełączaniu(dla prądu nominalnego 5A) :

*** $E_{on} = 35\mu J$**

**** $E_{off} = 50\mu J$**

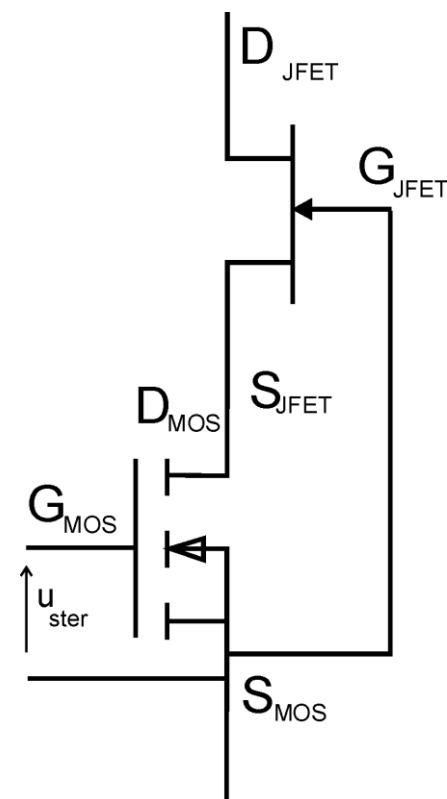
M. Nowak Elementy
Energoelektroniki

Specyficzna właściwość JFET'a SiC
Wytrzymałość zwarciova – znacznie lepsza niż w porównywalnych przyrządach krzemowych wynika ze znacznie większej dopuszczalnej temperatury struktury ~ 350 C. Przez ponad 10 μs przyrząd wytrzymuje pełne zwarcie co gwarantuje możliwość niezawodnego zabezpieczenia go. Może też być wykorzystany jako ogranicznik prądu zwarcia.



Para SiC-JFET - Si-MOS (Kaskoda , para Baligi)

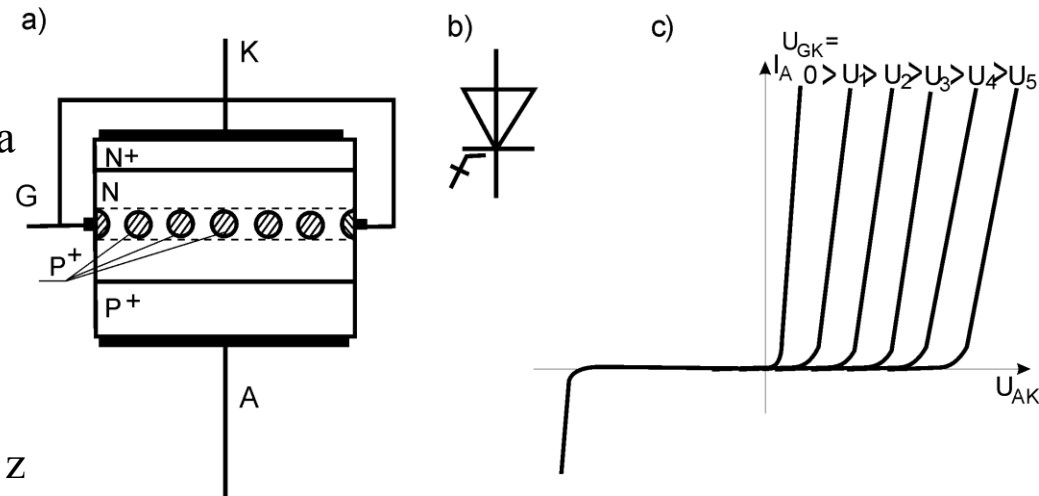
Tranzystory polowe złączowe wykonane z węgla krzemu cechuje stosunkowo mała rezystancja kanału w porównaniu z wysokonapięciowymi tranzystorami MOSFET. Wynika to w pierwszym rzędzie z wielkiej wytrzymałości na przebicie i wynikającej stąd małej grubości i niewielkiej rezystancji strefy dryftu przyrządów unipolarnych. Dla usunięcia istotnej wady tranzystora złączowego polegającej na przewodzeniu przy braku (lub przy zerowym napięciu) sygnału sterującego (tzw. „normalnie załączony”) wprowadzono układ kaskody którego specyfikę objaśnia schemat z rys. Szeregowe połączenie tranzystora krzemowego MOS na napięcie przebicia 30-50V z tranzystorem JFET z węgla krzemu na napięcie 1000V lub więcej tworzy przyrząd o atrakcyjnych właściwościach: małej rezystancji w stanie przewodzenia i sterowaniu takim samym jak w tranzystorze MOS. Doprowadzenie do bramki MOS’a dodatniego napięcia +10V powoduje zwiększenia napięcia na bramce JFET’a od wartości -30V (-50V) do wartości bliskiej zero. Oznacza to przejście tego wysokonapięciowego przyrządu do stanu przewodzenia. Odwrotnie – zmniejszenie napięcia na bramce MOS’a do 0V powoduje spolaryzowanie bramki JFET’a napięciem ujemnym odpowiadającym napięciu przebicia MOS’a i wyłączenie tranzystora z węgla krzemu. Rezystancja łącznika w stanie przewodzenia jest równa sumie przewodzących MOS’a i JFET’a lecz należy zauważyć, że rezystancja MOS’ów niskonapięciowych jest bardzo mała (pojedyncze miliomy)



