

# Elementy elektroniczne dużej mocy

Zamieszczone obok fragmenty opisu patentowego złożonego w roku 1926 udowadniają, że już prawie 100 lat temu pochodzący z Polski (urodzony w 1882 we Lwowie który wtedy był częścią Austro-Węgier) naukowiec żydowskiego pochodzenia, Julius Edgar Lilienfeld, opatentował tranzystor – wzmacniający element półprzewodnikowy.

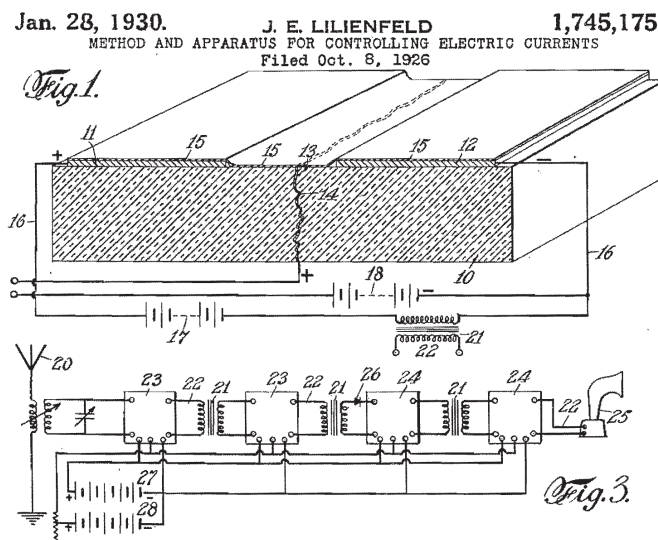
Co prawda patentowany przyrząd nie był nazwany tranzystorem, tylko *aparatem do wzmacniania prądu*, ale dziś powiemy, że jest to patent na odmianę złączeniowego tranzystora polowego (JFET – junction field effect transistor, a ściślej MESFET METal-Semiconductor Field Effect Transistor).

Patent pojawił się prawie sto lat temu, a idea, pomysł sporo wcześniej. Jednak ani Lilienfeldowi, ani innym naukowcom i wynalazcom przez kilkadziesiąt lat nie udało się stworzyć działającego, praktycznie użytecznego elementu według tej idei. A idea była prawidłowa i słuszna, o czym za chwilę.

Trzeba też mocno podkreślić, że wynalezienie tranzystora bipolarnego – **fotografia 1** – © Alcatel-Lucent USA Inc. w roku 1947 (Walter Brattain, John Bardeen, William Shockley) było przypadkiem i zaskoczeniem. Było to zdecydowanie bardziej odkrycie niż świadome wynalezienie. Celem tych badaczy wcale nie było stworzenie takiego właśnie trzywarstwowego elementu z dwoma złączami pn,



Fotografia 1.

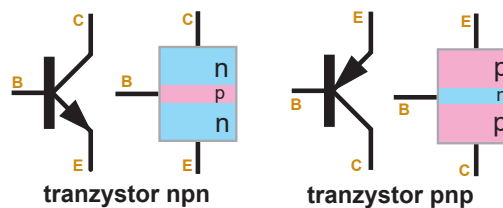


wzmacniającego sygnały elektryczne. Ze zdziwieniem stwierdzili, że testowana dość specyficzna i dość skomplikowana struktura jest wzmacniaczem prądu. **Rysunek 2** przypomina, jakie dziś wykorzystujemy symbole graficzne tranzystorów bipolarnych i jak przedstawiamy w uproszczeniu ich budowę.

