

# Nowoczesne tranzystory mocy, czyli długa droga do SiC i GaN

Praktycznie użyteczne tranzystory zostały wynalezione pod koniec lat 40. XX wieku (1947), najpierw germanowe (Ge), potem krzemowe (Si). Były to „zwykłe”, bipolarne tranzystory złączone (BJT – Bipolar Junction Transistor). Trzy warstwy półprzewodnika o przewodności typu p i typu n tworzą dwa złącza pn, a dzięki małej szerokości obszaru bazy, prąd może płynąć przez spolaryzowane zaporowo złącze kolektorowe, a wielkość prądu kolektora jest zależna od dużo mniejszego prądu bazy.

Istnieją tranzystory komplementarne, czyli typu NPN i PNP. **Rysunek 1** przypomina schemat ich budowy. Tranzystory bardzo często pełnią rolę wzmacniaczy, ale pracują też jako elementy przełączające, pełniące rolę kluczy – sterowanych zaworów. **Rysunek 2** pokazuje zasady ich sterowania w układach impulsowych. Przy napięciu  $U_{BE}$  poniżej 0,5 V prąd bazy jest bliski zeru i tranzystor jest wtedy zatkany. Aby otworzyć tranzystor bipolarny, trzeba przez obwód bazy przepuścić prąd. Wtedy, zależnie od wartości prądu bazy, na złączu baza-emiter wystąpi napięcie 0,6...0,8 V.

W wielu aplikacjach tranzystory szybko okazały się dużo lepsze od lamp elektronowych. Znalazły też szereg nowych zastosowań. Między innymi pojawiło się i rosło zapotrzebowanie na tranzystory większej mocy, wysokonapięciowe i coraz szybsze. Stopniowo ulepszano sposoby przekazywania ciepła ze struktury do obudowy i dalej do otoczenia. Opracowano tranzystory o coraz większej mocy strat: kilku, kilkunastu, a w końcu ponad 100 watów. Zwiększano też maksymalne dopuszczalne napięcia pracy. Tu problemem jest fakt, że wysokonapięciowe tranzystory muszą mieć większą szerokość (grubość) struktury bazy, a to oznacza pogorszenie szybkości i zmniejszenie wzmocnienia. Dlatego tranzystory wysokonapięciowe miały i mają małe wzmocnienie prądowe, niektóre tylko 10x, a nawet mniej. Do ich sterowania potrzebny jest duży prąd. Przez różne sprytne rozwiązania poprawiano ich parametry dynamiczne. Tranzystory stawały się coraz szybsze.

W każdym razie na rynku już od lat sześćdziesiątych konstruowano komplementarne, bipolarne tranzystory mocy (NPN i PNP) oraz wysokonapięciowe, głównie NPN. Część z nich optymalizowana była do pracy w szybkich układach przełączających – impulsowych. Jednak pomimo postępu, dawały o sobie znać nieuniknione ogranicze-

nia, wynikające z fundamentalnych zasad pracy tranzystorów bipolarnych. Poszukiwano lepszych rozwiązań, w tym innych typów tranzystorów.

Wcześniej wynaleziono **tranzystor polowy złączowy (JFET – Junction Field Effect Transistor)**. Budowa i zasada działania, zilustrowana na **rysunku 3** jest bardzo prosta. Prąd płynie między źródłem (S – Source) a drenem (D – Drain) przez tzw. kanał, wykonany z jednorodnego półprzewodnika. Elektroda sterującą S jest bramka (G – Gate). W takich klasycznych tranzystorach JFET występuje złącze półprzewodnikowe pn, co znajduje odzwierciedlenie w symbolach graficznych tych tranzystorów. Spolaryzowanie tego złącza w kierunku wstecznym, zaporowym zwiększa rezystancję kanału, a tym samym zmniejsza prąd tranzystora. Złącze to w trakcie pracy nie może być spolaryzowane przepustowo, ponieważ wtedy popłynie prąd bramki, jak przez zwykłą diodę.

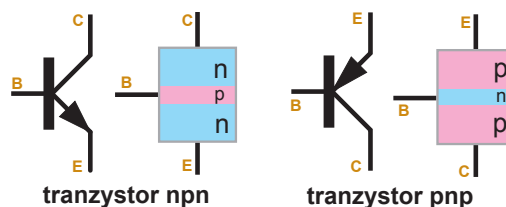
Istotną wadą praktyczną tranzystorów JFET jest fakt, że są to tranzystory normalnie otwarte. Czyli przy zerowym sygnale sterującym przewodzi prąd. Aby je zatkać, trzeba podać

sterujące równe zeru, czyli zewrzeć bramkę ze źródłem (można też podać niewielkie napięcie dodatnie, co najwyżej 0,5 V, by nie popłynął prąd bramki).

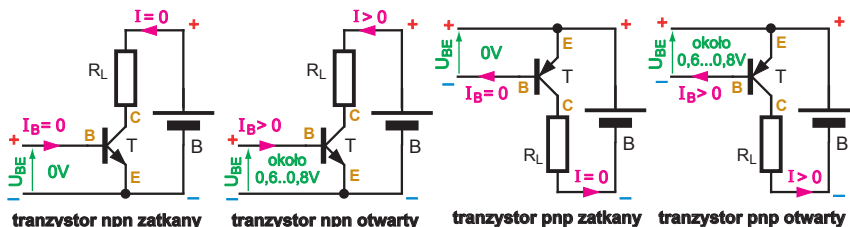
Z uwagi na temat artykułu, już teraz warto wspomnieć, że można też wykonać tranzystor polowy FET ze złączem metal-półprzewodnik, czyli ze złączem takim, jak w diodzie Schottky’ego. Tranzystory takie opracowano już w roku 1966 i nazywane są **MESFET (MEtal-Semiconductor Field Effect Transistor)**.

Warto nadmienić, że pierwszy patent na tranzystor polowy złożył w roku 1925 urodzony we Lwowie *Julius Edgar Lilienfeld*, ale tranzystory JFET pojawiły się w latach 1952-1953, czyli kilka lat po wynalezieniu tranzystora bipolarnego. Klasyczne tranzystory JFET i MESFET mają prostą zasadę działania i konstrukcję, jednak przez dziesiątki lat nie uzyskały znaczącej popularności. Nie upowszechniły się też JFET-y o MESFET-y dużej mocy ani wysokonapięciowe.

Na początku ery półprzewodnikowej elementami czynnymi (niezbyt) dużej mocy i elementami wysokonapięciowymi były wyłącznie tranzystory bipolarne (BJT). Choć tyrystory to odrębny temat, jednak warto wspomnieć o tych, wynalezionych w roku 1957, elementach dużej mocy. Zasada budo-

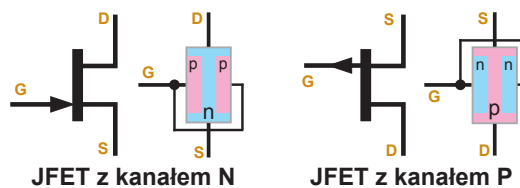


Rysunek 1.

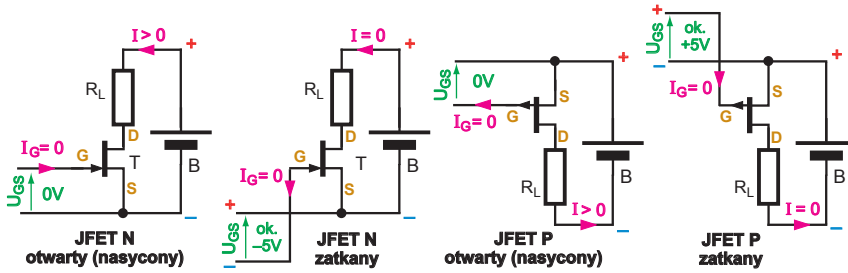


Rysunek 2.

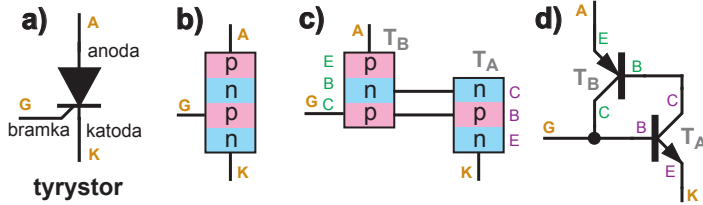
„niewygodne napięcie” – w przypadku tranzystorów JFET z kanałem N, zasilanych napięciem dodatnim, napięcie sterujące musi być ujemne o wartości kilku woltów, co ilustruje **rysunek 4**. Aby taki tranzystor otworzyć, trzeba podać napięcie



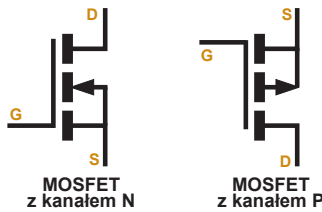
Rysunek 3.



Rysunek 4.



Rysunek 5.



Rysunek 6.

wy i działania tyristora jest bardzo prosta. To czterowarstwowy element npnp, który zachowuje się jak dwa połączone tranzystory – rysunek 5. Prąd bramki włącza „dolny” tranzystor  $T_A$ , a jego przewodzenie otwiera też „górny” tranzystor  $T_B$  i taki element się „zatrząskuje” wskutek silnego dodatniego sprzężenia zwrotnego. Po zaniku prądu bramki tyristor nadal przewodzi aż do zaniku prądu anodowego.

O ile trudno było opracować tranzystory o napięciach powyżej 100 V, które miałyby zadowalające wzmocnienie prądowe, o tyle stosunkowo szybko powstały tyristory o napięciach 1000 V, a nawet więcej i o prądach pracy rzędu setek amperów. Należy także wspomnieć o wynalezionych w roku 1960 tyristorach GTO (Gate Turn Off), które można było wyłączać prądem bramki. Do dziś tyristory i tyristory GTO są wykorzystywane w energoelektronice, przy czym ich napięcia pracy sięgają 10000 V, a prądy – rzędu tysięcy amperów. Żadne tranzystory nie mogą pracować w takich warunkach. Ograniczeniem jest niska częstotliwość pracy, znacznie poniżej 1 kHz. Większość tych elementów pracuje w sieciach energetycznych z przebiegami o częstotliwości 50 Hz

A jeśli chodzi o tranzystory mocy, to rewolucyjnym przełomem było wynalezienie i upowszechnienie tranzystorów...

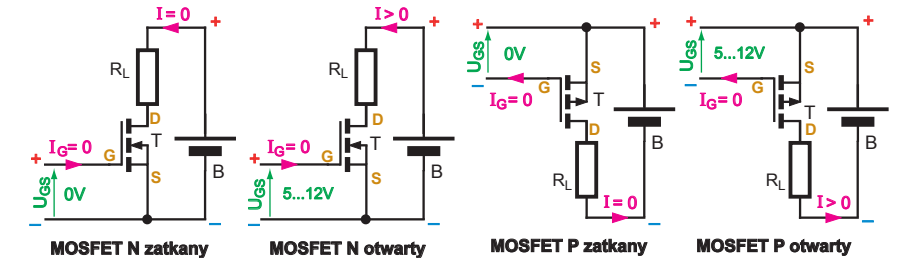
**MOSFET**

Historia tranzystora MOSFET sięga przełomu lat pięćdziesiątych i sześćdziesiątych (D. Kahng + M. M. Attala z Bell Labs). Nazwa

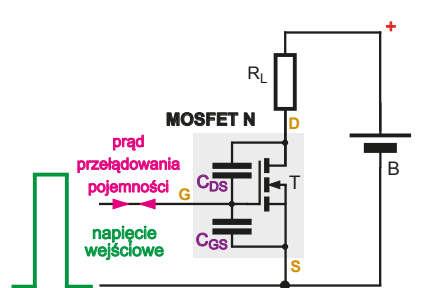
MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) wskazuje na budowę elementu. Jest to tranzystor polowy, podobnie jak JFET, ale nie ma w nim złącza diodowego. Elektrodą sterującą jest metalowa (M) bramka, która jest oddzielona od półprzewodnikowego (S) kanału warstwą izolatora, którym jest cienka warstwa tlenku (O – oxide), a ściślej dwutlenku krzemu ( $SiO_2$ ).

Rysunek 6, pokazuje symbole komplementarnych tranzystorów MOSFET z kanałem typu N i typu P.

Co ważne, typowy tranzystor MOSFET jest normalnie zatkany (zamknięty). Przy zerowym napięciu elektrody sterującej – bramki, rezystancja kanału jest ogromna, a prąd praktycznie równy zero. W przeciwieństwie do tranzystorów JFET, a podobnie jak w przypadku tranzystorów BJT, klasyczny MOSFET zostaje otwarty przez podanie na bramkę napięcia o „wygodnej polaryzacji”.



Rysunek 7.



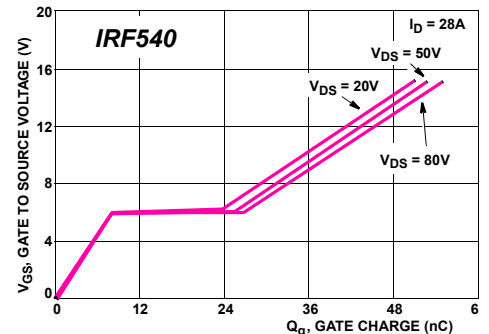
Rysunek 8.

W przypadku MOSFET-a z kanałem N jest to napięcie dodatnie względem źródła, a dla tranzystorów z kanałem P – ujemne, jak pokazuje rysunek 7.

Trzeba też nadmienić, że istnieją tranzystory MOSFET normalnie otwarte (*depletion mode* – zubożane), które przy zerowym napięciu bramki są otwarte i zatyka się je napięciem ujemnym na bramce, tak samo jak tranzystory JFET (rysunek 4), jednak przyłączającą większość stanowi „klasyczny MOSFET-y”, normalnie zatkane (*enhancement mode* – wzbogacane), działające według rysunku 7.

Obwód bramki MOSFET-a jest rodzajem kondensatora, dlatego sterowanie jest napięciowe. W warunkach statycznych prąd tam nie płynie – obwód bramki jest doskonały, nie zużywa energii. Jednak energia jest potrzebna podczas włączania i wyłączania. Zasadniczo MOSFET-y mocy są bardzo szybkie, jednak w praktyce realnym ograniczeniem jest konieczność przeładowania znacznej pojemności wejściowej  $C_{GS}$ , wynoszącej od 1 nF do ponad 10 nF. Aby w pełni otworzyć typowego MOSFET-a, trzeba zmienić napięcie na jego bramce o około  $DU=10$  V. Wskazuje to, że trzeba dostarczyć lub usunąć ładunek  $Q=DU \times C_{GS}$ . W rzeczywistości przeładowany ładunek musi być większy z uwagi na wpływ tzw. pojemności Millera między drenem i bramką. Dlatego w katalogach zamieszczane są charakterystyki przełączania jak na rysunku 8, pokazujące zmiany napięcia na bramce od zmiany ładunku bramki ( $Q_G$ ). Poziomy „schodek” wynika właśnie z wpływu pojemności Millera ( $C_{GD}$ ).

Teoretycznie czas przełączania mógłby być rzędu pojedynczych nanosekund, ale przy każdej zmianie stanu MOSFET-a musi w obwodzie bramki popłynąć prąd, by prze-



## WYBÓR KONSTRUKTORA

ładować pojemności. W związku z ograniczoną wartością prądu sterującego bramki, realne czasy przełączania MOSFET-ów mocy są rzędu kilkudziesięciu, a nawet kilkuset nanosekund. Niemniej MOSFET-y mogą pracować w układach przełączających z częstotliwościami do kilkuset kiloherców, a nawet ponad 1 MHz.