Tyrystor polowy FCT (Field Controlled Thyristor) (lub SiTh- Static Induction Thyristor)

jest przyrządem unipolarnym (polowym), w którym wykorzystano zjawisko sterowania przepływem ładunków w obszarze złącza spolaryzowanego zewnątrz. Strukturę wewnętrzną tyryстора polowego pokazano na rys.a. Jak widać, jest ona zbliżona do struktury diody energetycznej, w której w warstwie zubożonej N wytworzono rodzaj siatki z materiału P+. Polaryzując tę siatkę ujemnie względem katody N+, blokuje się przepływ prądu wyłączając element. Odpowiednie charakterystyki napięciowo prądowe tyryстора SiTh z uwzględnieniem napięcia polaryzującego bramkę przedstawiono na rys.c. Z uwagi na zasadę działania tyrystor polowy trudno uznać za element blisko spokrewniony z tyrystorem, jego zakres zastosowań jest jednak podobny do tyryстора wyłączanego prądem bramki GTO..

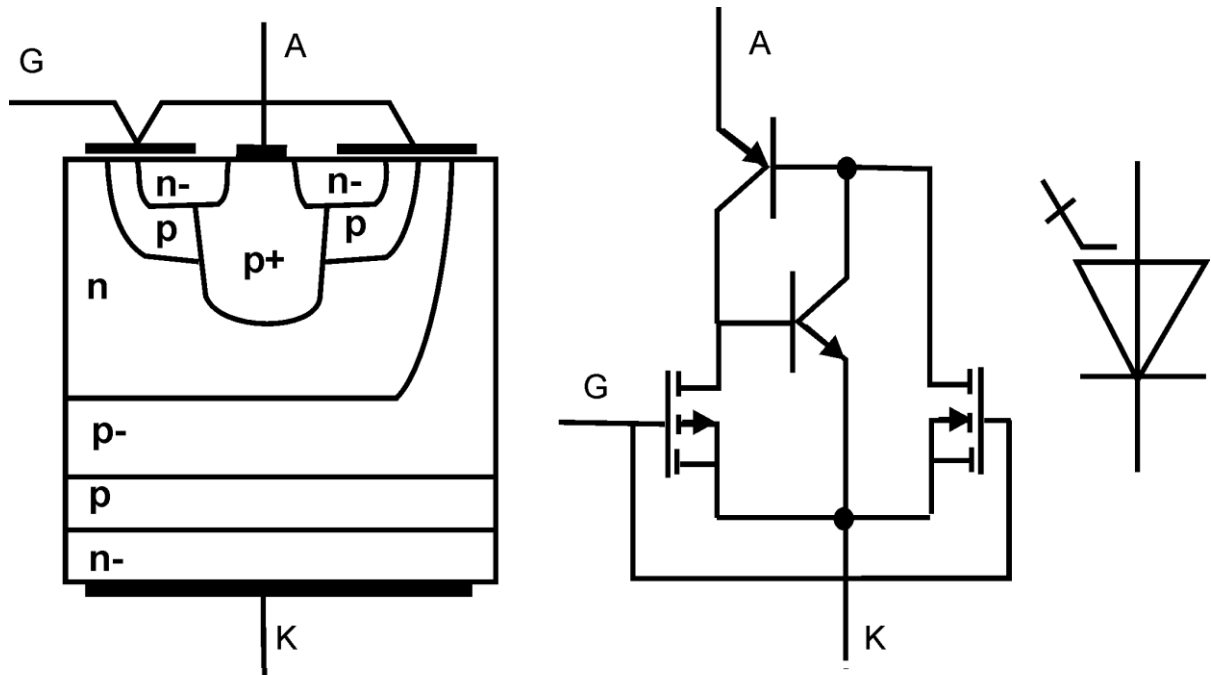
Tyrystor polowy jest nieprzystosowany do pracy przy znacznych napięciach zwrotnych i cechuje go duży spadek napięcia w stanie przewodzenia (3÷4 V). Przy wyłączaniu w obwodzie bramki przepływa w tyrystorze polowym znaczny, porównywalny z GTO, impuls prądu, lecz czas wyłączania jest krótszy. Pozostawanie elementu w stanie przewodzenia przy braku sygnału sterującego jest cechą wysoce niekorzystną co w praktyce doprowadziło do wyeliminowania tyrystorów FCT z szerokiego zastosowania.