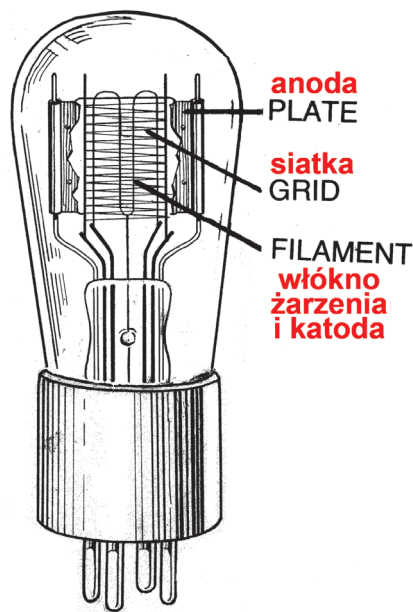
Odkrycie takiego dziwnego elementu wzmacniającego było o tyle zaskoczeniem, że nie tylko ci, ale i inni naukowcy i wynalazcy, w tym William Shockley, już od szeregu lat pracowali nad stworzeniem wzmacniacza „solid state”, czyli wzmacniającego elementu półprzewodnikowego, ale działającego na innej zasadzie. Na zasadzie bardzo prostej. Takiej, którą wykorzystują lampy elektronowe. A jak wiadomo, ich działanie polega na wpływie pola elektrycznego na swobodne, ruchome ładunki elektryczne.

Ta atrakcyjna i słuszna idea jest następująca: jeżeli w przestrzeni mamy swobodne ładunki elektryczne i jeżeli w tej przestrzeni występuje pole elektryczne, to na ładunki te działa siła i poruszają się one w polu elektrycznym – w przestrzeni tej i w całym obwodzie elektrycznym płynie prąd. Sprytny pomysł wzmacniania polega na tym, że wprowadzamy drugie, pomocnicze, sterujące pole elektryczne, które też oddziałuje na nośniki prądu i najprościej mówiąc, może wypychać je z przestrzeni, w której mogą się poruszać. To drugie, pomocnicze pole elektryczne w sumie steruje liczbą czynnych nośników, a przez to reguluje wielkość prądu płynącego w głównym obwodzie.

Ta jasna i prosta idea dała się stosunkowo łatwo i szybko zrealizować w postaci klasycznej, próżniowej lampy elektronowej – triody. Przypomnijmy, że triodę (audion) wynalazł Lee de Forest w roku 1906.



Rysunek 2.



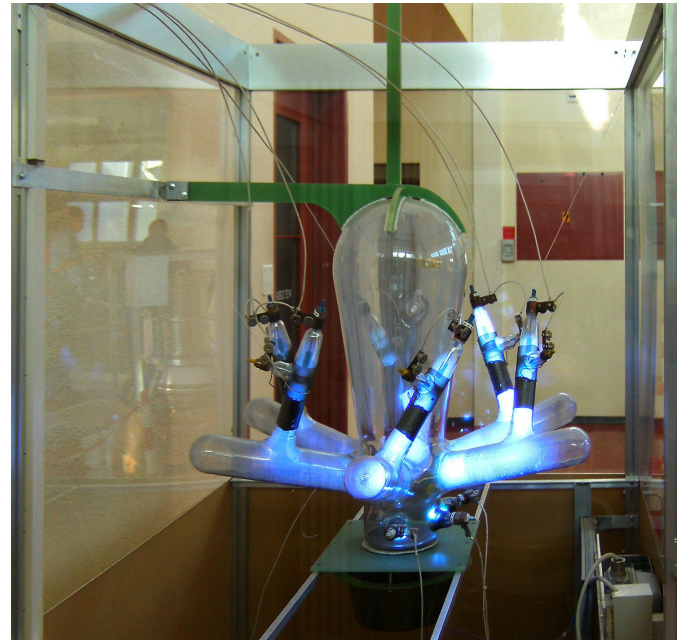
Rysunek 3

W triodzie swobodne nośniki to elektrony, poruszające się w próżni między emitującą elektrony gorącą katodą a anodą. Dodanie trzeciej elektrody – tak zwanej siatki, pozwala regulować przepływ prądu za pomocą niewielkiego napięcia, rzędu kilku woltów, podanego między katodę i siatkę. Schemat budowy prymitywnej elektronowej lampy próżniowej (z bezpośrednim żarzeniem) jest pokazany na **rysunku 3**. Przy okazji wyjaśnia się, dlaczego w angielskojęzycznych źródłach zza oceanu anoda nazywana jest *plate* (co można przetłumaczyć jako *plyta*).