Pierwszy MOSFET został zaprezentowany w roku 1960. Tranzystory MOSFET w pierwszej kolejności zostały wykorzystane do budowy układów scalonych. W roku 1964 w RCA powstał pierwszy układ scalony, zbudowany z takich tranzystorów. Dziś podstawą techniki cyfrowej są układy scalone CMOS. CMOS, czyli Complementary MOS wskazuje na wykorzystanie komplementarnych tranzystorów MOSFET, czyli z kanałem N i z kanałem P. Kluczową zaletą jest fakt, że w spoczynku takie układy nie pobierają prądu. Pobór prądu rośnie wraz ze wzrostem częstotliwości przełączania.

Lata sześćdziesiąte i siedemdziesiąte to okres rozwoju układów scalonych z coraz mniejszymi tranzystorami MOS, jednak na upowszechnienie się tranzystorów MOSFET większej mocy trzeba było poczekać. Pierwsze MOSFET-y mocy pojawiły się w drugiej połowie lat 70, czyli ponad 15 lat od wynalezienia tego rodzaju tranzystora., bowiem trzeba było skutecznie rozwiązać szereg poważnych problemów.

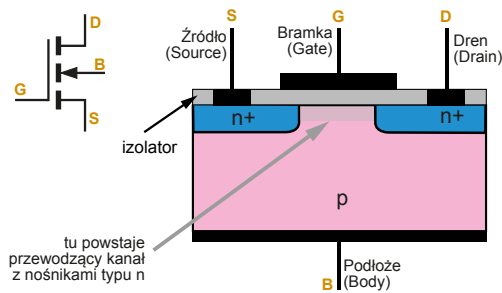
W podręcznikach najczęściej przedstawia się budowę MOSFET-a jak na **rysunku 9**. Początkujących dziwi fakt, że w tranzystorach MOSFET N półprzewodnik, w którym tworzy się przewodzący kanał jest typu P (analogicznie w MOSFET-ach P). Podanie na bramkę napięcia dodatniego powoduje „odepchnięcie” nośników obszaru typu p w bezpośrednim sąsiedztwie bramki, tak zwaną inwersję i wytworzenie przewodzącego kanału z nośnikami typu n. Wtedy zależnie od napięcia bramki, różna jest szerokość i rezystancja kanału powstała między źródłem i drenem. W praktyce ważna jest minimalna rezystancja w pełni otwartego tranzystora, oznaczana  $R_{DS(on)}$ .

Tak zbudowany jest tzw. MOSFET lateralny, o budowie „poziomej”, gdzie prąd drenu płynie „poziomo”. Natomiast przy budowie tranzystorów MOSFET mocy wykorzystuje się bardziej złożone struktury „pionowe”, przez co powstaje też dodatkowa dioda między źródłem i drenem. Pierwsze tranzystory MOSFET były nazywane VMOS, gdzie litera V wskazywała na budowę kanału. Później ulepszono parametry zmieniając strukturę wewnętrzną – pojawiły się tranzystory DMOS. Działające MOSFET-y często są określane mianem UMOS lub TrenchMOS, przy czym istnieje mnóstwo rozwiązań konstrukcyjnych, stosowanych przez poszczególnych wytwórców. **Rysunek 10** pokazuje wspomniane schematy budowy.

Odnosnie skrótów warto wspomnieć, że oprócz podstawowych określeń typu NMOS, PMOS, CMOS oraz kluczowych struktur VMOS, DMOS i UMOS, producenci reklamowali i reklamują swoje nazwy handlowe takich tranzystorów. I tak Motorola reklamowała swoje tranzystory jako TMOS, Siemens – SIPMOS, Ixys – MegaMOS. Dla ciekawości można nadmienić, że słynne HEXFET-y o sześciokątnej budowie komórek zostały wypuszczone

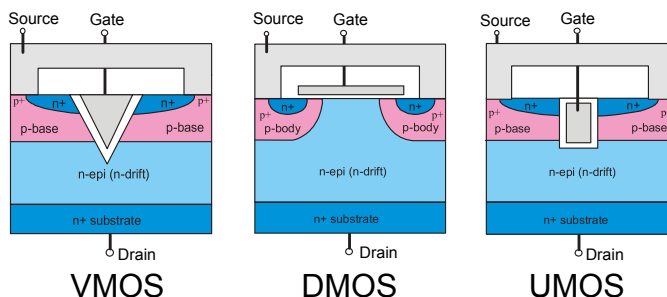
w roku 1979 przez pioniera w tej dziedzinie, firmę International Rectifier. Wszystko to były i są rozwiązania, gdzie tranzystor mocy MOSFET składa się z wielu małych „komórek” połączonych równolegle. Czym więcej jest takich komórek, tym większa jest sumaryczna powierzchnia czynna i tym mniejsza rezystancja otwartego tranzystora. Z uwagi na inną zasadę pracy i wykorzystanie wyłącznie nośników większościowych, generalnie MOSFET-y są znacznie szybsze od tranzystorów bipolarnych.

W każdym razie do końca lat siedemdziesiątych jedynymi praktycznie użytecznymi tranzystorami mocy były tranzystory bipolarne (BJT), których istotnymi wadami, oprócz małego wzmocnienia, była mała szybkość wyłączania, ujemny współczynnik cieplny (niekorzystny przy równoległym łączeniu elementów), a przy małych napięciach pracy względnie duże napięcie nasycenia  $U_{CESat}$ . W przeciwieństwie do tego, MO-



MOSFET z kanałem n

Rysunek 9.

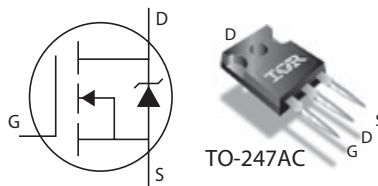


Rysunek 10.

SFET-y mocy są generalnie biorąc sterowane napięciowo, można je szybciej włączyć i wyłączyć, mają dodatni współczynnik cieplny, a wersje niskonapięciowe mają bardzo małą rezystancję stanie włączenia  $R_{DS(on)}$ , co nawet przy dużych prądach daje spadek napięcia i straty mocy dużo mniejsze, niż w bipolarnych. Nie występuje w nich zjawisko tzw. drugiego przebiecia, przez co są odporniejsze na przeciążenia. Dodatkowo MOSFET-y mocy z uwagi na budowę, niejako „przy okazji” mają wbudowaną diodę, która w wielu zastosowaniach jest zaletą.

Pierwsze MOSFET-y mocy były drogie, a ich parametry nie były zachwycające. Z czasem je udoskonalono i w niektó-

International  
**IR** Rectifier



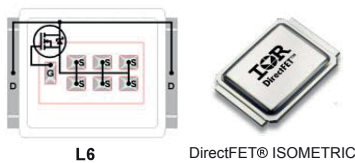
Rysunek 11.

**IRFP4468PbF**

HEXFET® Power MOSFET

$V_{DSS}$	100V
$R_{DS(on)}$ typ.	2.0mΩ
$R_{DS(on)}$ max.	2.6mΩ
$I_D$ (Silicon Limited)	290A
$I_D$ (Package Limited)	195A

International  
**IR** Rectifier



Rysunek 12.

**IRF6718L2TRPbF**  
**IRF6718L2TR1PbF**  
DirectFET® Power MOSFET

Typical values (unless otherwise specified)

$V_{DSS}$	$V_{GS}$	$R_{DS(on)}$	$R_{DS(on)}$
25V max	±20V max	0.50mΩ@10V	1.0mΩ@4.5V
$Q_g$ tot	$Q_{gd}$	$Q_{gs2}$	$Q_{rr}$
64nC	20nC	9.4nC	67nC
$Q_{oss}$	$V_{gs(th)}$		
50nC	1.9V		

rych zastosowaniach całkowicie wyparły one tranzystory bipolarne. Właśnie poprawa parametrów i obniżanie cen MOS-SETów mocy umożliwiły wykorzystanie i upowszechnienie impulsowych zasilaczy (przetwornic) różnego typu. MOSFET-y są też powszechnie wykorzystywane w elektronice samochodowej.

Jeden z pierwszych MOSFET-ów, oznaczony IRF100, wypuszczony w roku

1978 miał dopuszczalne napięcie  $U_{DS} = 100$  V i rezystancję w stanie otwarcia  $R_{DS(on)}$  równą  $0,1 \Omega$  ( $100$  m $\Omega$ ). Współczesny, 100-woltowy tranzystor IRLS4030-7PPbF tej samej firmy ma rezystancję  $R_{DS(on)}$  typowo  $3,2$  m $\Omega$ , maksymalnie  $3,9$  m $\Omega$ . Natomiast 100-woltowy, 520-watowy IRFP4468PbF (**rysunek 11**) typowo ma  $R_{DS(on)}$   $2$  m $\Omega$ , maksymalnie  $2,6$  m $\Omega$ . Dopuszczalny prąd impulsowy to  $1120$  A. Ciągły prąd struktury mógłby wynosić

$290$  A, ale rezystancja wyprowadzeń ogranicza go do  $195$  A.

Obecnie dostępne są MOSFET-y o rezystancji otwartego kanału poniżej  $1$  milioma ( $0,001 \Omega$ ). **Rysunek 12** to przykład z oferty International Rectifier – MOSFET IRF6718L-2TRPbF umieszczony w obudowie SMD o wymiarach  $9$  mm  $\times$   $7$  mm  $\times$   $0,65$  mm ma rezystancję kanału w stanie pełnego otwarcia – typowo –  $0,5$  m $\Omega$  ( $0,0005 \Omega$ ), maksymalnie  $0,7$  m $\Omega$  (przy  $U_{GS} = 10$  V). Maksymalny prąd ciągle zależy od temperatury struktury – przy dobrym chłodzeniu może sięgać nawet  $270$  A!

Z kolei **rysunek 13** przedstawia zapowiadany Infineon IPT004N03L o rezystancji  $R_{DS(on)}$   $0,4$  m $\Omega$  i prądzie pracy do  $300$  A.

Dla porównania warto dodać, że 10-centymetrowy odcinek miedzianego przewodu instalacyjnego o przekroju  $1,5$  mm $^2$  (średnicy  $1,4$  mm) ma rezystancję nieco powyżej  $1,1$  m $\Omega$ ...

Jak wiadomo, tranzystory MOSFET z kanałem P mają gorsze parametry. Jednak dziś i one wykazują zaskakująco dobre właściwości. Na przykład 30-woltowy MOSFET P Infineon BSC030P03NS3G ma  $R_{DS(on)}$  typowo  $3$  m $\Omega$  i może pracować przy prądach do  $100$  A – **rysunek 14**. Tymczasem bardzo popularny do dziś 100-woltowy MOSFET P typu IRF9540 ma  $R_{DS(on)}$  do  $117$  m $\Omega$ .

Pomimo poprawy parametrów, MOSFET-y z kanałem P są wielokrotnie mniej popularne od „klasycznych” MOSFET-ów N. A jeśli już mówimy o tranzystorach mało popularnych, to trzeba podkreślić, że są też dostępne na rynku MOSFET-y mocy „normalnie otwarte” (*depletion mode* – zu-



Preliminary IPT004N03L

Opti MOS™ Power-MOSFET



PG-HSOF-8-1

Product Summary

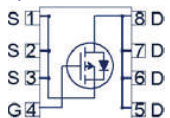
$V_{DS}$	30	V
$R_{DS(on),max}$	0.4	m $\Omega$
$I_D$	300	A
$Q_{OSS}$	141	nC
$Q_G(0V..10V)$	252	nC

Rysunek 13.



BSC030P03NS3 G

OptiMOS™ P3 Power-Transistor



$V_{DS}$	-30	V
$R_{DS(on),max}$	3.0	m $\Omega$
$I_D$	-100	A



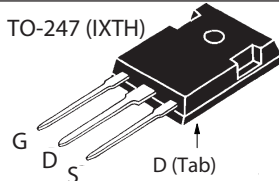
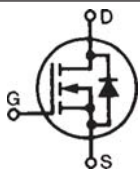
PG-TDSON-8

Rysunek 14.

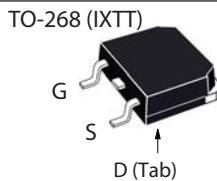


IXTH16N10D2  
IXTT16N10D2

Depletion Mode MOSFET N-Channel

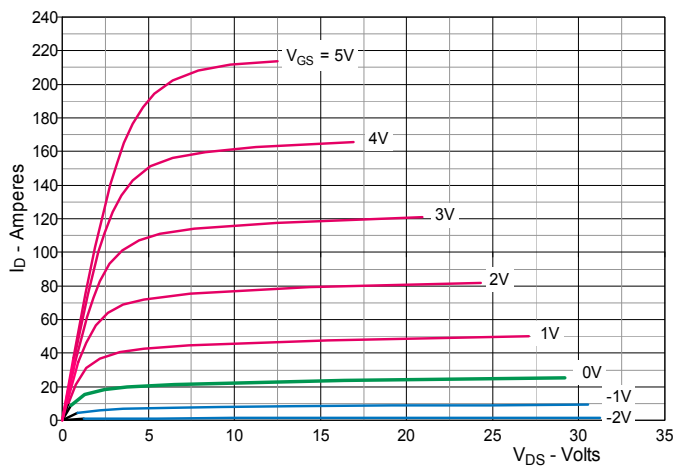
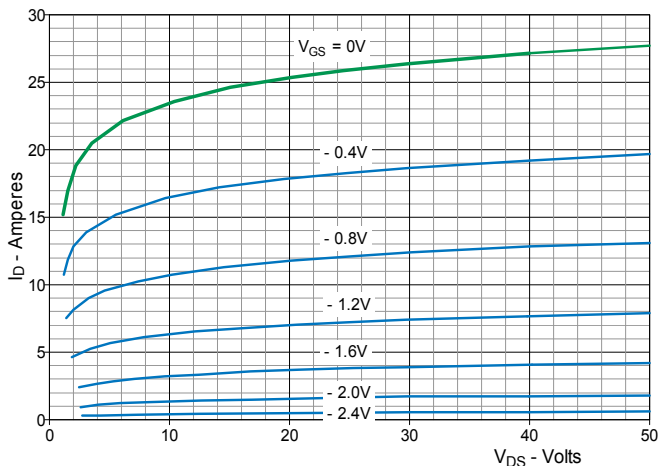


TO-247 (IXTH)

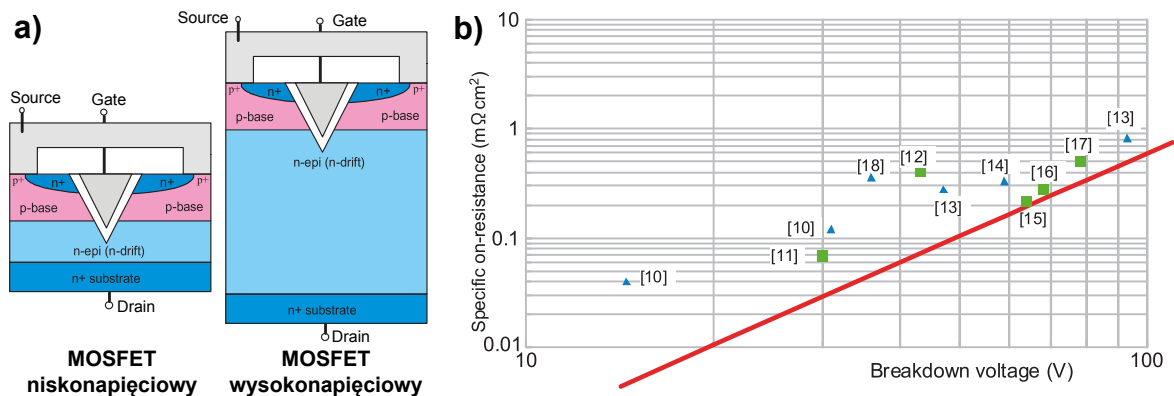


TO-268 (IXTT)

$V_{DSX} = 100V$   
 $I_{D(on)} \geq 16A$   
 $R_{DS(on)} \leq 64m\Omega$



Rysunek 15.