Tyrystor sterowany MOS'ami (MOS Controlled Thyristor)

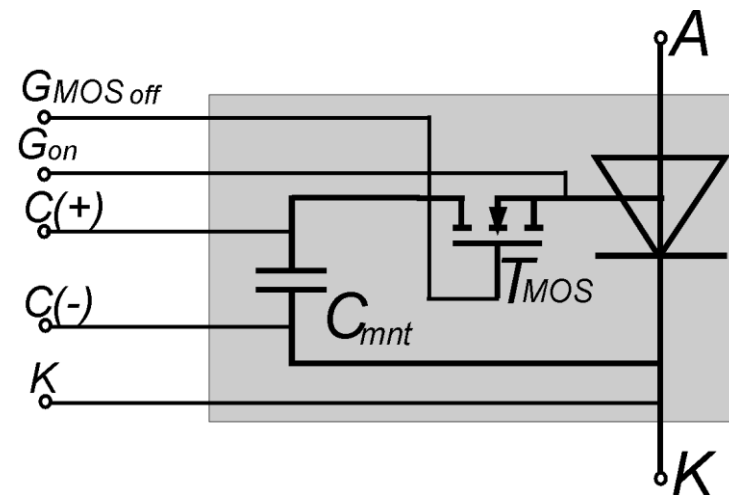
jest elementem o dosyć złożonej budowie. Strukturę półprzewodnikową tyrystora MCT pokazano na rys.a. Stanowi on połączenie klasycznej czterowarstwowej struktury tyrystora zwykłego z dwoma tranzystorami polowymi MOS z kanałami N i P, połączonych tak, jak to przedstawiono na rys.b. Symbol stosowany do oznaczenia tego przyrządu pokazano na rys.c. Dodatni potencjał na elektrodzie połączonych bramek obu tranzystorów powoduje załączenie tyrystora. Potencjał ujemny powoduje wyłączenie. Tyrystor MCT należy do generacji nowoczesnych przyrządów o budowie komórkowej. składnikiem budowanych przekształtników.

Cała struktura MCT na prąd kilku- dziesięciu amperów zawiera do kilkuset tysięcy komórek połączonych równolegle o strukturze takiej jak pokazana na rys. 3.42a. MCT jest przyrządem, który nie uzyskał pomimo dużych oczekiwań i pozytywnych prognoz znaczącej pozycji na rynku półprzewodnikowych łączników mocy i obecnie jest raczej zjawiskiem podręcznikowym niż składnikiem budowanych przekształtników.



Tyrystor wyłączany zintegrowanym kondensatorem

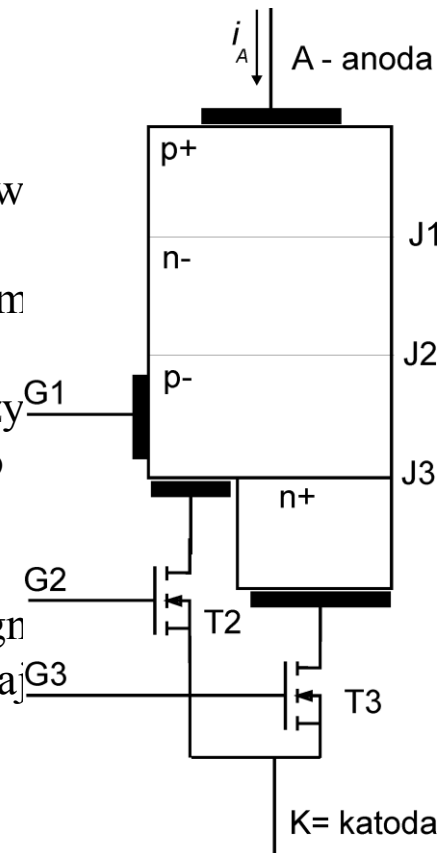
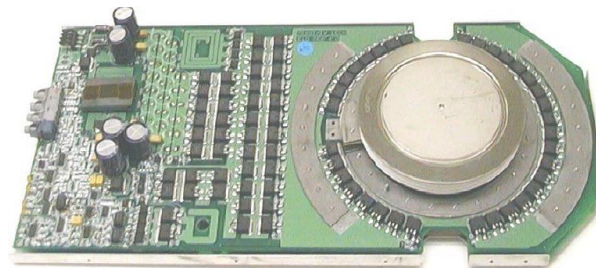
jest łącznikiem dużej mocy o złożonej budowie. Działa on zgodnie z zasadą charakterystyczną dla tyryстора komutowanego bramką przy czym specyficzne rozwiązanie techniczne pozwala na znacznie uproszczoną budowę sterownika obwodu bramki i poprawę walorów konstrukcyjnych całego przekształtnika. Istotę budowy tego rodzaju tyryстора przedstawia rysunek. Dzięki zastosowaniu monolitycznych kondensatorów wielowarstwowych które mogą być wmontowane we wnętrzu obudowy wraz z silnopiędowym łącznikiem z tranzystorów MOS utworzony jest bardzo efektywny obwód generacji impulsów bramkowych umożliwiającą wyłączenie podstawowej struktury GCT. Naładowanie kondensatora o odpowiedniej pojemności (doprowadzenia C+ ,C-) do napięcia 20V prowadzone pomiędzy dwoma kolejnymi odległymi o kilka milisekund procesami komutacji może być dokonywane przy stosunkowo niewielkich wartościach prądu . Do załączenia tyryстора służy doprowadzenie bezpośrednio do bramki tyryстора (G_{on}) krótkich kilkuamperowych impulsów - podobnie jak w zwykłym tyrystorze



Tyrystor wyłączany MOS'ami w bramce i katodzie (ETO – Emiter Turn Off)