Tę bardzo prostą zasadę sterowania, gdzie pole elektryczne odpycha lub przyciąga swobodne nośniki prądu, próbowano zastosować nie tylko przy wykorzystaniu elektronów w próżni. Niniejszy materiał poświęcony jest elementom elektronicznym dużej mocy, dlatego koniecznie trzeba wspomnieć też o innych rodzajach lamp. Otóż lampy próżniowe z uwagi na właściwości elektronów w próżni generalnie nie nadają się do pracy przy dużych prądach. Owszem, produkowano lampy próżniowe o dużych prądach, ale były to potężne i kosztowne konstrukcje, stosowane w nadajnikach radiowych. Tymczasem od dawna istniało zapotrzebowanie na elementy elektroniczne pracujące przy dużych prądach i niezbyt dużych napięciach. Do tego lampy próżniowe po prostu się nie nadawały. Przykładem mogą być szeroko stosowane w starych odbiornikach radiowych próżniowe lampy prostownicze. Nie nadają się one do pracy przy dużych prądach i niskich napięciach. I tu koniecznie należałoby wspomnieć o gazotronie, tyratronie i ignitronie.

Otóż już w XIX wieku powstały lampy gazowane, najpierw jako popularne do niedawna lampki – neonówki, potem inne interesujące odmiany. Gazotron to lampa prostownicza, odpowiednik próżniowej diody. Tyratron to lampa elektronowa budową bardzo podobna do triody. Kluczowa różnica to zastąpienie próżni gazem – najczęściej jednym z gazów szlachetnych, jak neon, ksenon, ewentualnie wodorem lub parami rtęci. I właśnie obecność gazu zmienia zdecydowanie właściwości. Najprościej biorąc, w normalnych warunkach tyratron nie przewodzi prądu. O przepływie prądu decyduje stosunkowo niewielkie napięcie siatki.

W kontekście głównego tematu artykułu bardzo istotną zaletą było to, że gazotrony i tyratrony mogły przewodzić prądy wielokrotnie większe niż podobne lampy próżniowe. Występuje jednak istotna różnica między triodą i tyratronem. Próżniowa trioda pozwala na płynną, liniową regulację prądu anody za pomocą niewielkiego napięcia siatki. Niemal identycznie zbudowany tyratron, który jest lampą gazowaną, nie pozwala na taką płynną, liniową regulację – jest



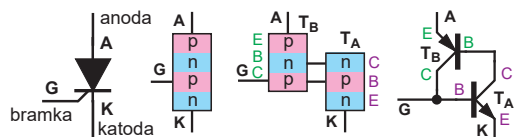
Fotografia 4.

elementem dwustanowym: albo jest zatkany i nie przewodzi, albo zostaje otwarty i po otwarciu zmiany napięcia siatki nie mają już żadnego wpływu na jego stan. Raz włączony tyratron pozostaje otwarty, prąd płynie i dopiero przerwanie przepływu prądu zatyka tyratron. Wynika to z zasady działania lamp gazowanych, gdzie w spoczynku gaz zawiera znikomą liczbę wolnych nośników ładunku i nie przewodzi prądu. Włączenie polega na lawinowym powielaniu nośników przez rozdzielanie molekuł gazu na swobodne elektrony i jony. W gazotronach, które są zwyczajnymi, niesterowanymi prostownikami, następuje to po prostu pod wpływem napięcia w obwodzie głównym, a w tyratronach ma na to wpływ także napięcie siatki. Dlatego tyratrony mogą służyć i przez długie lata służyły w roli impulsowych regulatorów – prostowników sterowanych. Odmianą tyratronu jest ignitron (**fotografia 4** z Wikipedii), który jest sterowanym prostownikiem rtęciowym. Duże ignitrony zawierały kilka litrów rtęci, pełniąc funkcję płynnej katody i mogły prostować prądy rzędu setek amperów, a nawet większe. To właśnie lampy gazowane, a nie próżniowe, były pierwszymi elektronicznymi elementami dużej mocy. Tyratrony i ignitrony w latach 30. zastąpiły wcześniejsze, jeszcze bardziej niedoskonałe prostowniki elektromechaniczne dużej mocy, a w pewnych zastosowaniach prostowniki elektrolityczne.