Rysunek 16.

bożane). Są wprowadzane bardzo rzadko stosowane, jednak w niektórych zastosowaniach okazują się niezastąpione, na przykład w przetwornicach, pracujących przy bardzo małych napięciach zasilania, nawet grubo poniżej 1 V.

Przykładem zubożonego MOSFET-a z kanałem N dużej mocy (do 530 W) może być IXYS IXTH16N10D2. Jak pokazano na **rysunku 15**, przy zerowym napięciu bramki jest otwarty (zielone krzywe), a w przeciwieństwie do JFET-ów i MESFET-ów, może także pracować przy dużych dodatnich napięciach bramki (czerwone krzywe).

Trudno natomiast byłoby znaleźć zubożonego MOSFET-a z kanałem P.

W każdy razie obserwując postępy w dziedzinie klasycznych MOSFET-ów można odnieść wrażenie, że tylko kwestią czasu jest opracowanie elementów o dowolnie małej rezystancji  $R_{DS(on)}$  i dowolnie wysokim napięciu pracy.

Owszem, współczesne tranzystory MOSFET, mając  $R_{DS(on)}$  rzędu 1 milioma, w niektórych zastosowaniach są bliskie ideału. Dotyczy to zwłaszcza ich pracy w roli kluczy – przełączników pracujących przy niedużych napięciach i niedużych częstotliwościach. Ale gdy potrzebny jest MOSFET wysokonapięciowy, nie jest tak różowo – rezystancje  $R_{DS(on)}$  są dużo większe.

**Dlaczego?**

Jeżeli MOSFET mocy to w rzeczywistości mnóstwo połączonych równolegle małych komórek, to przecież można uzyskać dowolnie małą rezystancję  $R_{DS(on)}$  przez zwiększenie powierzchni struktury. Otrzymamy wręcz idealny element przełączający o niemal zerowej rezystancji.

W zasadzie tak. Aby wyjaśnić problem dużej rezystancji  $R_{DS(on)}$  tranzystorów wysokonapięciowych, trzeba też zrozumieć problem pojemności.

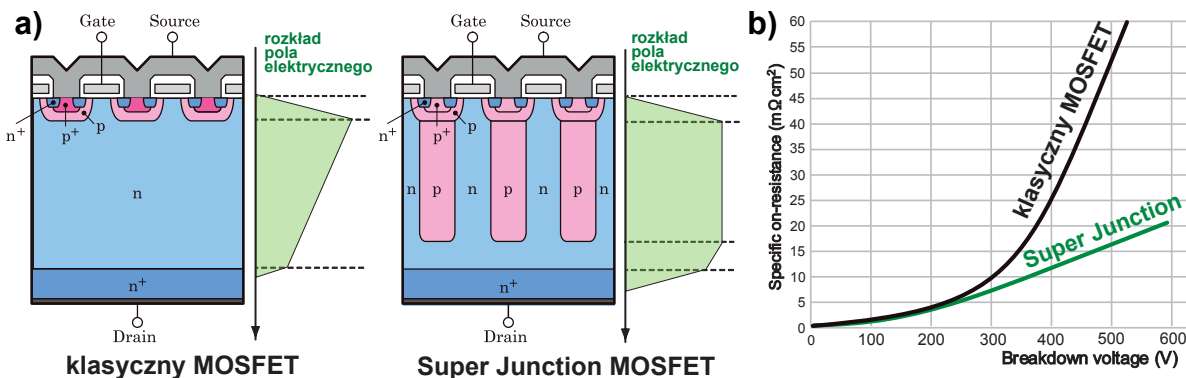
Przede wszystkim jednak w grę wchodzi coś prostszego. Po pierwsze jest problem maksymalnego napięcia pracy (zatkanego tranzystora). Można tu przywołać analogię wytry-

**ST** STFW3N170, STW3N170  
N-channel 1700 V, 8Ω typ., 2.3 A

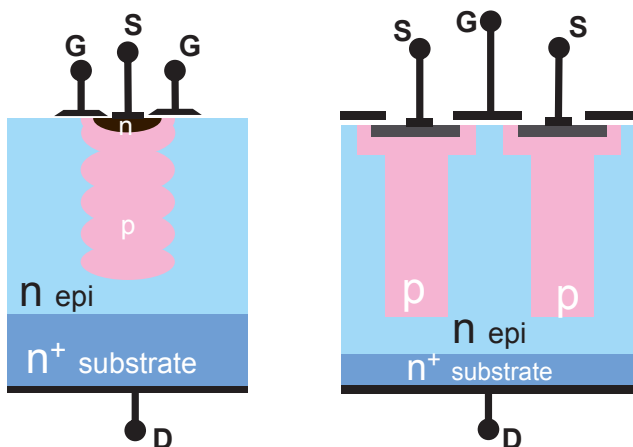
Features      Datasheet — preliminary data

Order codes	$V_{DS}$	$R_{DS(on)}$ max	$I_D$
STFW3N170	1700 V	12Ω	2.3 A
STW3N170			

Rysunek 17.



Rysunek 18.



multi-epitaxy SJ MOS      deep trench SJ MOS

Rysunek 19.

małości dielektryka: czym grubszy dielektryk, tym wyższe będzie napięcie jego przebicia. Nie wchodząc w szczegóły można sobie wyobrazić, że wysokonapięciowy MOSFET musi być „grubszy” od niskonapięciowego, żeby występujące napięcie nie przebiło zamkniętego kanału – **rysunek 16a**. A jeśli będzie „grubszy” to po otwarciu będzie on miał większą rezystancję.

Aby porównać pod tymi względami różne tranzystory, określa się tzw. rezystancję charakterystyczną (*specific resistance*) – rezystancję związaną z jednostką powierzchni struktury, wyrażaną w miliomach razy centymetr kwadratowy ( $mW \cdot cm^2$ ) lub miliomach razy milimetr kwadratowy ( $mW \cdot mm^2$ ).

W literaturze można znaleźć wykresy jak **rysunku 16b**, gdzie zaznaczona czerwona prosta bywa określana jako fizyczna granica możliwości tranzystorów MOSFET, a zaznaczone punkty oznaczają różne tranzystory.

Aby uzyskać tranzystor o małej rezystancji, trzeba powiększyć jego powierzchnię. Ale trzeba pamiętać, iż zwiększanie powierzchni nieuchronnie zwiększy też pojemność wejściową, a tym samym ładunek bramki potrzebny do przełączenia (oznaczany  $Q_G$  lub  $Q_g$ ). Tu trzeba podkreślić, że zaskakująco małe rezystancje  $R_{DSon}$  mają tranzystory o niskich dopuszczalnych napięciach  $U_{DS}$ , a ich pojemność wejściowa jest wysoka. I tak wspomniany IRF6718L2TRPbF (rysunek 12) ma  $U_{DSmax} = 25$  V, a pojemność wejściową  $C_{iss}$  typowo 8900 pF, natomiast IPT004N03L (rysunek 13) ma  $U_{DSmax} = 30$  V, a pojemność  $C_{iss}$  typowo 18000 pF, maksymalnie aż 24000 pF. Dla porównania stary i popularny IRF540 ( $U_{DSmax} = 100$  V,  $R_{DSon} = 55$  mW) ma pojemność wejściową typowo 890 pF.

A więc można byłoby zbudować wysokonapięciowe tranzystory o bardzo małej rezystancji, ale miałyby one niedopuszczalnie dużą pojemność wejściową i wymagany ładunek bramki ( $Q_g$ ), co przekreśliłoby możliwość ich szybkiego przełączania, a tranzystory wysokonapięciowe najczęściej tak właśnie pracują.

Dlatego dodatkową miarą, w omawianym zakresie (FOM – Figure Of Merit), pozwalającą porównać różne tranzystory, jest iloczyn rezystancji  $R_{DSon}$  i ładunku bramki  $Q_g$ . Dopiero rezystancja charakterystyczna oraz FOM pozwalają porównać i ocenić doskonałość tranzystorów poszczególnych producentów. W grę wchodzi też względy ekonomiczne – duża struktura to większy koszt i cena, co też ma istotne znaczenie w konkurencji rynkowej. Trzeba tu zachować równowagę.

A wracając do głównego wątku i mówiąc w dużym skrócie: podstawowy problem z wysokonapięciowymi MOSFET-ami polega na tym, że ich rezystancja  $R_{DSon}$  jest stosunkowo duża,

więc przepływ większych prądów powoduje znaczący spadek napięcia na otwartym tranzystorze. Okazuje się, że taki spadek napięcia  $I_D \times R_{DSon}$  jest większy od napięcia nasycenia  $U_{CEsat}$  w klasycznych bipolarnych tranzystorach złączowych (BJT). Na rysunku 16 pokazano, że ze wzrostem dopuszczalnego napięcia  $U_{DS}$  poważnie rośnie rezystancja charakterystyczna  $R_{DSon}$ . Zależność nie jest liniowa, tylko wykładnicza i łatwo się domyślić, że MOSFET-y o wysokim napięciu pracy nie będą mieć dobrych parametrów. Już tu widać powód, dla którego rzadkością są MOSFET-y o napięciu  $U_{DS}$  powyżej 600 V. Choć można spotkać typy o napięciu nawet 1500 V, na przykład w ofercie ST (<http://goo.gl/GX74T>), w której zapowiadane są też MOSFET-y 1700-woltowe (STFW3N170, STW3N170) – **rysunek 17**. Przy tak wysokim napięciu nie można się spodziewać rewelacji: jak widać rezystancja  $R_{DSon}$  jest duża, maksymalnie 12 W, a ciągły prąd drenu to 2,3 A przy nierealnie małej temperaturze obudowy 25°C i tylko 1,45 A przy realnej temperaturze obudowy 100°C.

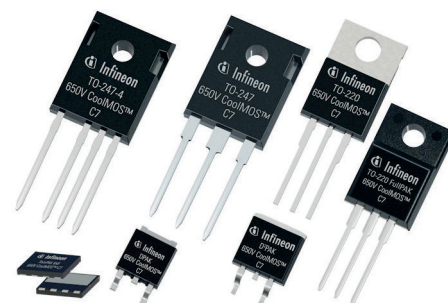
Właśnie omówione ograniczenia występujące w MOSFET-ach spowodowały poszukiwania różnych dróg poprawy sytuacji. Zanim przejdziemy do radykalnych rozwiązań, wspomnijmy teraz o dwóch takich drogach, mianowicie o tranzystorach zwanych SJ MOSFET oraz IGBT

### Super Junction MOSFET

W niektórych źródłach linia z wcześniejszego rysunku 16 nazywana jest nieprzekraczalną granicą dla tranzystorów MOSFET, wynikającą z własności krzemu. Nie jest to do końca prawdą, ponieważ tak rysowane linie zazwyczaj dotyczą tylko krzemowych tranzystorów MOSFET o powiedzmy, klasycznej budowie.

Okazuje się, że zmodyfikowanie wnętrza półprzewodnikowej struktury pozwala w istotny sposób poprawić właściwości MOSFET-ów wysokonapięciowych. Koncepcja nazywana *Super Junction* została opracowana w ostatnich latach XX wieku.

**Rysunek 18** pokazuje w uproszczeniu różnicę budowy wewnętrznej i uzyskiwa-



Fotografia 20.

nie zmniejszenie rezystancji. Kluczem jest wytworzenie w strukturze dość głębokich „kolumn”, co nie jest łatwe, a do czego obecnie wykorzystuje się głównie albo technikę wielokrotnej epitaksji (*multiple epitaxy*) lub technikę trawienia „głębokich rowów” (*deep trench*) – **rysunek 19**. Te „kolumny” nie pozwalają nośnikom „uciekać na boki” i zapewniają jednolity rozkład pola elektrycznego na długości kanału, przez co kanał może być krótszy i mieć mniejszą rezystancję. Te szczegóły wykraczają jednak poza ramy artykułu.

Tak ulepszone tranzystory, zwane najczęściej Super Junction MOSFET (SJ MOS) są dostępne na rynku. **Fotografia 20** pokazuje elementy rodziny Infineon CoolMOS, a **rysunek 21** to fragmenty karty katalogowej CoolMOS IPW65R019C7 o napięciu 650 V, prądzie 75 A (w impulsie 496 A), który ma rezystancję  $R_{DSon}$  tylko 0,019 W.

Tranzystory Super Junction MOSFET zapewniają znaczące polepszenie parametrów, ale nie radykalną poprawę. Inną drogą poprawy są tranzystory...

### IGBT

IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) to inaczej tranzystor bipolarny z izolowaną bramką. **Rysunek 22** pokazuje uproszczony schemat zastępczy i spotykane symbole tranzystora IGBT. Tranzystory takie zostały wynalezione w latach osiemdziesiątych, a na rynku stały się dostępne w latach dziewięćdziesiątych. Są to tranzystory dużej mocy, łączące zalety MOSFET-ów (łatwość sterowania) i klasycznych bipolarnych tranzystorów złączowych BJT



## 650V CoolMOS™ C7 Power Transistor IPW65R019C7

Parameter	Value	Unit
$V_{DS} @ T_{j,max}$	700	V
$R_{DS(on),max}$	19	mΩ
$Q_{g,typ}$	215	nC
$I_{D,pulse}$	496	A
$E_{oss}@400V}$	27	μJ
Body diode di/dt	70	A/μs

Rysunek 21.

Parameter		Values			Unit
		Min.	Typ.	Max.	
Continuous drain current <sup>1)</sup>	$I_D$	-	-	75	A
Pulsed drain current <sup>2)</sup>	$I_{D,pulse}$	-	-	496	A
MOSFET dv/dt ruggedness	dv/dt	-	-	100	V/ns
Gate source voltage (static)	$V_{GS}$	-20	-	20	V
Gate source voltage (dynamic)	$V_{GS}$	-30	-	30	V
Power dissipation	$P_{tot}$	-	-	446	W

(duży prąd i napięcie pracy, małe napięcie nasycenia). Są one sterowane napięciowo, tak jak MOSFET-y, więc wyeliminowana zostaje główna wada bipolarnych tranzystorów wysokonapięciowych – konieczność zapewnienia dużego prądu bazy. Jednocześnie pozostaje główna zaleta tranzystorów bipolarnych – wysokie napięcie pracy oraz stosunkowo małe napięcie nasycenia przy dużych prądach przewodzenia.

Rysunek 22 sugeruje, że IGBT to połączenie dwóch niezależnych tranzystorów. W rzeczywistości IGBT to pojedyncza struktura półprzewodnikowa (rysunek 23) o specyficznych cechach, a rysunek 22 jest mocno uproszczony, by pokazać kluczowe właściwości. Taka struktura półprzewodnikowa ma specyficzne cechy i ograniczenia. Zagadnienie jest skomplikowane. Pewne pojęcie o ograniczeniach daje rysunek 24, pokazujący dokładniejszy schemat zastępczy.