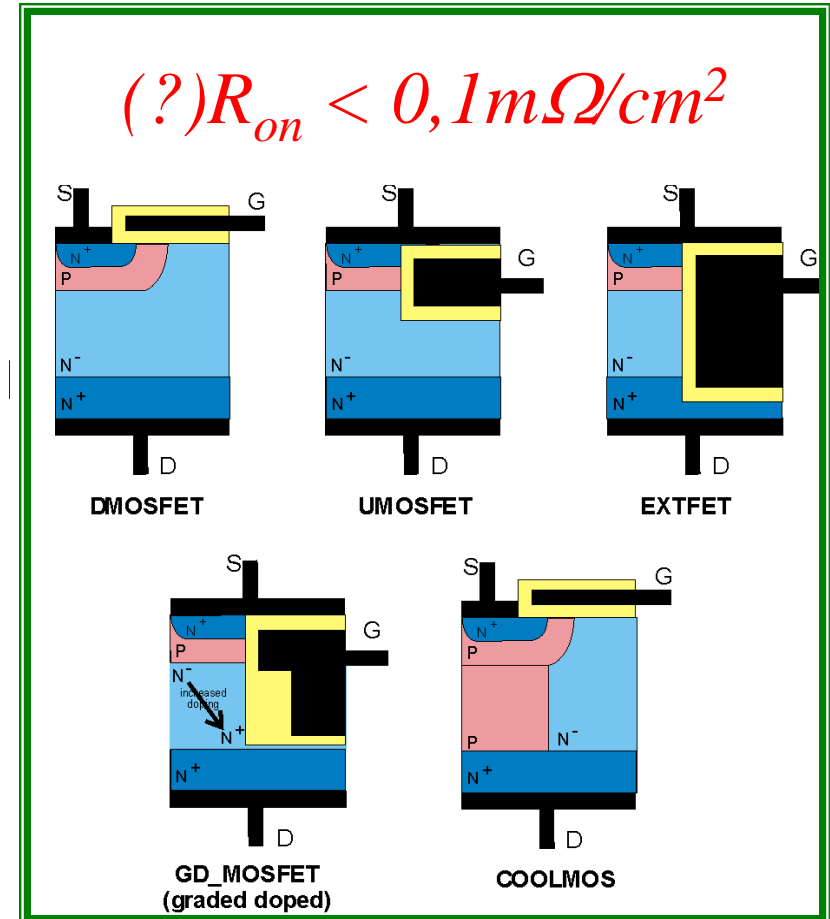
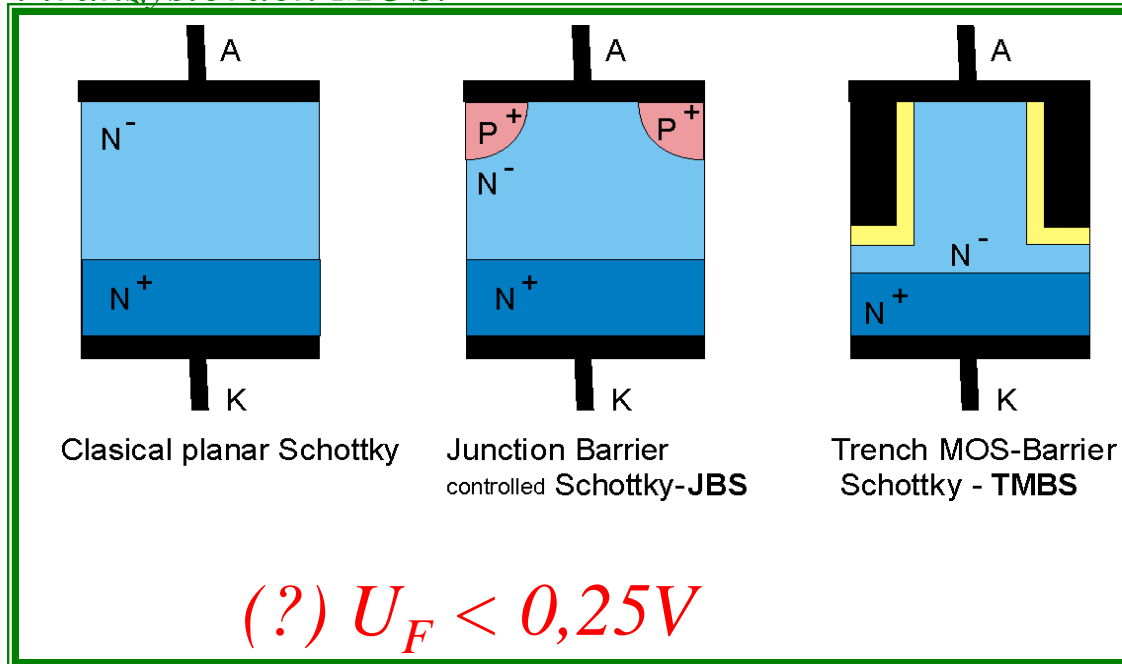
jest elementem o budowie hybrydowej w którym tyrystor GTO jest wyłączany w podobny sposób jak w GCT a zatem jako tzw. twardo wyłączany. Jest to typowy łącznik na wielkie moce i może być wykonany na napięcia 5-6kV i wyłączane prądy 1 kA. Zasadę jego działania ilustruje schemat na rysunku. Tyrystor GTO może być w wersji symetrycznej (wtedy wykazuje pełną wytrzymałość napięciow w kierunku wstecznym lub przy wprowadzeniu kanałów n+ w warstwie P+ od strony anody będzie GTO asymetrycznym. Załączanie odbywa się jak w zwykłym tyrystorze przez doprowadzenie dodatniego impulsu prądu do bramki G1 przy załączonych i przewodzącym tranzystorze MOS T3. Wyłączanie odbywa się przy załączonym tranzystorze MOST2 i prąd anodowy w całości przenosi się do tego tranzystora przed wyłączeniem tranzystora T3 i wzrostem napięcia anodowego. Dzięki temu proces wyłączania jest w pełni kontrolowany i można uniknąć stosowania obwodów odciażających. Obwody sterowników przygotowujących sygn bramkowy do załączania i wyłączania ETO mogą być bardzo zwarte i nie pobierają dużo energii.