Lampy te nie tylko wytwarzały dużo niepotrzebnego ciepła (moc równa iloczynowi przepływającego prądu i spadku napięcia na prostowniku rzędu kilkunastu do kilkudziesięciu woltów), ale wydzierały też trujące pary rtęci oraz szkodliwe promieniowanie ultrafioletowe. Jednak potężne i groźne dla zdrowia osób obsługujących prostowniki rtęciowe pracowały co najmniej do lat 70., ponieważ zastąpienie ich półprzewodnikami nie było łatwe. Wspomnijmy, że prostowniki kwaprytowe i selenowe, które też były elementami półprzewodnikowymi, miały kiepskie właściwości. Pierwsze nieco bardziej nowoczesne diody były wykonane z germanu, materiału o stosunkowo niskiej dopuszczalnej temperaturze pracy. Dopiero diody krzemowe, a potem potężne tyrystory zmieniły sytuację w zakresie prostowników bardzo dużej mocy.

### Tyrystory

Jak wiadomo, dioda krzemowa składa się z dwóch warstw półprzewodnika: typu n i typu p. Niewiele bardziej skomplikowana struktura czterowarstwowa (n-p-n-p) daje dodatkowe możliwości: tworzy tyrystor, który jest dwustanowym (załącz/wyłącz) elementem sterowanym prądem bramki. W przybliżeniu można przyjąć, że czterowarstwowa struktura tyrystorowa to połączenie dwóch komplementarnych



Rysunek 5.

tranzystorów według **rysunku 5**. Z uwagi na podobne działanie nazywa pochodzi od tyratronu (thyristor = thyatron + transistor, czyli tranzystorowy tyratron). Tyrystor nazywany jest też sterowanym prostownikiem krzemowym – *silicon-controlled rectifier* (SCR).

Tyrystor to element dwustanowy: albo oba tranzystory składowe są zatkane, wyłączony, albo oba są w pełni otwarte i element zachowuje się jak pojedyncza dioda. Włączony tyrystor przewodzi, aż przestanie przezeń płynąć prąd (ściślej aż prąd ten zmniejszy się do bardzo małej wartości).

Wydawałoby się, że taki dwustanowy element nadaje się tylko do obwodów prądu zmiennego jako zamiennik tyratronów i ignitronów. Pierwsze tyrystory pojawiły się w roku 1956, gdy parametry tranzystorów dużej mocy były słabe, natomiast można było realizować tyrystory o dużych napięciach i prądach pracy. Wielu współczesnych elektroników ze zdziwieniem odkrywa, że kilkadziesiąt lat temu tyrystory wykorzystywano z powodzeniem także w obwodach prądu stałego, stosując sprytnie sposoby ich wyłączania.

Do dziś z powodzeniem stosowane są w energetyce zarówno jako prostowniki, jak też w roli przełączników zastępujących przekaźniki.

Tyrystor jako sterowana dioda przewodzi prąd w jednym kierunku. Zamiast dwóch tyrystorów włączonych antyrownolegle opracowano pojedynczy element – tyrystor dwukierunkowy – triak. Ma on strukturę pięciowarstwową i może być włączany przy dowolnej biegunowości napięcia głównego i prądu bramki. Taka uniwersalność wiąże się jednak z pewnymi wadami i triaki są wykorzystywane w obwodach sieci 230 V 50 Hz przy prądach do kilkudziesięciu amperów. Wad takich nie ma w prostszych tyrystorach i już dawno budowano tyrystory o prądach setek amperów i napięciach pracy mocno ponad 1000 woltów. Powstały też potężne tyrystory, które można wyłączyć za pomocą bramki (*gate turn-off thyristor* – GTO).

## Zakres zainteresowań

Większość elektroników mało interesuje się elementami o najwyższych mocach, o prądach rzędu setek i tysięcy amperów oraz napięciach tysięcy woltów. Elektronicy najczęściej mają do czynienia z elementami półprzewodnikowymi o prądach pracy rzędu kilku do kilkudziesięciu amperów, napięciach od kilku woltów do 650 V...700 V (podwojone szczytowe napięcie sieci 230 VAC), pracującymi w układach o mocach dziesiątek, co najwyżej setek watów, rzadko powyżej 1 kW.

Nie ma jednak ścisłej granicy między elementami małej mocy i dużej mocy, nie wspominając o elementach średniej mocy. W pierwszym przybliżeniu można po prostu przyjąć, że półprzewodnikowe elementy dużej mocy to takie, które wymagają dodatkowego chłodzenia – jakiegoś radiatora do odprowadzania ciepła ze struktury.