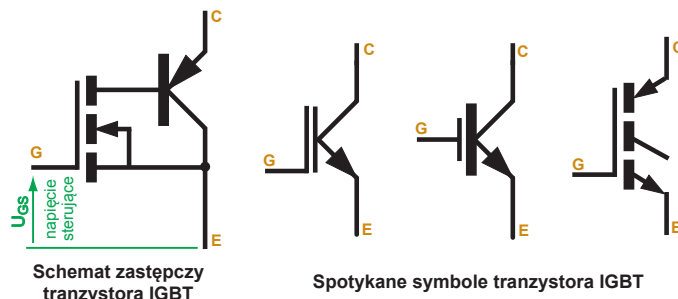
Dziś tranzystory IGBT znajdują szereg zastosowań tam, gdzie występują wysokie napięcia i płyną duże prądy. Wykorzystywane są m.in. do budowy falowników, spawarek inwertorowych, nagrzewnic indukcyjnych, przecinarek plazmowych, itd. Dla porządku warto nadmienić, że nie ma tranzystorów IGBT niskonapięciowych ani IGBT małej mocy.

Rysunek 25 pokazuje fragmenty karty katalogowej Renesas RJH6088BDPK w klasycznej obudowie TOP-3, o napięciu 600 V i prądzie 60 A i mocy strat ponad 260 W.

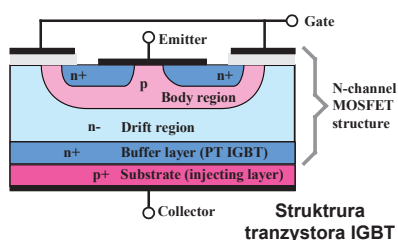
Istnieją też tranzystory IGBT o jeszcze wyższym napięciu pracy. Rysunek 26 pokazuje tranzystor IXYS IXEL40N400 o napięciu  $U_{CE} = 4000$  V i prądzie 40 A.

Oprócz tranzystorów IGBT w klasycznych obudowach, dostępne są też wersje o dużych prądach oraz moduły, zawierające dwa lub więcej tranzystorów IGBT. Fotografia 27 pokazuje tranzystor z trzema równoległe połączonymi strukturami, Infineon FZ3600R17KE3, o napięciu pracy 1700 V, prądzie maksymalnym 4800 A (w impulsie 7200 A), o mocy strat 18 kW (!), mający wymiary 190 mm×140 mm×38 mm. Dostępne są też potężniejsze moduły o napięciu  $U_{CE} = 6500$  V i prądach sięgających 1000 A.

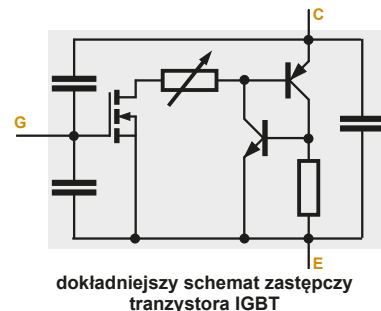
Rysunek 28 pokazuje tranzystor Mitsubishi CM750HG-130R 6500 V o prądzie ciągłym 750 A (w impulsie 1500 A). Jak wskazuje strona <http://goo.gl/KXzjil> cena takiego tranzystora przekracza 10000 złotych. Nie są to ceny dla hobbystów, ale też hobbyści nie mają potrzeb pracy z napięciami rzędu kilku kilowoltów i prądami rzędu kiloampera. Tranzystor IGBT o napięciu kilkuset woltów i prądzie kilkudziesięciu amperów można kupić w sklepie za kilkanaście, najwyżej kilkadziesiąt złotych. Na giełdach i aukcjach można kupić tranzystory i moduły IGBT z demontażu po bardzo atrakcyjnych cenach, więc nawet potężne IGBT są dziś także w za-



Rysunek 22.



Rysunek 23.



Rysunek 24.

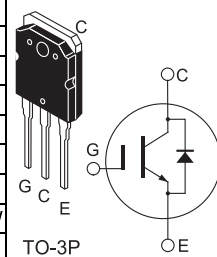
sięgu hobbystów – byle potrafili je sensownie wykorzystać.

Zamykając temat IGBT można by jeszcze wspomnieć o tranzystorach IEGT (Injection-Enhanced Gate Transistor), które mogą mieć jeszcze większe moce. Na razie nie są to popularne elementy. Rysunek 29 to fragmenty karty katalogowej wycofanego z oferty tranzystora IEGT Toshiba GT40Q321.

W zastosowaniach impulsowych kluczowe znaczenie mają parametry związane z szybkością włączania i wyłączania. Duża szybkość działania to podstawowy parametr w wielu zastosowaniach, a właśnie także w tranzystorach IGBT występują istotne ograniczenia częstotliwości przełączania do

## RJH6088BDPK RENESAS Silicon N Channel IGBT High Speed Power Switching

Item	Symbol	Rated	Unit
Collector to emitter voltage	$V_{CES}$	600	V
Gate to emitter voltage	$V_{GES}$	±30	V
Collector current	$I_C$	60	A
Collector peak current	$i_{c(peak)}$	120	A
Collector to emitter diode forward peak current	$I_{DF(peak)}$	120	A
Collector dissipation	$P_C$	268.8	W
Junction to case thermal impedance (IGBT)	$\theta_{j-c}$	0.465	°C/W
Junction temperature	$T_j$	150	°C

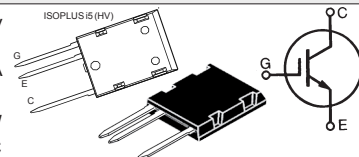


Rysunek 25.

## IXYS Advance Technical Data IXEL40N400

### Very High Voltage IGBT

$V_{CES} = 4000$ V	$V_{GES} = \pm 20$ V	$V_{CES} = 4000$ V
$I_{C90} = 40$ A	$I_{C90} T_C = 90^\circ C = 40$ A	$I_{C90} T_C = 90^\circ C = 40$ A
$V_{CE(sat)} = 4.0$ V	$I_{CM}$ Limited by $T_j = 170$ A	$I_{CM}$ Limited by $T_j = 170$ A
$t_{fi(typ)} = 450$ ns	$P_C T_C = 25^\circ C = 380$ W	$P_C T_C = 25^\circ C = 380$ W
	$T_j = -40 \dots +125^\circ C$	$T_j = -40 \dots +125^\circ C$



Rysunek 26.

Można z grubszą przyjąć, że w układach impulsowych przy napięciach do 400 V...600 V i prądach do 10 A wykorzystuje się MOSFET-y, a powyżej tych granic dominują tranzystory IGBT. Klasyczne tranzystory BJT w takich zastosowaniach straciły swoje znaczenie, głównie z uwagi na powolne wyłączanie i tzw. „ogon prądowy” (current tail), wynikający z konieczności usunięcia nośników z obszaru bazy.



Fotografia 27.



# CM750HG-130R

HIGH POWER SWITCHING USE INSULATED TYPE

4th-Version HVIGBT (High Voltage Insulated Gate Bipolar Transistor) Modules

Item	Item	Item	Unit
$V_{CES}$	Collector-emitter voltage	$T_j = +125^\circ\text{C}$	6500
		$T_j = +25^\circ\text{C}$	6300
		$T_j = -50^\circ\text{C}$	5700
$V_{GES}$	Gate-emitter voltage		$\pm 20$ V
$I_C$	Collector current	DC,	750 A
		Pulse	1500 A
$I_E$	Emitter current	DC,	750 A
		Pulse	1500 A
$P_{tot}$	Maximum power dissipation	$T_c = 25^\circ\text{C}$	10400 W
$T_j$	Junction temperature		$-50 \sim +150$ °C

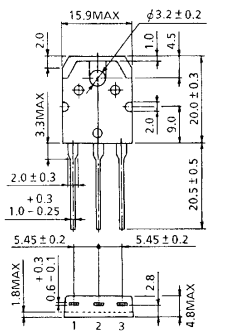


Rysunek 28.

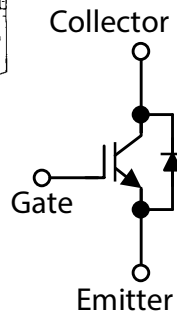
# TOSHIBA

TOSHIBA Injection Enhanced Gate Transistor Silicon N Channel IEGT

Characteristics	Rating	Unit
Collector-emitter voltage	$V_{CES}$ 1200	V
Gate-emitter voltage	$V_{GES}$ $\pm 25$	V
Continuous collector current	@ $T_c = 100^\circ\text{C}$	23 A
	@ $T_c = 25^\circ\text{C}$	42 A
Pulsed collector current	$I_{CP}$ 80	A
Diode forward current	DC	$I_F$
	Pulsed	$I_{FP}$
Collector power dissipation	@ $T_c = 100^\circ\text{C}$	68 W
	@ $T_c = 25^\circ\text{C}$	170 W
Junction temperature	$T_j$ 150	°C
Storage temperature range	$T_{stg}$ $-55$ to $150$	°C



# GT40Q321

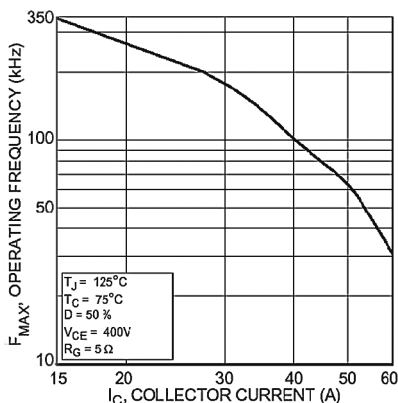


Rysunek 29.

kilkudziesięciu kiloherców, najwyżej kilkaset kiloherców. Maksymalna częstotliwość jest też związana z prądem pracy, ponieważ im większy prąd (więcej nośników), tym dłuższe przełączanie i mniejsza jest maksymalna częstotliwość pracy. Ilustruje to **rysunek 30**.

Można powiedzieć, że i klasyczne tranzystory bipolarne, MOSFET-y, a także tranzystory IGBT, osiągnęły wiek dojrzały i nie można się spodziewać radykalnej poprawy ich właściwości. Ograniczeniem są pewne fizyczne cechy nie tyle struktur, co właściwości materiału – krzemu.

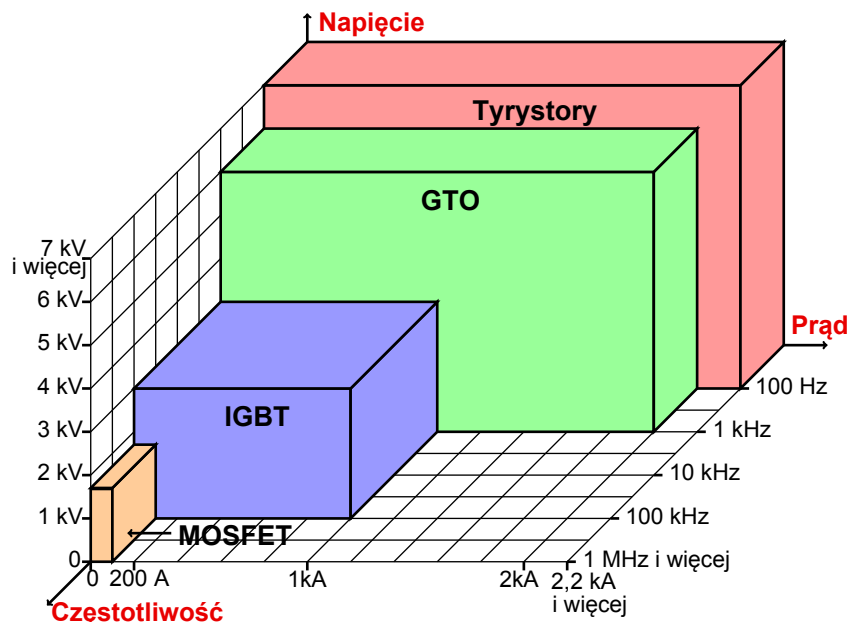
**Rysunek 31** pokazuje przybliżony zakres „możliwości” tranzystorów bipolarnych,



Rysunek 30.

MOSFET-ów oraz tyrystorów zwykłych i GTO. Tymczasem nieustannie rośnie zapotrzebowanie na coraz szybsze elementy przełączające.

Zanim przejdziemy do innych materiałów półprzewodnikowych, które z uwagi na lepsze właściwości na naszych oczach z-



Rysunek 31.

skują popularność w elementach przełączających dużej mocy, wspomnijmy o jeszcze innych materiałach i elementach. Kluczowym parametrem jest w nich bardzo wysoka częstotliwość pracy, wielokrotnie większa, niż w przełączających tranzystorach mocy BJT, MOSFET i IGBT. Wiele z nich można zaliczyć do elementów większej mocy.

## Tranzystory mikrofalowe

Niniejszy śródtytuł poświęcony jest tranzystorom bardzo wysokiej częstotliwości. Trzeba sprecyzować, że wcześniej mówiliśmy o tranzystorach przełączających, pracujących przy częstotliwościach od kilkudziesięciu kiloherców do pojedynczych megaherców. A teraz zajmiemy się elementami pracującym przy częstotliwościach tysięcy megaherców, powyżej 1 GHz. Nie są to elementy przełączające, tylko wzmacniacze sygnałów mikrofalowych, o częstotliwościach od pojedynczych gigaherców do setek gigaherców.

Warto też nadmienić, że od wielu lat do wzmacniania mikrofalowych sygnałów małej mocy wykorzystywano odcinek charakterystyki przejściowej o ujemnej rezystancji rozmaitych diod (diody waraktorowe, tunele, Gunna, IMPATT, BARITT itd.), natomiast wzmacniacze mikrofalowe dużej mocy realizowano na lampach, takich jak: klistrony, lampy z falą bieżącą (TWT) i magnetrony. Magnetrony o mocy wyjściowej rzędu 1 kW są powszechnie wykorzystywane w kuchniach mikrofalowych.

W związku z tematem artykułu, interesuje nas fakt, że dziś do wzmacniania sygnałów mikrofalowych coraz częściej wykorzystuje się tranzystory, także we wzmacniaczach o mocach do 100 W i przy częstotliwościach grubo ponad 1 GHz.

Dziś na rynku dostępne są rozmaite elementy mikrofalowe, w szczególności bipolar-



ne tranzystory Si, SiGe i GaAs HBT, a także unipolarne krzemowe LDMOSFET oraz MESFET i pHEMT z innych półprzewodników, głównie z GaAs. Do pracy w niższych zakresach mikrofalowych wykorzystuje się tanie tranzystory krzemowe BJT i krzemowe MOSFET-y. Dostępne są klasyczne tranzystory krzemowe BJT (NPN) przeznaczone do pracy przy częstotliwościach rzędu 3,5 GHz. Przykładem może być kilkunastowatowy ASI3005 (Advanced Semiconductor – <http://goo.gl/H3paGp>) czy znacznie potężniejszy PH3135-90S z M/A-COM Technology Solutions – rysunek 32. Oprócz bipolarnych, dostępne są też krzemowe MOSFET-y przeznaczone do pracy przy wysokich częstotliwościach, ale nie jako tranzystory przełączające, tylko jako wzmacniacze sygnałów radiowych. Nazywane są LDMOS (Lateral Diffusion MOSFET). Jest to specyficzna wersja bardzo popularnych MOSFET-ów N normalnie zamkniętych. Przykładem może być MRF6P24190HR6 Freescale o mocy 190 watów, pracujący w zakresie do 2,5 GHz – rysunek 33. Inny przykład to tranzystor NXP BLS7G3135L-350P o mocy 350 W – rysunek 34. Przy wyższych częstotliwościach dominują tranzystory z arsenku galu (GaAs) oraz krzemowo-germanowe (SiGe). Krzem ma liczne zalety, ale też wady. Dlatego też krzem nie wyeliminował całkowicie na pozór dużo gorszego germanu. German (Ge) niejako wrócił do gry, ale nie tyle w postaci elementów „czysto germanowych”, tylko w postaci tranzystorów heterozłączowych SiGe. Od wielu lat do budowy tranzystorów bardzo wysokiej częstotliwości wykorzystuje się też arsenek galu (GaAs), stosowany w elementach optoelektronicznych.