Sama konstrukcja ETO wraz z tranzystorami MOS jest oczywiście dosyć złożona

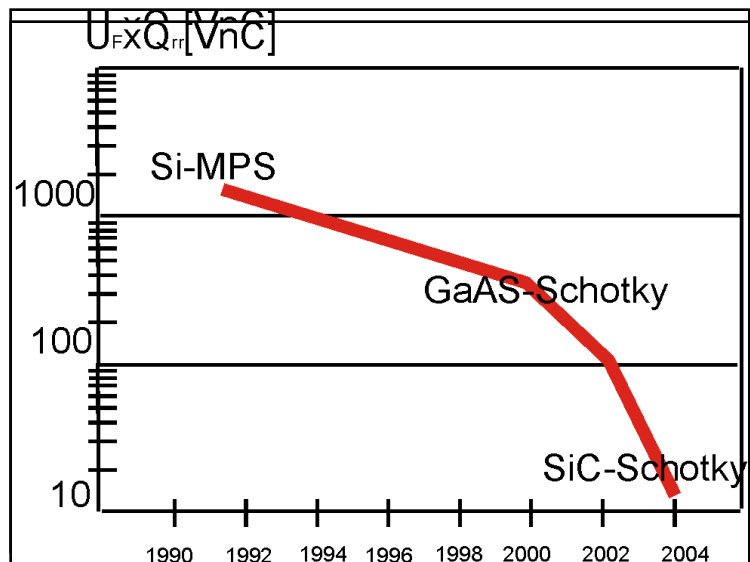


Można wskazać szereg kluczowych zagadnień wokół których koncentrują się prace badawcze i rozwojowe (R&D) – zobrazowane w dalszych slajdach (*A. B. C. . .*)

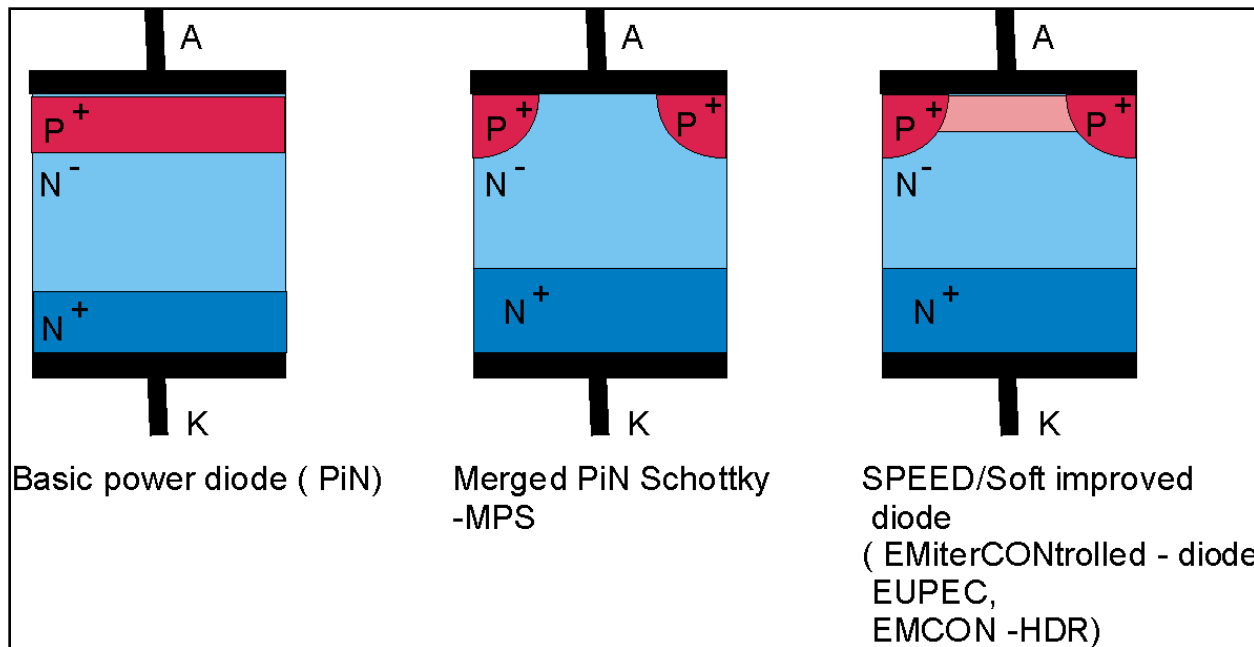
A. Zmniejszanie spadku napięcia przewodzenia na łącznikach niskonapięciowych diodach i tranzystorach MOS.