Fascynujące jest przesłedzenie, jak ulepszano elektroniczne elementy mocy i jakie nowe rozwiązania wprowadzono z biegiem lat. Okazuje się bowiem, że historia zatoczyła koło. Nieprzypadkowo artykuł zaczęliśmy od patentu Lilienfelda, który opisywał element półprzewodnikowy, wykorzystujący zjawisko, dziś nazwane efektem polowym. Element mający sterowanie *napięciowe*, za pomocą pola elektrycznego. Sterowanie *napięciem* (z pomocą zmian pola elektrycznego) przyciągającego i odpychającego nośniki ładunku elektrycznego jest ideą prostą i oczywistą. Wykorzystano to w lampach: i próżniowych, i gazowanych. Takie były początki. Przypadkowe odkrycie pod koniec lat 40. tranzystora bipolarnego, elementu do sterowaniu *prądowym*, na jakiś czas zmieniło kierunek rozwoju elementów elektronicznych, także tych dużej mocy. Co jednak bardzo ciekawe, w kolejnych

latach coraz częściej powracano do prostej idei sterowania napięciem (polem elektrycznym). Historia zatoczyła koło. I właśnie ten powrót do starej, prostej idei jest fascynującym wątkiem historii rozwoju półprzewodników, także tych dużej mocy.

Przyjrzyjmy się temu nieco bliżej.

## Trudne początki

Lampa próżniowa trioda może mieć zaskakująco prymitywną budowę i przez to jest dobrym przykładem, jak łatwo można za pomocą pola elektrycznego (napięcia siatki) sterować przepływem swobodnych elektronów w próżni.

W próżni. Jednak próby wykorzystania takiego mechanizmu w ciałach stałych przez wiele lat kończyły się fiaskiem. Pole elektryczne można łatwo wytworzyć w materiałach, które są izolatorami, ale tam w normalnych warunkach nie ma swobodnych elektronów, czyli niemożliwy jest przepływ prądu. Przeciwnie jest w przewodnikach: tu swobodnych nośników prądu (elektronów) jest mnóstwo, ale nie sposób wytworzyć wewnątrz przewodnika sterującego pola elektrycznego, dodatkowo wpływającego na ruch tych elektronów. Najprościej biorąc, zewnętrzne pole elektryczne nie wnika do wnętrza przewodników, niejako jest wypychane przez swobodne elektrony.

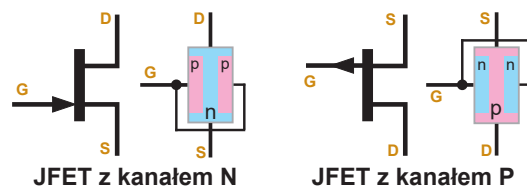
Słuszny pomysł Lilienfelda i innych badaczy polegał na tym, że należałoby wykorzystać materiał pośredni między izolatorem i przewodnikiem (półprzewodnik), który ma niedużo swobodnych elektronów, a przez to wytwarzane z zewnątrz pole elektryczne może wnikać do jego wnętrza i oddziaływać z obecnymi tam nośnikami ładunku (prądu). Jest to tak zwany efekt polowy – *field effect*, polegający na zmianach przewodności materiału pod wpływem pola elektrycznego. Takie rozumowanie było prawidłowe, jednak dwa główne czynniki długo nie pozwalały na praktyczną realizację:

- Na początku XX stulecia nie dysponowano odpowiednio jednorodnymi i czystymi półprzewodnikami.
- Nawet w praktycznie użytecznych, najczystszych półprzewodnikach głębokość wnikania zewnętrznego pola elektrycznego jest znikoma, powiedzmy rzędu mikrometrów.