Pierwsze podczerwone diody laserowe na bazie GaAs zostały wykonane w roku 1962. A pierwszy eksperymentalny bipolarny tranzystor GaAs powstał w roku 1961. Około roku 1966 powstały pierwsze tranzystory polowe GaAs. Od wczesnych lat siedemdziesiątych zaczęły się pojawiać doniesienia o tranzystorowych wzmacniaczach GaAs. W roku 1976 przedstawiono pierwszy MMIC, czyli mikrofalowy układ scalony GaAs. Dopiero jednak w latach osiemdziesiątych tranzystory GaAs zaczęły się upowszechniać. W tych latach z arsenku galu wykonywano też bardzo szybkie mikroprocesory, które pracowały m.in. w słynnych swego czasu superkomputerach Cray. Na początku lat dziewięćdziesiątych przedstawiono wzmacniacz GaAs pracujący w mikrofalowym paśmie „W”, czyli przy częstotliwościach rzędu 100 GHz.

Niektóre właściwości GaAs są znacznie lepsze niż krzemu, między innymi mniejszy jest wpływ temperatury, mniejsze są szumy, a większa ruchliwość nośników pozwala zrealizować tranzystory o częstotliwościach pracy teoretycznie ponad 250 GHz.

Zanim przejdziemy do dalszych rozważań, trzeba rozszyfrować szereg skrótów.

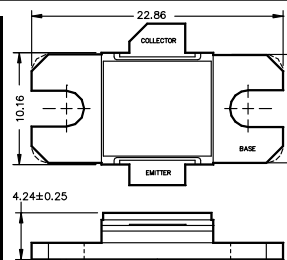
# PH3135-90S

## Radar Pulsed Power Transistor



90W, 3.1-3.5 GHz, 2µs Pulse, 10% Duty

Parameter		Rating	Units
Collector-Emitter Voltage	$V_{CES}$	65	V
Emitter-Base Voltage	$V_{EBO}$	3.0	V
Collector Current (Peak)	$I_C$	10.7	A
Power Dissipation @ +25°C	$P_{TOT}$	580	W
Storage Temperature	$T_{STG}$	-65 to +200	°C
Junction Temperature	$T_J$	200	°C



Rysunek 32.

### Freescale Semiconductor



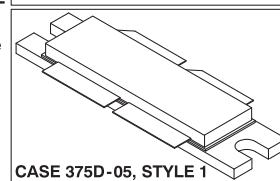
## RF Power Field Effect Transistor N-Channel Enhancement-Mode Lateral MOSFET

Designed primarily for large-signal output applications at 2450 MHz. Device is suitable for use in industrial, medical and scientific applications.

Typical CW Performance at 2450 MHz,  $V_{DD}=28$ Volts,  $I_{DQ}=1900$  mA,  $P_{out}=190$  Watts Power Gain — 13.2 dB Drain Efficiency — 46.2% Capable of Handling 10:1 VSWR, @ 28 Vdc, 2340 MHz, 190 Watts CW Output Power

### MRF6P24190HR6

2450 MHz, 190 W, 28 V CW  
LATERAL N-CHANNEL  
RF POWER MOSFET



Rysunek 33.

## BLS7G3135L-350P; BLS7G3135LS-350P

LDMOS S-band radar power transistor



350 W LDMOS power transistor intended for radar applications in the 3.1 GHz to 3.5 GHz

Table 1. Typical performance

Typical RF performance at  $T_{case} = 25^\circ\text{C}$ ;  $t_p = 300 \mu\text{s}$ ;  $\delta = 10\%$ ;  $I_{DQ} = 200$  mA; in a class-AB production test circuit.

Test signal	f (GHz)	$V_{DS}$ (V)	$P_L$ (W)	$G_p$ (dB)	$\eta_D$ (%)	$t_r$ (ns)	$t_f$ (ns)
pulsed RF	3.1	32	350	12	43	5	5
	3.3	32	350	12	43	5	5
	3.5	32	350	10	39	5	5

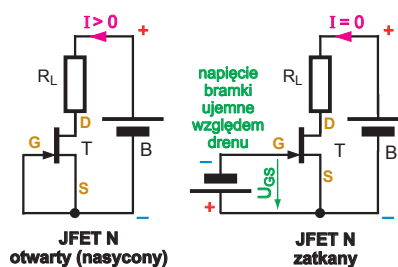
Rysunek 34.

Zacznijmy od HBT. Jest to skrót od *Heterojunction Bipolar Transistor* – heterozłączowy tranzystor bipolarny. Heterozłącze to złącze pn wykonane z różnych materiałów półprzewodnikowych, gdzie szerokość przerwy energetycznej po obu stronach złącza nie jest jednakowa. Pomysł nie jest nowy – patent na tego rodzaju tranzystory pochodzi z roku 1951. A pierwszy laboratoryjny model mikrofalowego tranzystora HBT przedstawiono w roku 1971. Tranzystory HBT można wykonać z różnych materiałów półprzewodnikowych.

SiGe HBT to tranzystory heterozłączowe krzemowo-germanowe. W dużym uproszczeniu można przyjąć, że są to klasyczne tranzystory bipolarne NPN, w których obszar bazy zbudowany jest ze stopu SiGe, dzięki czemu mogą one pracować przy wyższych

częstotliwościach. Dodatek germanu zmniejsza szerokość przerwy energetycznej w złączu kolektorowym. Dodatkowo przyspieszony (polem elektrycznym) transport nośników w bazie zdecydowanie polepsza właściwości częstotliwościowe.

Pomysł tranzystorów heterozłączowych sięga lat pięćdziesiątych, jednak różnica



Rysunek 35.

rozmiarów siatki krystalicznej krzemu i germanu długo, bo aż do początku lat dziewięćdziesiątych uniemożliwiła wytworzenie praktycznie użytecznych i trwałych elementów SiGe.

Ich najważniejszą zaletą jest właśnie szybkość – dużo większa, niż w krzemowych. Częstotliwość graniczna może sięgać ponad 200 GHz. Tranzystory SiGe znalazły zastosowanie tylko w układach wysokiej częstotliwości. Dostępne są zarówno poje-

dyncze tranzystory, jak też układy scalone SiGe. Są szeroko wykorzystywane w urządzeniach telefonii komórkowej. Trzeba jednak podkreślić, że generalnie są to elementy niskonapięciowe, małej mocy. Odwrotnie niż w przypadku IGBT, nie ma tranzystorów SiGe dużej mocy. Maksymalne napięcie  $U_{CE}$  często wynosi w nich tylko 2...5 V. Nie ma tranzystorów SiGe, które mogłyby pracować w szybkich układach przełączających przy dużym napięciu. Można znaleźć karty kata-

logowe tranzystorów SiGe o mocy rzędu 1 W (np. THN5601B czy DRF1401 z nieaktualnej już oferty koreańskiej firmy Tachyonics). Innym przykładem są nierekomendowane do nowych zastosowań 1-watowe Renesas NESG260234 (<http://goo.gl/qdv997>). Według informacji ze strony <http://goo.gl/3TlsxY> opracowano tak zwane wysokonapięciowe tranzystory SiGe, których napięcie maksymalne jest rzędu 15 V – są one przeznaczone do wzmacniaczy o mocach do kilkunastu watów, więc można byłoby je uznać za tranzystory mocy. Generalnie jednak tanie tranzystory SiGe na pewno nie wyparły innych tranzystorów ze wzmacniaczy mikrofalowych o większej mocy. Tam od lat stosowane są tranzystory wykonane z arsenku galu.

Opracowano tranzystory bipolarne GaAs, jednak nie są to „zwykłe” tranzystory BJT, tylko raczej HBT, czyli tranzystory heterozłączone, na przykład AlGaAs/GaAs, mogące pracować aż do 150 GHz. Od dawna z arsenku galu wykonuje się też tranzystory polowe (FET). Mogą to być klasyczne tranzystory FET ze złączem pn. Tu trzeba podkreślić, że klasyczne JFET-y to tranzystory normalnie otwarte (*depletion mode* – zubożane). Aby je zatkać, trzeba podać ujemne napięcie na bramkę, jak pokazuje rysunek 35. Tak też jest w przypadku FET-ów GaAs. Przykładem może być Toshiba TIM5359-80SL (fotografia 36) o mocy strat 250 W, napięciu do 15 V, prądzie nasycenia  $I_{DS}$  (przy  $U_{GS}=0$  V) typowo 38 A i napięciu odcięcia  $U_{GS}$  w zakresie -1... -3 V.

Klasyczne złącze półprzewodnikowe, czyli złącze pn, składa się z dwóch obszarów różnie domieszkowanego półprzewodnika. Tak zbudowane są „zwykłe” diody i takie złącza pracują w tranzystorach JFET (bramka-źródło). Natomiast w diodach Schottky’ego wykorzystuje się złącze metal – półprzewodnik (Metal – Semiconductor). I takie złącze może być wykorzystane w tranzystorze polowym. Zamiast klasycznego JFET-a, otrzymujemy wtedy MESFET.

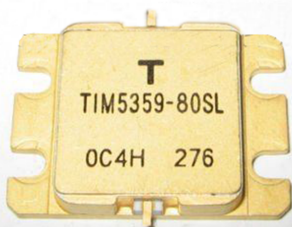
Opracowano MESFET-y z GaAs, ale zwykle są to tranzystory małej mocy, mało popularne i trudno dostępne. (jedną z nielicznych kart katalogowych można znaleźć pod adresem <http://goo.gl/wyOwjC>). Popularną odmianą i rozwinięciem tranzystora MESFET jest HEMT – *High Electron Mobility Transistor*. Inna mniej strasząca nazwa to HFET (*Heterostructure FET*) oraz MODFET (*Modulation-Doped FET*). HEMT, podobnie jak MESFET, zawiera w swej strukturze złącze Schottky’ego, a ponadto inne warstwy.

Pierwszy tranzystor HEMT zadenastrowano w roku 1979. Wiązało się to z badaniami nad strukturami, w których występował tak zwany dwuwymiarowy gaz elektronowy (*2-dimensional electron gas* – w skrócie 2DEG). Obecność tych specyficznych struktur z „bardzo szybkim” gazem elektronowym

# TOSHIBA

## MICROWAVE POWER GaAs FET

### TIM5359-80SL



CHARACTERISTICS	CONDITIONS	MIN.	TYP.	MAX.	
Output Power at 1dB Gain Compression Point	VDS= 10V IDSset=10.0A f = 5.3 to 5.9GHz	dBm	48.0	49.0	—
Power Gain at 1dB Gain Compression Point		dB	6.5	7.5	—
Drain Current		A	—	18.0	20.0
Gain Flatness		dB	—	—	±0.8
Power Added Efficiency		%	—	36	—
3rd Order Intermodulation Distortion	Two-Tone Test Po=42.0dBm	dBc	-25	-30	—
Drain Current	Single Carrier Level	A	—	—	16.0
Channel Temperature Rise		°C	—	—	100

Rysunek 36.

## Freescale Semiconductor

### Gallium Arsenide PHEMT

#### RF Power Field Effect Transistor

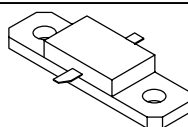
Rating	Symbol	Value	Unit
Drain-Source Voltage	$V_{DSS}$	15	Vdc
Gate-Source Voltage	$V_{GS}$	-5	Vdc
RF Input Power	$P_{in}$	33	dBm
Channel Temperature	$T_{ch}$	175	°C

## MRFG35010AR1

### 3.5 GHz, 10 W, 12 V

#### POWER FET

#### GaAs PHEMT



CASE 360D-02, STYLE 1  
NI-360HF

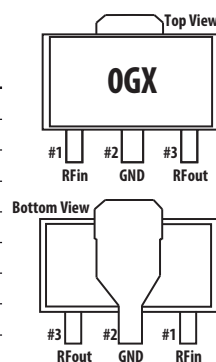
Rysunek 37.

## ATF-50189

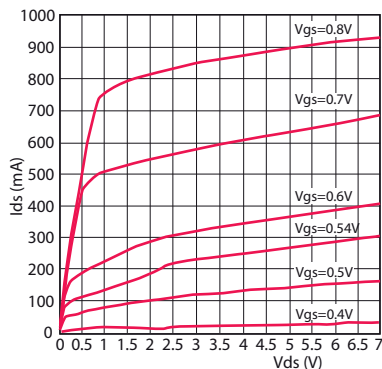
Enhancement Mode Pseudomorphic HEMT

0.4 - 3.5 GHz in SOT 89 Package

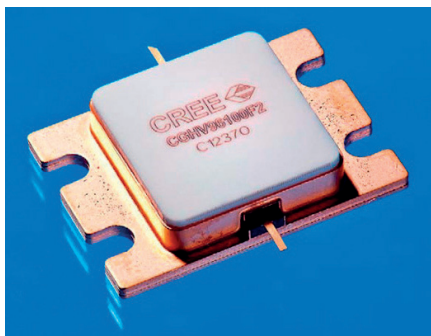
Symbol	Parameter	Units	Max.
$V_{DS}$	Drain-Source Voltage	V	7
$V_{GS}$	Gate-Source Voltage	V	-5 to 0.8
$V_{GD}$	Gate Drain Voltage	V	-5 to 1
$I_{DS}$	Drain Current	A	1
$I_{GS}$	Gate Current	mA	12
$P_{diss}$	Total Power Dissipation	W	2.25
$P_{in}$	RF Input Power	dBm	30
$T_{CH}$	Channel Temperature	°C	150
$T_{STG}$	Storage Temperature	°C	-65 to 150



Rysunek 38.



Rysunek 39.



Fotografia 41.

pozwala poważnie zwiększyć szybkość tranzystorów

Najpierw były to tranzystory z GaAs/AlGaAs (<http://goo.gl/dxXDI8>, <http://goo.gl/zYYU52>). Potem w kanale dodano warstwę InGaAs. Powstały odmiany, zwane pHEMT (pseudomorphic HEMT) zawierające dodatkowe warstwy, przyspieszające ruch elektronów. W efekcie pHEMT teoretycznie mogą pracować przy częstotliwościach rzędu 100 GHz.

Przykładem tranzystora GaAs pHEMT mocy może być 10-watowy Freescale MRF-G35010AR1 o napięciu maksymalnym 15 V i typowym prądzie nasycenia 2,9 A – **rysunek 37**. Inny przykład tranzystora mocy na zakres do 12 GHz to TriQuint TGF2021-12 (<http://goo.gl/fpsWUd>). Do tej pory dominują tranzystory HEMT normalnie otwarte (depletion mode), jak klasyczne JFET-y. Jednak pojawiają się wersje normalnie zatłkane (enhancement mode). Przykładem GaAs E-pHEMT (Enhancement Mode Pseudomorphic HEMT) jest AVAGO ATF-50189 – **rysunek 38**. Jest to w zasadzie JFET ze złączem Schottky’ego, a zachowuje się podobnie jak klasyczny MOSFET (o napięciu progowym  $U_{GSth}$  typowo 0,38 V), o czym świadczą choćby charakterystyki wyjściowe, pokazane na **rysunku 39**.