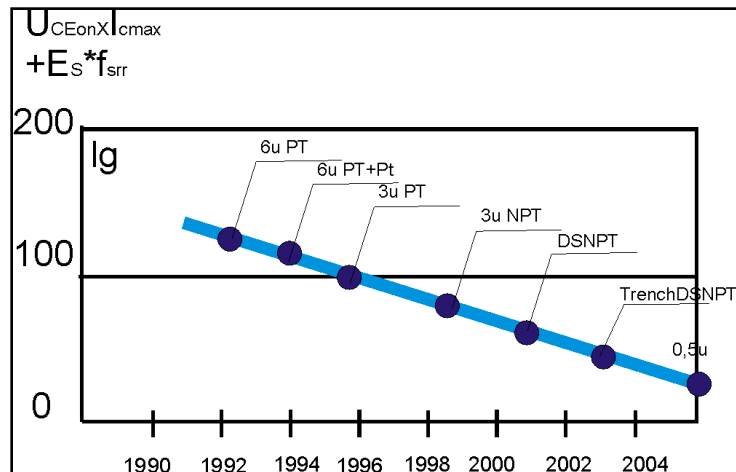
B. Poprawa zagregowanego współczynnika jakości obrazowanego wykresem wzgl. czasu lub technologii stosowanej (Figure of Merit – FOM) np:



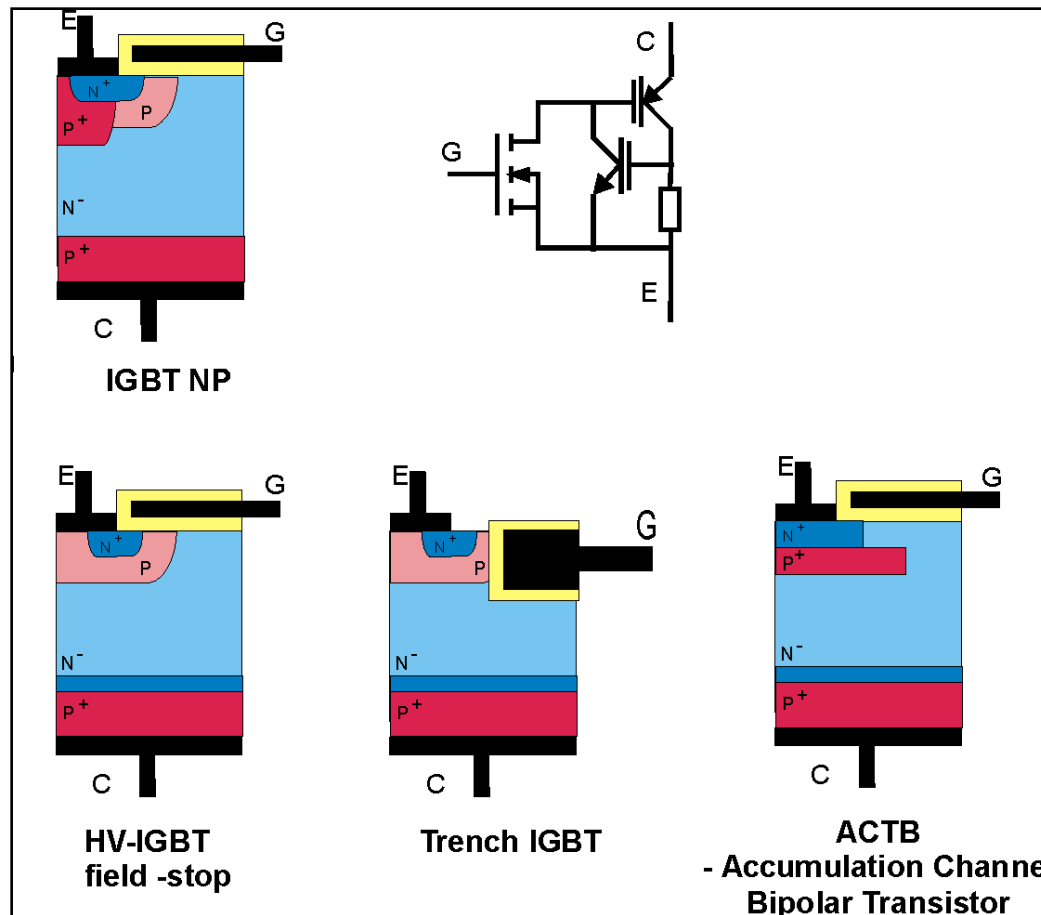
*dla diod $FOM \approx UF * Qrr$*



B. Poprawa zagregowanego współczynnika jakości obrazowanego wykresem wzgl. czasu lub technologii stosowanej (Figure of Merit – FOM) np:



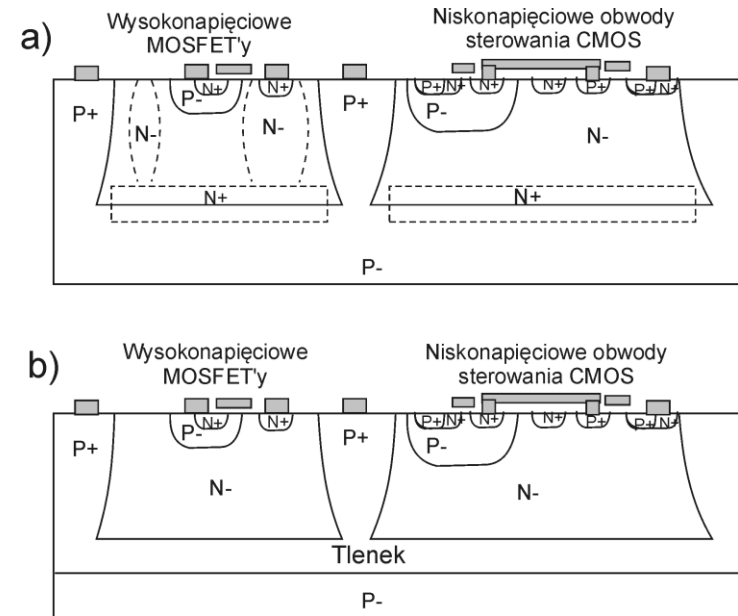
*dla IGBT - FOM $\approx U_{CE(on)} * E_{s(on-off)} * f_S$*



C. Tworzenie złożonych struktur – scalonych układów mocy (PIC – Power Integrated Circuit)

Istota stosowania scalonych układów mocy jest podobnie jak w standardowych scalonych układach mikroelektroniki uproszczenie konstrukcji i obniżenie ceny co jest zazwyczaj uzasadnione w przypadku dużych serii zespołów. Typowymi przykładami zastosowania takich PIC-ów są sterowniki do maszyn w napędach małej mocy, zasilaczach sterownikach lamp gazowanych lub też jako złożone sterowniki do półprzewodnikowych łączników dużej mocy. W przypadku energoelektroniki integracja wiąże się z wytworzeniem i funkcjonalnym połączeniem w obszarze jednej struktury mikroukładów układów sygnałowej elektroniki ze sterownikami (popularnie zwanych „drive’rami”) i sterowanymi za ich pośrednictwem łącznikami mocy przekształtnika. Część energetyczna mocy zwykle powinna zapewnić kontrolę prądów odbiornika do 10A przy napięciu do 600V podczas gdy technologia części niskonapięciowej jest dostosowana do napięć nie wyższych niż kilkanaście woltów przy mocy mW.

Podstawowym zagadnieniem rozwiązywanym przy tworzeniu tego rodzaju struktur jest zapewnienie odpowiedniej izolacji pomiędzy częścią wysokonapięciową a obwodami mikroelektroniki. Dwie metody stosowane w takich specyficznych strukturach zilustrowane są na szkicach rysunku. W pierwszym przypadku odseparowanie stref: nisko i wysokonapięciowej jest uzyskane poprzez wytworzenie wewnętrznej warstwy N+ która jest przyczyną wytworzenia złącza blokującego wysokie napięcie (rys.a). W drugiej metodzie pod warstwą epitaksjalną jest wytworzona warstwa izolatora – tlenku krzemu która zapewnia izolację (b)



Łączenie szeregowe tyrystorów

W przekształtnikach na napięcie przemienne powyżej 3kV występuje konieczność szeregowego łączenia diod i tyrystorów. Takie rozwiązanie wymaga by uzyskać równomierny rozkład napięć na szeregowo połączonych zaworach tej samej klasy napięciowej. Ponieważ przyczyną nierównomiernego rozkładu napięć jest rozrzut parametrów przyrządów półprzewodnikowych a selekcja tych parametrów jest niezwykle kosztowna konieczne jest zastosowanie środków pomocniczych dla wyrównania napięć.

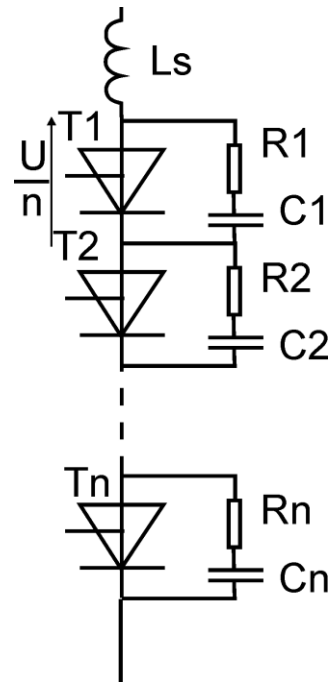
Zastosowanie gałęzi pomocniczych RC w których zasadnicze znaczenie z punktu widzenia rozkładu napięcia mają kondensatory służy wyrównaniu napięć podczas wyłączania tyrystorów. Prąd przepływający przez kondensator w gałęzi dołączonej równolegle do T3 powoduje naładowanie kondensatora do napięcia ΔU_c proporcjonalnego do wartości ładunku ΔQ_{rr} który stanowi różnicę pomiędzy $Q_{rrT1,2}$ (ładunek przejściowy w tyrystorach T1 i T2 – założony jako identyczny) i Q_{rrT3} . Na podstawie znanej wartości możliwej odchyłki ładunku przejściowego oraz założonej wartości odchyłki napięcia δ_u można określić wymaganą wartość pojemności C_s

$$C_s = \frac{(n-1)\Delta Q_{rr}}{U_w \delta_u}$$

Kondensatory nie mogą być włączane bezpośrednio do tyrystora, gdyż w momencie jego załączenia rozładowywałyby się impulsowo grożąc zniszczeniem tyrystora. Stąd konieczność włączenia szeregowo z każdym kondensatorem rezystancji tak by ograniczyć prąd rozładowania.