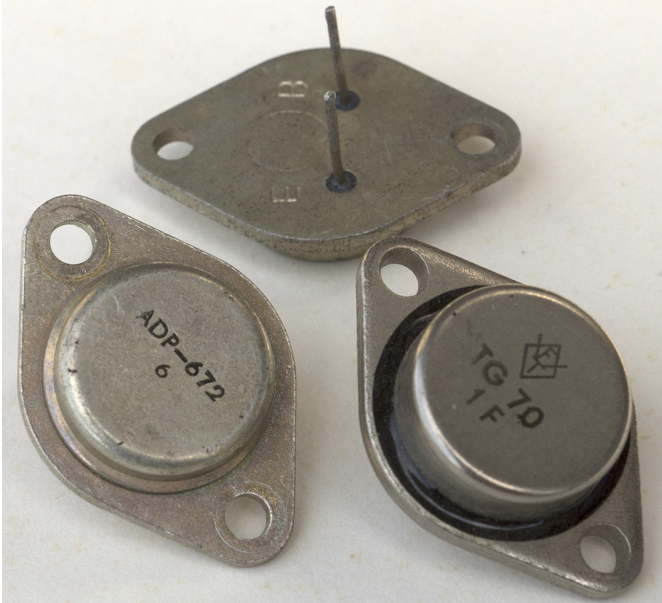
Te dwa problemy rozwiązano dopiero w latach 50. XX wieku i wtedy powstał pierwszy tranzystor, wykorzystujący efekt polowy i wnikanie pola elektrycznego do wnętrza półprzewodnika. Mianowicie dopiero na początku lat 50. poinformowano (Bell Labs) o stworzeniu tranzystora polowego złączeniowego, czyli JFET – Junction Field Effect Transistor, który działał podobnie, jak opisywał to wygasły już wtedy patent Lilienfelda.

I zasada działania, i budowa tranzystora złączeniowego JFET jest bardzo prosta, zdecydowanie prostsza niż tranzystora bipolarnego, co pokazuje **rysunek 6**, a to wydaje się dużą zaletą.

Niestety okazało się, że długo oczekiwany tranzystor polowy JFET w praktyce wcale nie jest tak atrakcyjny, jak można się było spodziewać. W latach 50. w licznych laboratoriach prowadzono prace nad wytworzeniem praktycznie użytecznych tranzystorów polowych. Ale dość długo pozostawały one jedynie laboratoryjną ciekawostką, a nie użytecznymi elementami rynkowymi. Najprościej biorąc, z uwagi na to, że sterujące pole elektryczne wnika do półprzewodnika na znikomą głębokość, polowe tranzystory złączeniowe JFET z konieczności były elementami małymi, delikatnymi, małej mocy. Nie było sposobu, żeby zbudować tranzystory polowe JFET o dużej powierzchni struktur, czyli o dużym prądzie i dużej mocy. Tak długo oczekiwane i pożądane tranzystory polowe w końcu powstały i pojawiły się



Rysunek 6.



Fotografia 7.

na rynku, jednak okazały się nieprzydatne do układów większej mocy, a i w układach małej mocy tranzystory polowe stosowano rzadko. Przez ponad 30 lat dominowały przypadkowo odkryte tranzystory bipolarne, działające na zupełnie innej zasadzie. Nazwa **tranzystor** (połączenie *transfer resistor*) wskazuje na zmienną, sterowaną rezystancję, jednak tranzystor bipolarny nie ma właściwości rezystora, tylko źródła prądowego sterowanego prądem (bazy). Obwód sterujący (baza-emiter) to złącze diodowe p-n, przy czym większość prądu tego złącza, a konkretnie prądu emitera, jest w sprytny sposób przejmowana przez obwód kolektora.

Tranzystory bipolarne zaczęły się szybko upowszechniać już od początku lat 50. Pierwszy tranzystor był bardzo niedoskonałym, delikatnym tranzystorem ostrzowym (*point contact transistor*). Ale szybko zaczęto wykorzystywać inne technologie, co pozwoliło poprawić różne parametry, między innymi budować tranzystory o większym prądzie i większej mocy. A były one potrzebne w wielu zastosowaniach, na przykład jako elementy regulacyjne w stabilizatorach napięcia, a także we wzmacniaczach mocy audio. Duże znaczenie miało pojawienie się tranzystorów komplementarnych, czyli pnp i npn o podobnych właściwościach.

Wśród dawnych elektroników „lampowych”, którzy pomalutko i z oporami przestawiali się na tranzystory, w większości tranzystory małej mocy kilkudziesięciu miliwatów, zdziwienie budziły tranzystory o mocach kilku czy kilkunastu watów. Najpierw były to elementy germanowe, żeby wymienić produkowane od roku 1960 krajowe 10-watowe TG70-TG72, oznaczane później ADP670...672 – **fotografia 7**.