W zakresie bardzo wysokich częstotliwości wykorzystuje się też inne materiały półprzewodnikowe, w szczególności pierwiastki z grup trzeciej i piątej. I tak bipolarne tranzystory heterozłączowe (HBT) można zrealizować z wykorzystaniem m.in. następujących zestawów półprzewodników: InGaAs/InP, InGaP/GaAs, AlInAs/InGaAs i InP/InGaAs. Podobnie związki glinu (Al), galu (Ga), indu

## Heterojunction Bipolar Transistor Technology (InGaP HBT) Broadband High Linearity Amplifier



Rating	Symbol	Value	Unit
Supply Voltage	$V_{DC}$	6	V
Supply Current	$I_{DC}$	1400	mA
RF Input Power	$P_{in}$	28	dBm
Storage Temperature Range	$T_{stg}$	-65 to +150	°C
Junction Temperature	$T_J$	150	°C

**MMG3006NT1**  
400-2400 MHz, 17.5 dB  
33 dBm InGaP HBT

CASE 1898-01  
QFN 4x4  
PLASTIC

Rysunek 40.

## CGHV96100F2 100 W, 7.9 - 9.6 GHz, 50-ohm, I/O Matched GaN HEMT



Parameter	Symbol	Rating	Units
Drain-source Voltage	$V_{DSS}$	100	Volts
Gate-source Voltage	$V_{GS}$	-10, +2	Volts
Power Dissipation	$P_{DISS}$		
Storage Temperature	$T_{stg}$	-65, +150	°C
Operating Junction Temperature	$T_J$	225	°C
Maximum Drain Current <sup>1</sup>	$I_{Dmax}$	12	Amps
Maximum Forward Gate Current	$I_{GMmax}$	28.8	mA
Soldering Temperature	$T_s$	245	°C
Screw Torque	$\tau$	40	in-oz
Thermal Resistance	$R_{\theta jc}$	0.63	°C/W
Case Operating Temperature	$T_c$	-40, +150	°C

### Electrical Characteristics

Characteristics	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Units
Gate Threshold Voltage	$V_{GS(th)}$	-3.8	-3.0	-2.3	V
Gate Quiescent Voltage	$V_{GS(Q)}$	-	-2.7	-	V
Saturated Drain Current <sup>2</sup>	$I_{DS}$	21.0	26.0	-	A
Drain-Source Breakdown Voltage	$V_{BD}$	100	-	-	V
Small Signal Gain	$S_{21}$	10.5	12.4	-	dB
Power Output <sup>3,4</sup>	$P_{out}$	100	131.0	-	W
Power Added Efficiency <sup>3,4</sup>	PAE	30	45	-	%
Power Gain <sup>3,4</sup>	$P_G$	-	10.2	-	dB

Rysunek 42.

(In) z azotem (N), fosforem (P) i arsenem (As) są wykorzystywane do realizacji różnych odmian tranzystorów polowych FET.

I tak na przykład fosforek indu (InP) pozwala wytworzyć tranzystory i wzmacniacze na zakres częstotliwości ponad 500 GHz, jednak na razie mamy tylko wyniki laboratoryjnych eksperymentów, a nie rynkowe produkty. Na rynku dostępne są natomiast wzmacniacze zbudowane z InGaP. Przykładem może być Freescale MMG3006NT1 – **rysunek 40**.

Jednak aktualnie najdynamiczniej rozwija się rynek wzmacniaczy wykonanych z azotku galu (GaN). Tranzystory HEMT GaN pojawiły się na rynku w latach 2004–2005, a prace nad nimi prowadzono już od wczesnych lat dziewięćdziesiątych. Dużym krokiem naprzód było opracowanie technologii wytwarzania warstw GaN na podłożu SiC (węglika krzemu)

Na **fotografii 41** pokazany jest tranzystor mocy produkcji słynnej firmy Cree CGHV96100F2 o wymiarach około 24 mm×17,5 mm×5 mm. **Rysunek 42** to fragmenty karty katalogowej. Jak widać, moc wynosi ponad 100 W, napięcie maksymalne 100 V. Jest to **GaN HEMT** (na podłożu SiC), a więc w sumie tranzystor polowy FET normalnie otwarty. Zakres dopuszczalnych napięć bramki wynosi -10...+2 V. Jak z tego widać, nawet przy napięciu +2 V złącze bramkowe jeszcze nie przewodzi. Prąd nasycenia maksymalnie otwartego tranzystora

$I_{DS}$  typowo wynoszący 26 A, określany jest właśnie przy napięciu  $U_{GS} = +2$  V.

**Rysunek 43** to fragmenty karty katalogowej Microsemi 0405SC-2200M. Jest to **Silicon Carbide SIT**, czyli odmiana tranzystora FET zwana SIT (Static Induction Transistor). Tranzystor ten ma napięcie pracy do 250 V, moc w impulsie ponad 2 kW, a struktura z węglika krzemu może pracować w temperaturze nawet +250°C.

W niższych zakresach mikrofalowych, do kilku gigaherców, w miarę możliwości wykorzystuje się tranzystory Si, SiGe, LD-MOS z uwagi na ich cenę, dużo niższą niż elementów z innych półprzewodników, głównie GaAs, a obecnie coraz częściej GaN, które z kolei są niezastąpione przy wyższych częstotliwościach, od kilku do ponad 200 GHz.

Pojedyncze tranzystory GaAs mogą pracować przy mocach do około 5 W, co jest całkowicie i z zapasem wystarczające do telefonów komórkowych. Przy połączeniu równoległym uzyskiwane moce są dużo większe. Przy wyższych mocach trzeba zastosować tranzystory krzemowe, a przy wyższych częstotliwościach dużo droższe tranzystory GaN. Jak na razie, rynek tranzystorów GaN jest kilkadziesiąt razy mniejszy od rynku elementów GaAs, jednak dynamicznie rośnie, a ceny spadają.

Oprócz pojedynczych tranzystorów bardzo wysokiej częstotliwości, dostępne są też scalone wzmacniacze mikrofalowe (MMIC),

wykonywane z różnych wymienionych materiałów, zwłaszcza z krzemu i z GaAs i innych, w rozmaitych kombinacjach.

Wszystkie te szybkie elementy znajdują zastosowanie głównie w telefonii komórkowej, która obejmuje zakres do 2,5 GHz,

w szybkich sieciach komputerowych, odbiornikach satelitarnych (10...12 GHz), w różnych urządzeniach radarowych oraz w rozmaitych urządzeniach wojskowych. Warto też dodać, że najnowsze elementy tuż po opracowaniu i wdrożeniu do produkcji,

niestety zawsze najpierw trafiają do sprzętu wojskowego, a dopiero za jakiś czas stają się dostępne do innych zastosowań.

Rozważania o tranzystorach wykonanych z półprzewodników innych niż krzem doprowadziły nas do najbardziej nas interesujących materiałów, mianowicie węgla krzemu (SiC) i azotku galu (GaN) oraz do najnowszych tranzystorów przełączających.



### 0405SC-2200M

2200Watts, 125 Volts, Class AB

406 to 450 MHz Silicon Carbide SIT

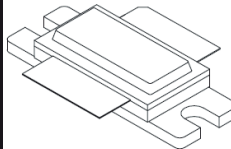
#### PRELIMINARY SPECIFICATION

The 0405SC-2200M is a Common Gate N-Channel DEPLETION MODE Class AB SILICON CARBIDE (SiC) STATIC INDUCTION TRANSISTOR (SIT) capable of providing 2200 Watts of RF Peak power from 406 to 450 MHz. The transistor is designed for use in High Power Amplifiers supporting applications such as UHF Weather Radar and Long Range Tracking Radar. The device is an addition to the series of High Power Silicon Carbide Transistors from Microsemi RF IS.

#### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Drain-Source ( $V_{DS}$ )	250V
Gate-Source ( $V_{GS}$ )	-1V
Storage Temperature	-65 to +150°C
Operating Junction Temperature	+250°C

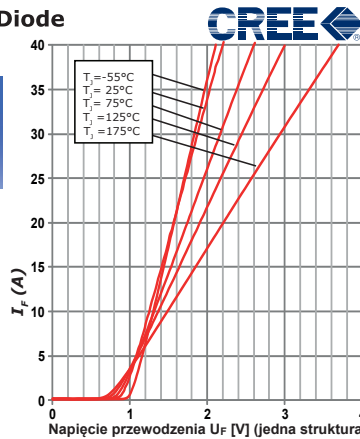
#### CASE OUTLINE 55TW-FET (Common Gate)



Rysunek 43.

### C4D40120D-Silicon Carbide Schottky Diode

Z-REC™ RECTIFIER



Parameter	Typ.	Max.	Unit	Test Conditions
$V_F$ Forward Voltage	1.5 2.2	1.8 3	V	$I_F = 20\text{ A } T_j = 25^\circ\text{C}$ $I_F = 20\text{ A } T_j = 175^\circ\text{C}$
$I_R$ Reverse Current	35 65	200 400	$\mu\text{A}$	$V_R = 1200\text{ V } T_j = 25^\circ\text{C}$ $V_R = 1200\text{ V } T_j = 175^\circ\text{C}$
$Q_c$ Total Capacitive Charge	130		nC	$V_R = 1200\text{ V}, I_F = 20\text{ A}$ $di/dt = 200\text{ A}/\mu\text{s}$ $T_j = 25^\circ\text{C}$
C Total Capacitance	1500 93 67		pF	$V_R = 0\text{ V}, T_j = 25^\circ\text{C}, f = 1\text{ MHz}$ $V_R = 400\text{ V}, T_j = 25^\circ\text{C}, f = 1\text{ MHz}$ $V_R = 800\text{ V}, T_j = 25^\circ\text{C}, f = 1\text{ MHz}$

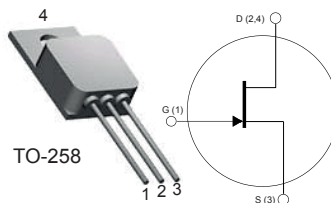
Rysunek 44.

### micross ADVANCE INFORMATION SiC JFET components ASJD1200R085

#### Normally-ON Trench Silicon Carbide Power JFET

Product Summary		
$BV_{DS}$	1200	V
$RDS_{(ON)max}$	0.085	$\Omega$
$E_{TS,typ}$	TBD	$\mu\text{J}$

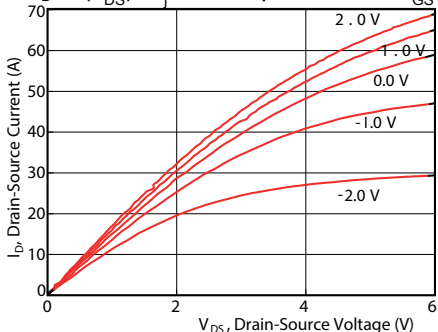
MAXIMUM RATINGS	Symbol	Conditions	Value	Unit
Continuous Drain Current	$I_{D,Tj=100}$	$T_j = 100^\circ\text{C}$	52	A
		$T_j = 150^\circ\text{C}$	43	
Pulsed Drain Current <sup>(1)</sup>	$I_{DM}$	$T_c = 25^\circ\text{C}$	75	A
Short Circuit Withstand Time	$t_{SC}$	$V_{DS} < 800\text{V}, T_c < 125^\circ\text{C}$	50	$\mu\text{s}$
Power Dissipation	$P_D$	$T_c = 25^\circ\text{C}$	114	W
Gate-Source Voltage	$V_{GS}$	AC <sup>(2)</sup>	-15 to +15	V
Operating and Storage Temperature	$T_j, T_{j,sg}$		-55 to +200*	$^\circ\text{C}$



Rysunek 45.

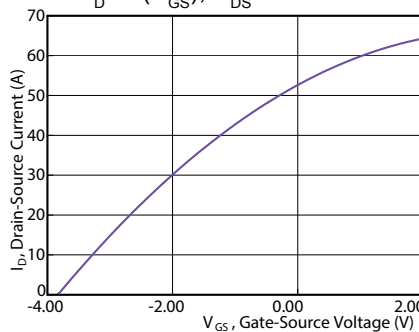
#### Typowe charakterystyki wyjściowe

$I_D = f(V_{DS}); T_j = 25^\circ\text{C};$  parameter:  $V_{GS}$



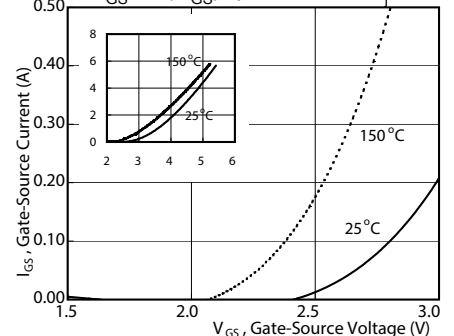
#### Typ. charakterystyka przejściowa

$I_D = f(V_{GS}); V_{DS} = 5\text{ V}$



#### Dodatni prąd bramki

$I_{GS} = f(V_{GS});$  parameter:  $T_j$



Rysunek 46.

#### Wide Bandgap

W poprzednim śródtytułe gładko i bez uzasadnienia przeszliśmy od krzemu do innych półprzewodników. Ale rozważaliśmy tylko właściwości częstotliwościowe, kluczowe w tranzystorach mikrofalowych. Na naszych oczach nabierają znaczenia dwa materiały półprzewodnikowe, mianowicie węgiel krzemu (SiC) oraz azotek galu (GaN). Zarówno SiC, jak i GaN były od lat stosunkowo dobrze znanymi materiałami półprzewodnikowymi. Jednak wcześniej ich praktyczne wykorzystanie w elektronice ograniczało się do (niebieskich) diod świecących.

Naukowcy i technolodzy stopniowo pokonywali kolejne przeszkody, udoskonalali metody produkcji, co umożliwiło wykorzystanie SiC i GaN do produkcji diod i przełączających tranzystorów mocy.

Wcześniej mówiliśmy, że materiały takie jak GaAs czy GaN mają większą ruchliwość nośników prądu. W przypadku nowych elementów wykonywanych z SiGe i GaN nie ma to większego znaczenia, natomiast decydujące są dwie inne cechy. Mianowicie są to półprzewodniki o większej szerokości pasma zabronionego. Przypomnijmy, że w germanie szerokość pasma zabronionego wynosi 0,7 eV, w krzemie 1,1 eV, w GaAs – 1,4 eV, natomiast dla SiC i GaN wynosi ponad 3 eV, czyli jest dużo szersza. Stąd nazwa **WB – WideBand** Semiconductors.

Dokładniejsze dane zawiera **tabela 1**. Zielonym kolorem wyróżnione są dwa najbardziej nas interesujące materiały: azotek galu i jedna z mnóstwa polimorficznych odmian węgla krzemu, oznaczana 4H SiC.

Szerokie pasmo zabronione oznacza między innymi, że znacznie mniejszy jest wpływ temperatury, a więc struktury SiC



Fotografia 47.

i GaN mogą prawidłowo pracować w temperaturach dużo wyższych niż krzem, o germanie nie wspominając.

O ile dzisiejsze krzemowe elementy półprzewodnikowe w większości mają dopuszczalną temperaturę złącza +150°C, a tylko nieliczne +175°C...+200°C, o tyle struktury SiC i GaN mogłyby pracować w temperaturze do 350°C, a nawet +700 stopni. Jest to ważna kwestia, łagodząca problemy chłodzenia i sprzyjająca miniaturyzacji. Jednak przeglądając karty katalogowe współczesnych elementów SiC i GaN można zauważyć, że większość ma dopuszczalną temperaturę złącza lub obudowy niewiele wyższą niż +150°C. Przyczyną wydają się nie tyle parametry i niezawodność podstawowych struktur półprzewodnikowych, tylko całości składającej się ze złożonych struktur oraz komponentów obudowy o różnych współczynnikach rozszerzalności cieplnej. Należy się jednak spodziewać postępu także i w tym zakresie.