Dla zapewnienia równomiernego rozkładu napięć przy załączaniu szeregowo połączonych zaworów należy zastosować dławik (L_s) W rozpatrywanym układzie przy bliskiej zeru wartości indukcyjności ten z tyrystorów, który załącza z opóźnieniem Δt_g względem pozostałych dwóch zostanie poddany działaniu pełnego napięcia U_w . Jeżeli indukcyjność $L_s \neq 0$ to w opisywanej sytuacji na spóźniającym się tyrystorze wystąpi napięcie równe napięciu dołączonego do niego kondensatora C_s powiększone o spadek napięcia na rezystorze R_s wywołany przepływem prądu I_s narastającego w dławiku L_s pod wpływem napięcia $(n-1)U_w/n$. Konieczna wartość indukcyjności jest wyliczana z wzoru:

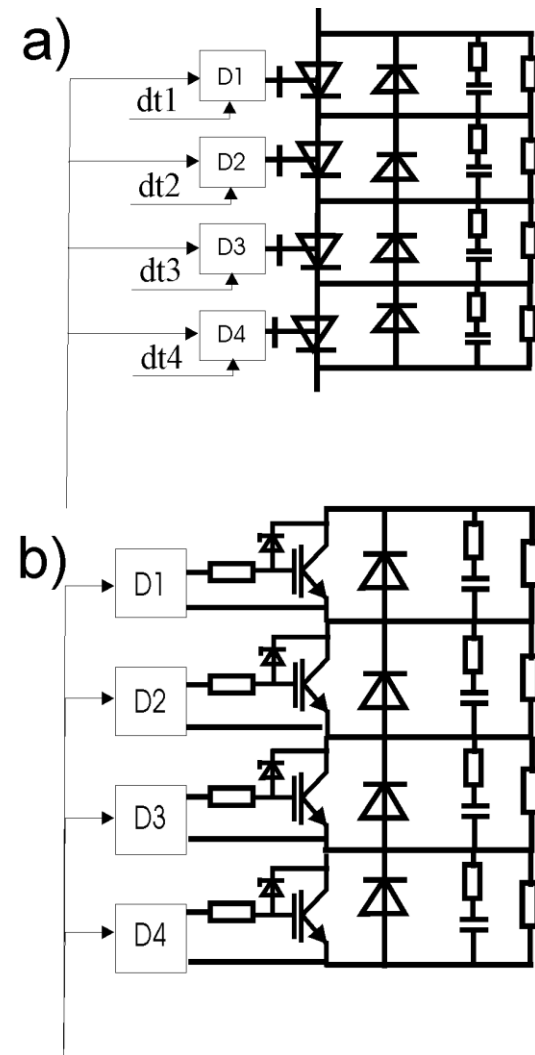
$$L_s = \frac{(n-1)\Delta t_g R_s}{\delta_u}$$



Podobnie jak w przekształtnikach budowanych z zastosowaniem tyrystorów w wysokonapięciowych (energetycznych) przekształtnikach niezależnych na GTO i IGBT stosuje się łączenie szeregowe pojedynczych przyrządów. Dla zapewnienia równomiernego rozkładu napięć na połączonych w stos łączników konieczne jest zastosowanie odpowiednich dodatkowych środków technicznych.

W przypadku GTO/GCT przy łączeniu szeregowym poza obwodami RC i szeregową indukcyjnością dla zapewnienia wyrównywania napięć stosuje się specjalne sterowniki w których możliwe jest precyzyjne nastawianie korekty czasu załączenia poszczególnych zaworów tak by zlikwidować różnice w czasach opóźnienia załączenia tak jak to przedstawiono na rys.a.

Szeregowe łączenie wysokonapięciowych tranzystorów IGBT wiąże się z zastosowaniem specyficznego rozwiązania, które polega na włączeniu pomiędzy bramkę i kolektor, każdego z tworzących stos przyrządów gałęzi o charakterystyce nieliniowego ogranicznika napięcia (np.. diody lawinowej) tak jak to ilustruje rysunek b) . Napięcie przebicia tych pomocniczych elementów dobierane jest poniżej wartości dopuszczalnego napięcia zabezpieczanego IGBT. Po przekroczeniu cechowanej wartości napięcia przebicia następuje zwiększenie napięcia bramki tak, że napięcie kolektor-emiter zostaje ograniczone na wartości bliskiej napięciu przebicia.



Kryteria oceny i doskonalenia łączników półprzewodnikowych