Co bardzo ważne, SiC i GaN mają też bardzo duże dopuszczalne krytyczne natężenie pola elektrycznego, a to przy „standardowych” rozmiarach struktur pozwala zrealizować elementy wysokonapięciowe. Dlatego nowe tranzystory przełączające SiC i GaN zwykle mają napięcia dopuszczalne 600...1200 V. Zapoznajmy się z takimi elementami. Najpierw weźmy na warsztat SiC.

**SiC**

Początki ery półprzewodnikowej zazwyczaj kojarzą się z germanem. Natomiast węgiel krzemu (SiC) wielu Czytelnikom niesłusznie wyda się nowym, egzotycznym materiałem. Nie jest w żadnym razie materiałem wyjątkowym i egzotycznym, choć w ziemskiej przyrodzie występuje niezmiernie rzadko, jako minerał *moissanit*, znajdujący praktycznie tylko w meteorytach. Węgiel krzemu jest od roku 1893 otrzymywany sztucznie i znany jest pod nazwą *karborund*. Z uwagi na bardzo dużą twardość i odporność, wykorzystywany jest powszechnie i od wielu lat do produkcji różnych materiałów ściernych. Wbrew pozorom, węgiel krzemu od wielu lat znany jest też w elektronice. W pierwszych odbiornikach kryształkowych wykorzystywano detektory z różnymi minerałami, w tym z kryształami karborundu, czyli węgla krzemu. Już w roku 1907 H. J. Round, asystent słynnego Guglielmo

Tabela 1.

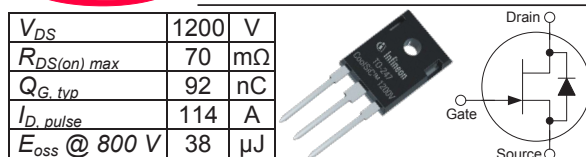
Semiconductor material	Bandgap (eV)	Electron Mobility $\mu_n$ (cm <sup>2</sup> /Vs)	Hole Mobility $\mu_h$ (cm <sup>2</sup> /Vs)	Critical Break-down field $E_c$ (V/cm)	Relative dielectric constant $\epsilon$	Thermal conductivity $\sigma_{th}$ (W/m·K)	TFOM $=\sigma_{th}/\epsilon$
InAs	0,354	44,000	500	40,000	14,5	26,5	0,14
InP	1,344	5,400	200	500,000	14	68	0,44
GaAs	1,424	8,500	400	400,000	13,1	46	0,32
GaN	3,44	900	10	3,000,000	9	110	1,1
Ge	0,661	3,900	1,900	100,000	16	58	0,33
Si	1,12	1,400	450	300,000	11,7	130	1
GaP	2,26	250	150	1,000,000	11,1	110	0,89
SiC(6H, $\alpha$ )	2,86	330~400	75	2,400,000	9,66	700	6,52
SiC(4H, $\alpha$ )	3,25	700	80	3,180,000	9,7	700	6,5

Marconiego, krótko poinformował na łamach *Electrical World*, że zaobserwował żółtawe światło w detektorze kryształkowym z karborundem, pobudzonym napięciem 10 V. Obszerniejsze badania świecących detektorów kryształkowych z kryształem karborundu przeprowadził w latach dwudziestych XX wieku, radziecki naukowiec Oleg Władimirowicz Łosiew (Олег Владимирович Лосев). To on był więc pionierem w badaniach węgla krzemu, jednak zmarł z głodu w roku 1942 podczas oblężenia Leningradu, a jego prace zostały na kilkadziesiąt lat zapomniane.

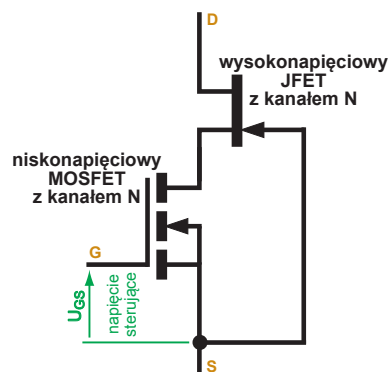
W latach siedemdziesiątych w ZSRR produkowano żółte diody LED na bazie SiC. W latach osiemdziesiątych i na początku dziewięćdziesiątych w wielu krajach świata próbowano zrealizować niebieskie diody LED o sensownych parametrach właśnie z węgla krzemu, dopóki nie pojawiły się (1993) i nie zdominowały rynku dużo wydajniejsze niebieskie diody i lasery z azotku galu (GaN), w czym ogromny udział miał Shuji Nakamura z niewielkiej firmy Nichia. Wydajność świetlna diod LED z GaN jest wielokrotnie lepsza od diod SiC głównie z uwagi na prostą przerwę energetyczną GaN. Jednak SiC nadal ma związek z diodami LED i z GaN, ponieważ bardzo często tanie kryształy SiC są podłożem, na którym wykonywane są struktury GaN.

Zanim w roku 2008 pojawił się pierwszy przełączający tranzystor SiC (JFET), a potem MOSFET SiC (2011), wcześniej wypuszczono na rynek diody SiC. Łatwo się domyślić, że diody z materiału o dużo większej szerokości przerwy energetycznej będą mieć dużo

**Infineon IJW120R070T1 1200V Silicon Carbide JFET**

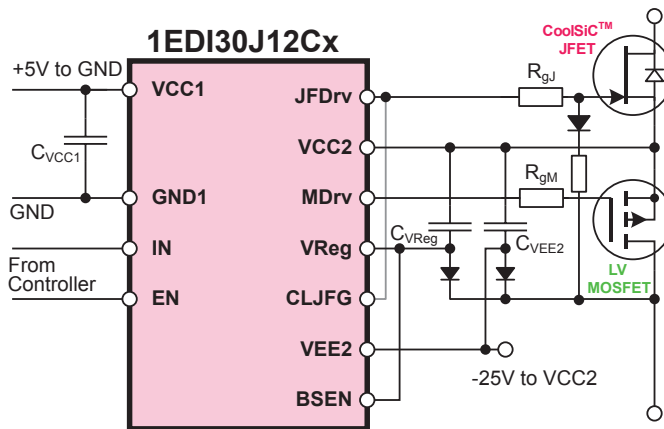


Rysunek 48.



Rysunek 49.

większe napięcie przewodzenia, co oczywiście jest istotną wadą, bo powiększa straty mocy. Owszem, dlatego też oferowane na rynku diody SiC nie są „zwykłymi” diodami pn, tylko diodami Schottky-ego ze złączem metal-półprzewodnik. W związku z wykorzystaniem nośników większościowych dioda jest bardzo szybka, nie ma problemu akumulacji ładunku (*reverse recovery charge*), pojemność diody



Rysunek 50.

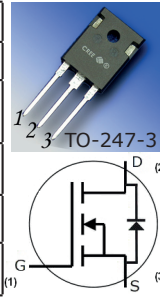


**Silicon Carbide Power MOSFET**  
**Z-FET™ MOSFET**  
**N-Channel Enhancement Mode**

**C2M0160120D**

$V_{DS}$  1200 V  
 $I_{D(MAX)}$  @ 25 °C 17.7 A  
 $R_{DS(on)}$  160 mΩ

$I_{DS(DC)}$	Continuous Drain Current	17.7	A	$V_{GS}@20 V, T_C = 25 °C$
		11	A	$V_{GS}@20 V, T_C = 100 °C$
$I_{DS(pulse)}$	Pulsed Drain Current	45	A	Pulse width $t_p=50\mu s$ duty limited by $T_{Jmax}, T_C=25 °C$
$V_{GS}$	Gate Source Voltage	-10/+25	V	
$P_{tot}$	Power Dissipation	125	W	$T_C=25 °C$
$T_J, T_{stg}$	Operating Junction and Storage Temperature	-55 to +150	°C	



Rysunek 51.

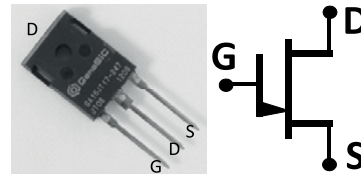


**GA16JT17-247**

**Normally – OFF Silicon Carbide Junction Transistor**

Drain – Source Voltage	$V_{DS}$ 1700 V
Continuous Drain Current	$I_D$ 16 A
Gate Peak Current	$I_{GM}$ 5 A
Reverse Gate – Source Voltage	$V_{SG}$ 30 V
Reverse Drain – Source Voltage	$V_{SD}$ 40 V
Power Dissipation	$P_{tot}$ 234 W

$V_{DS(ON)} = 1.7V$   
 $V_{DS} = 1700V$   
 $I_D = 16A$   
 $R_{DS(ON)} = 110m\Omega$



			min.	typ.	max.	
Drain – Source On Voltage	$V_{DS(ON)}$	$I_D = 16 A, I_G = 1000 mA, T_J = 25 °C$		1.7	2.0	V
		$I_D = 16 A, I_G = 1000 mA, T_J = 125 °C$		3.3	4.0	
		$I_D = 16 A, I_G = 1000 mA, T_J = 175 °C$		4.5	5.5	
Drain – Source On Resistance	$R_{DS(ON)}$	$I_D = 16 A, I_G = 1000 mA, T_J = 25 °C$		110		mΩ
		$I_D = 16 A, I_G = 1000 mA, T_J = 125 °C$		210		
		$I_D = 16 A, I_G = 1000 mA, T_J = 175 °C$		280		
Gate Forward Voltage	$V_{GS(FWD)}$	$I_G = 500 mA, T_J = 25 °C$		3.0		V
		$I_G = 500 mA, T_J = 175 °C$		2.7		
DC Current Gain	$\beta$	$V_{DS} = 5 V, I_D = 16 A, T_J = 25 °C$	50	65		
		$V_{DS} = 5 V, I_D = 16 A, T_J = 175 °C$		45		

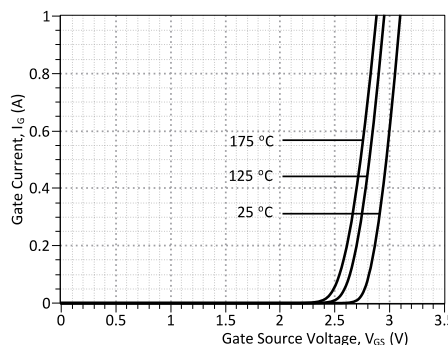
Rysunek 52.

jest mała. O ile krzemowe diody Schottky-ego mają dopuszczalne napięcia wsteczne do 100 V, o tyle diody SiC mają napięcia wsteczne nawet ponad 1000 V. Co ciekawe, napięcie przewodzenia nie jest dużo wyższe, niż w klasycznych krzemowych diodach wysokonapięciowych. Przykładem może być podwójna dioda Cree C4D40120D o napięciu wstecznym 1200 V, prądzie ciągłym  $2 \times 27 A$  (w impulsie do około  $2 \times 100 A$ ). Jak pokazuje rysunek 44, typowe napięcie przewodzenia przy prądzie 20 A wynosi 1,5 V w temperaturze +25°C i 2,2 V w maksymalnej temperaturze +175°C (współczynnik ciepły jest dodatni).

Pierwsze tranzystory SiC nie znalazły bezpośredniego zastosowania w układach przełączających z uwagi na kłopoty ze sterowaniem – były to tranzystory JFET normalnie otwarte. Aktualnym przykładem tego typu tranzystora jest Micross ASJD1200R085 – rysunek 45. Ma dopuszczalne napięcie pracy 1200 V, prąd drena do 50 A, a pojemność wejściowa jest mała, poniżej 1 nF. Napięcie odcięcia bramki wynosi, zależnie od egzemplarza, -6 V...-4 V, a z uwagi na znaczne napięcie przewodzenia złącza bramkowego, element może też pracować przy

niedużym dodatnim napięciu bramki, jak pokazuje rysunek 46. Więcej szczegółów na temat tego elementu można znaleźć w karcie katalogowej na stronie <http://goo.gl/DBtCMU>. W ofercie Infineon można znaleźć m.in. tranzystor IJW120R070T1 z rodziny CoolSiC (fotografia 47), który też jest normalnie otwartym JFET-em SiC. Rysunek 48 to fragmenty karty katalogowej.

Do układów impulsowych potrzebne są tranzystory normalnie zamknięte, sterowane jak klasyczne MOSFET-y. Z uwagi na niewątpliwe zalety SiC, najpierw zaproponowano



Rysunek 53.

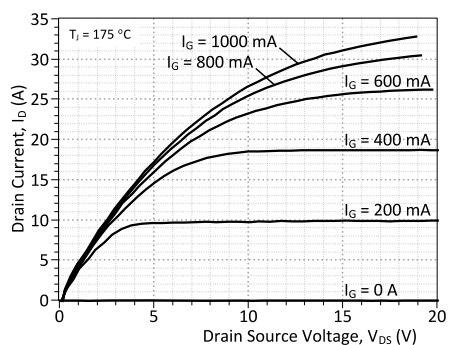
rozwiązanie hybrydowe, gdzie współpracują niskonapięciowy MOSFET i normalnie otwarty JFET SiC według rysunku 49. JFET ma napięcie odcięcia rzędu kilku, maksymalnie kilkunastu woltów. Jeśli jego bramka jest uziemiona, to przy zatkanym na tranzystorze MOSFET, napięcie na nim i na źródle tranzystora JFET wyniesie właśnie te kilka do kilkunastu woltów. Natomiast, gdy „dolny” MOSFET zostanie otwarty, wtedy zewzrze źródło JFET-a do masy, a tym samym go otworzy.

Rozwiązanie jest proste, ale ma pewne wady. Dlatego na przykład Infineon do swoich normalnie otwartych JFET-ów SiC proponuje scalony sterownik 1EDI30J12Cx i wykorzystanie MOSFET-a z kanałem P według rysunku 50. Dzięki sprytnemu sterowaniu, podczas przełączania, tranzystor JFET SiC jest... stale otwarty, a zamyka się i otwiera tylko niskonapięciowy MOSFET P. Warto zapoznać się ze szczegółami i na stronie <http://goo.gl/eVzFCx> wpisać w wyszukiwarce hasło: 1EDI30J12Cx.

Od kilku lat dostępne są też tranzystory SiC normalnie zamknięte, czyli MOSFET-y SiC. Przykładem może być Cree C2M160120D o napięciu 1200 V, prądzie 17,7 A i typowej rezystancji  $R_{DS(on)} = 0,16 \Omega$  – rysunek 51.

Innym przykładem tranzystorów SiC normalnie zatkanych są tranzystory SJT firmy GeneSiC. GA16JT17-247 ma napięcie maksymalne 1700 V, prąd do 16 A,  $R_{DS(on)} = 0,11 \Omega$  i bardzo krótkie czasy przełączania, rzędu kilkudziesięciu nanosekund. Jednak dane z karty katalogowej – rysunek 52 – wskazują, że to jakiś „dziwolak”. Nie chodzi tylko o dziwaczny symbol tego tranzystora. Otóż wygląda to na tranzystor polowy, a podane są zaznaczone różowymi podkładkami: maksymalny prąd bramki (Gate Peak Current) oraz... wzmocnienie prądowe (DC Current Gain)! I rzeczywiście. Chodzi o SiC SJT („Super” Junction Transistor), który jest bipolarnym tranzystorem BJT NPN o „superwysokim” wzmocnieniu prądowym. Są one dostępne na rynku <http://goo.gl/xO4N2i>.

GeneSiC opracował tranzystory o napięciu pracy 1200 V ...10 kV. Bardzo obiecujące są bardzo krótkie czasy przełączania, rzędu 15 ns i wysoka temperatura maksymalna do +500°C. Jak na razie firma oferuje wysokotemperaturowe tranzystory, pracujące do +250°C – patrz: <http://goo.gl/5BqLQA>. Interesujące informacje zawarte są też na stronie <http://goo.gl/5BqLQA>.



## WYBÓR KONSTRUKTORA

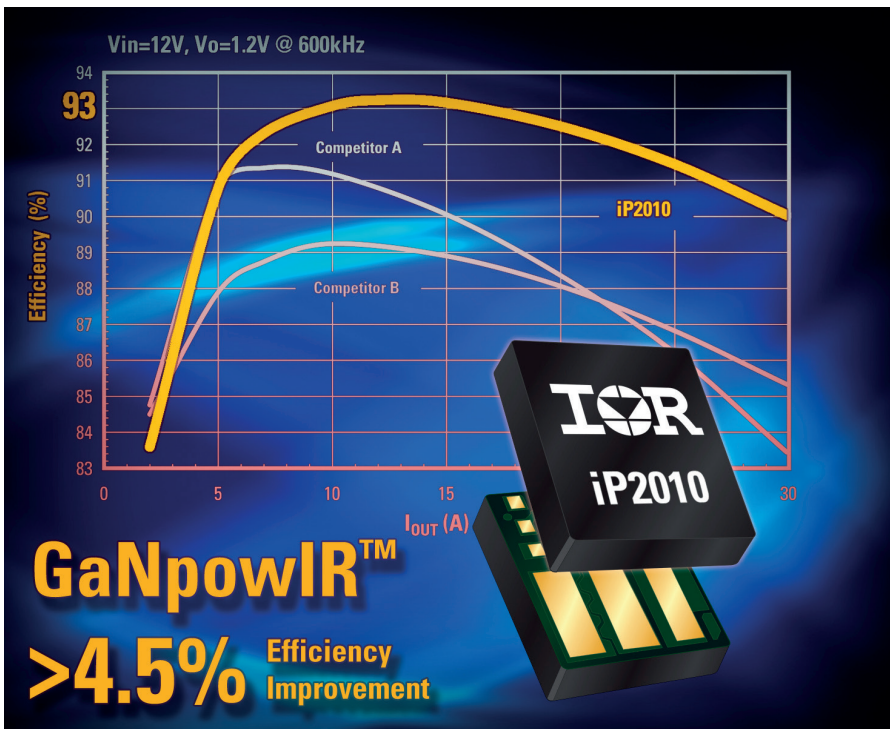
gl/OFaOBh, według której opracowano nie tylko tranzystory złączowe, ale też JFET-y oraz „poziome” i „pionowe” MOSFET-y.

### GaN

Obecnie coraz więcej mówi się też o nowych elementach z azotku galu (GaN), materiału który stał się popularny zwłaszcza od początku lat dziewięćdziesiątych, kiedy to Shuji Nakamura zaprezentował niebieskie diody i lasery z azotku galu (GaN) o znakomitych parametrach. Z uwagi na dużą ruchliwość nośników oraz obecność w heterostrukturach dwuwymiarowego gazu elektronowego (2DEG), wytworzenie praktycznie użytecznych tranzystorów normalnie zamkniętych napotyka jednak na duże trudności.

Przykładem wspomnianego wcześniej kaskadowego połączenia niskonapięciowego MOSFET-a i wysokonapięciowego JFET-a jest Transphorm TPH3006PD – rysunek 53. Na stronie firmy (<http://goo.gl/IGcU2F>) można znaleźć nieco więcej informacji. Jeszcze bardziej skomplikowane rozwiązanie proponuje International Rectifier z platformą GaNpowIR. Jest to realizacja heterostruktur GaN/AlGaN na podłożu krzemowym, wraz z układami sterującymi. Od kilku lat dużo się o tym mówi, a jak na razie jedyny element iP2010 to nie tylko pojedynczy normalnie włączony tranzystor GaN HEMT (enhancement mode), tylko cały wykonawczy układ mocy do przetwornic obniżających ( $U_{we}=7...13.2$  V,  $U_{wy}=0.5...6$  V, 30 A), pracujący z częstotliwością do 3 MHz (wersja iP2011 do 5 MHz) – fotografia 54. Rysunek 55 pokazuje fragmenty (króciutki) karty katalogowej tego elementu, który na stronie producenta oznaczony jest jako... przestarzały. Dalszych informacji można poszukać na stronach <http://goo.gl/gm1qPE>, <http://goo.gl/wuDeW>.

Jeśli chodzi o „prawdziwe”, normalnie zamknięte tranzystory GaN, to w ostatnich latach pojawiło się mnóstwo informacji o laboratoryjnych modelach takich tranzystorów. Jednak jak na razie, oferta rynkowa jest nad wyraz skromna. W roku 2009 firma Efficient Power Conversion (EPC) wprowadziła do oferty pierwszy normalnie zamknięty tranzystor eGaN FET, jako zamiennik, a właściwie ulepszenie klasycznych tranzystorów MOSFET. Rysunek 56 to fragmenty karty katalogowej tranzystora EPC2001. Dalsze istotne informacje zawierają wykresy pokazane na rysunku 57. Wyglądają one bardzo podobnie, jak analogiczne charakterystyki najpopularniejszych MOSFET-ów krzemowych. Różnicą jest to, że przy wyższych napięciach bramki pojawia się prąd bramki o wartości do 10...20 mA. Dopuszczalne napięcie  $U_{GS}$  (-5 V...+6 V) jest tu mniejsze niż w MOSFET-ach, gdzie zazwyczaj wynosi  $\pm 15$  V albo  $\pm 20$  V, dlatego do sterowania tranzystorów eGaN FET potrzebne są drivery inne, niż dla MOSFET-ów. Warto też zwrócić uwagę, że mniejsza jest pojemność wejściowa ( $C_{iss}$  typowo 850 pF) i mniejsze



Rysunek 54.

International  
**IR** Rectifier

**GaNpowIR™**

Typical Application

www.irf.com  
**iP2010PbF**

**High Frequency GaN-Based Integrated Power Stage**

**Description**

The iP2010 is a fully optimized, high frequency power stage solution for synchronous buck applications utilizing IR's Gallium Nitride (GaN)-based power device technology platform.

Rysunek 55.

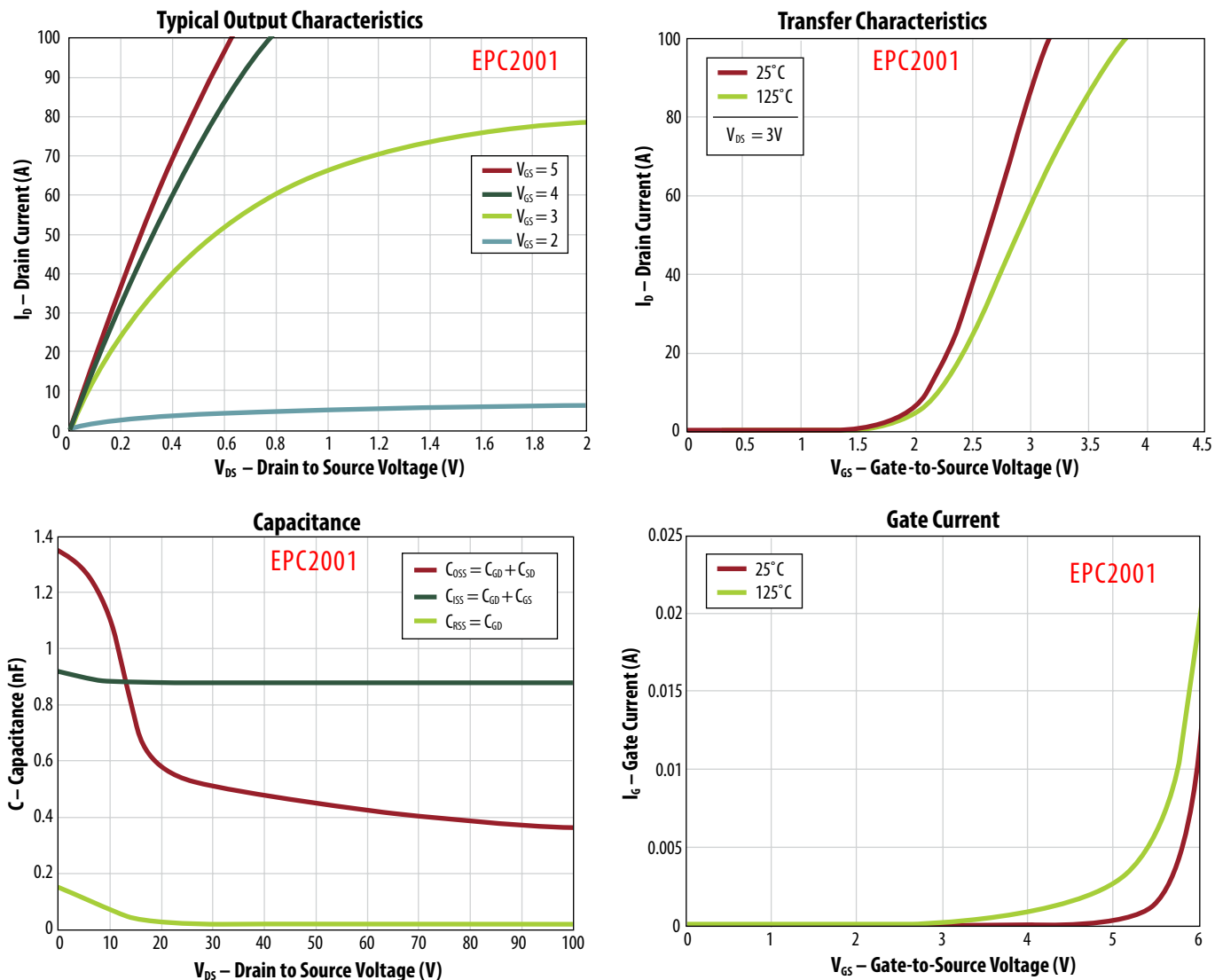
eGaN® FET DATASHEET		EPC2001	
<b>EPC2001 – Enhancement Mode Power Transistor</b>			
$V_{DSS}$ , 100 V			
$R_{DS(ON)}$ , 7 mΩ			
$I_D$ , 25 A			
<b>NEW PRODUCT</b>		EFFICIENT POWER CONVERSION RoHS Halogen-Free	
$V_{DS}$	Drain-to-Source Voltage (Continuous)	100	V
	Drain-to-Source Voltage (up to 10,000 5ms pulses at 125°C)	120	V
$I_D$	Continuous ( $T_A = 25^\circ\text{C}, \theta_{JA} = 13$ )	25	A
	Pulsed (25°C, $T_{pulse} = 300 \mu\text{s}$ )	100	
$V_{GS}$	Gate-to-Source Voltage	6	V
	Gate-to-Source Voltage	-5	V

Rysunek 56.

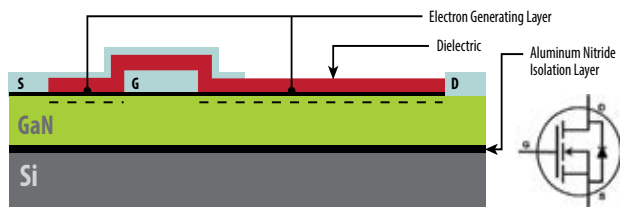
napięcie progowe ( $U_{Gsth}$  typowo 1,4 V), przez to znacząco mniejszy jest ładunek niezbędny do przeładowania bramki – w praktyce oznacza to większą szybkość przełączania. Według materiałów firmowych – rysunek 59 – struktura tych tranzystorów jest prosta, jednak do uzyskania konkurencyjnych parametrów i cen jest jeszcze daleko. Warto poszukać dodatkowych informacji na stronie: <http://goo.gl/JGu5qZ>.

„MOSFET-y GaN” są na tyle obiecujące, że Texas Instruments już w roku 2011 wypuścił driver LM5113, optymalizowany dla takich tranzystorów – rysunek 59.

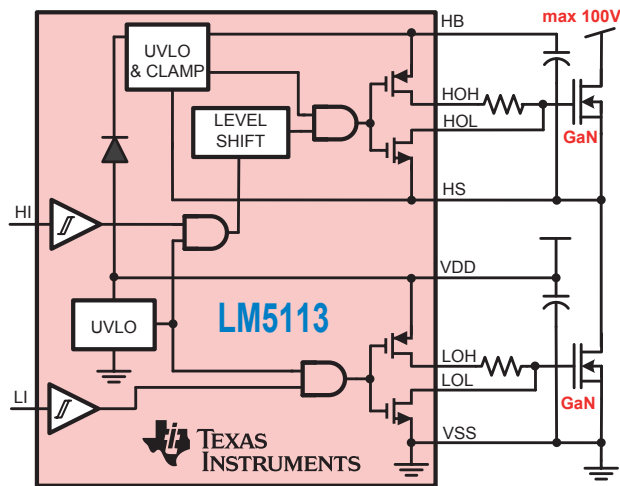
Jak na razie, parametry „MOSFET-ów” GaN nie są zachwycające, jednak ceny już teraz nie są szokujące. Wprawdzie różne odmiany tranzystorów krzemowych nadal okazują się lepsze i bardziej ekonomiczne, jednak należy się spodziewać, że normalnie



Rysunek 57.

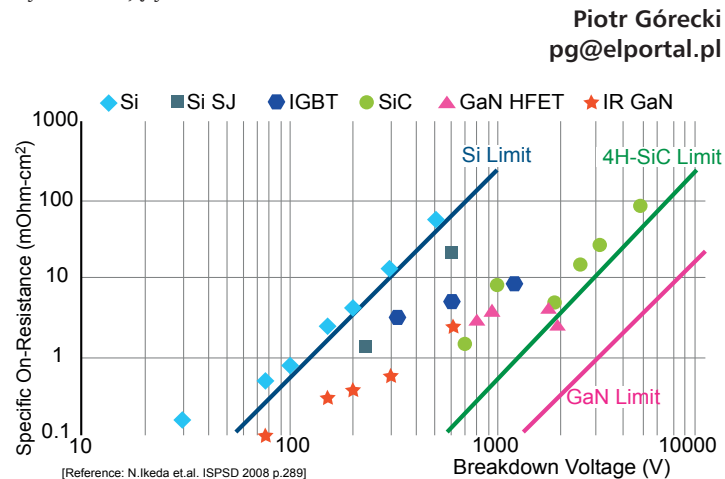


Rysunek 58.



Rysunek 59.

zamknięte tranzystory GaN już niedługo zmienią sytuację i wyprą krzemowe MOSFET-y z wielu aplikacji. Takie same oczekiwania można mieć odnośnie tranzystorów SiC. Parametry tranzystorów krzemowych już teraz zbliżone są do nieprzekraczalnych granic, wyznaczonych przez właściwości materiału, ale nie można tego powiedzieć o tranzystorach SiC, a tym bardziej GaN (rysunek 60). Szybkie tranzystory GaN i SiC dają szansę stworzenia jeszcze mniejszych przetwornic i zasilaczy impulsowych. Byłyby też bardzo pożądane we wzmacniaczach audio klasy D. Choćby tylko dlatego warto śledzić rozwój nowych obiecujących elementów.



Rysunek 60.