Na szereg lat kultowym tranzystorem mocy, znanym na całym świecie, stał się krzemowy 2N3055, opracowany na początku lat 60. przez RCA. 2N3055 później produkowany był przez wielu wytwórców na całym świecie. W krajach obozu komunistycznego ten kultowy tranzystor był produkowany przez węgierski Tungsram (**fotografia 8**) i jego sławy nie przyćmiły na pozór silniejsze produkowane w Czechosłowacji KD502, KD503.



Fotografia 8.

Nie tylko na początku lat 60. tranzystor 2N3055 był rewelacją ze swoimi parametrami: prądem kolektora 15 A, napięciem  $U_{CE0} = 60$  V i mocą 117 W! Niebotyczna jak na owe czasy moc: ponad 100 watów, rozpałała wyobraźnię hobbystów, a mało kto spośród nich rozumiał, o jaką moc tu chodzi. Parametry wskazują, że tranzystor przy zasilaniu 60 V mógłby przełączać prąd 15 A, co daje moc sterowanego obciążenia aż 900 watów. Natomiast katalogowa moc 117 W to maksymalna dopuszczalna moc strat ciepłych wydzielających się w tranzystorze, ale tylko przy idealnych chłodzeniu, przy temperaturze obudowy (nie otoczenia) równej  $+25^{\circ}\text{C}$ . W warunkach praktycznych idealnego chłodzenia się nie osiągnie, więc dopuszczalna moc strat jest zawsze mniejsza, zależna od zastosowanego radiatora. Moc strat nie przekłada się też bezpośrednio na moc wyjściową wzmacniacza audio. Choć nieświadomi tego hobbysci często przeciążali te tranzystory, słynęły one z dużej odporności zarówno na przegrzanie, jak i na drugie przebiecie.

W każdym razie co najmniej do lat 80. dominującymi elementami mocy były tranzystory bipolarne. Pomimo pewnych wad, w większości aplikacji szybko okazały się dużo lepsze od lamp elektronowych, niekoniecznie ze względu na parametry, raczej z uwagi na wygodę stosowania i cenę. Tranzystory znalazły też i otworzyły szereg nowych zastosowań. Pojawiło się i rosło zapotrzebowanie na bipolarne tranzystory coraz większej mocy, w tym wysokonapięciowe. Przez różne sprytnie rozwiązania poprawiano ich parametry dynamiczne – stawały się one coraz szybsze. Stopniowo ulepszano też sposoby przekazywania ciepła ze struktury do obudowy i dalej do otoczenia, co dawało tranzystory o coraz większej mocy strat. Niemniej bipolarne tranzystory wysokonapięciowe z uwagi na problem grubości bazy miały i mają małe wzmocnienie prądowe, niektóre tylko  $10\times$ , a nawet mniej. Także w układach impulsowych do sterowania potrzebny jest stosunkowo duży prąd bazy, by skutecznie nasycić tranzystor.

Pomimo postępu, dały o sobie znać nieuniknione, „wrodzone” i „nieuleczalne” wady, które w wielu zastosowaniach były i są bardzo poważnym ograniczeniem, wynikającym z fundamentalnych zasad pracy tranzystorów bipolarnych. Szukano różnych sposobów poprawy sytuacji. Po pierwsze, nadal równolegle prowadzono badania laboratoryjne nad elementami innymi niż tranzystory bipolarne, w szczególności nad różnymi odmianami tranzystorów polowych. Po drugie, okazało się, że parametry można zdecydowanie poprawić przez odpowiednie złożenie dwóch lub więcej tranzystorów, albo oddzielnych, albo zintegrowanych razem w jednym elemencie – można wspomnieć o układach Darlingtona i Sziklaiego, a inne przykłady omówimy za chwilę. Po trzecie, obok germanu (Ge) i krzemu (Si), zaczęto wykorzystywać różne inne materiały półprzewodnikowe, między innymi arsenek galu (GaAs), węglik krzemu (SiC) a od niedawna także azotek galu (GaN).

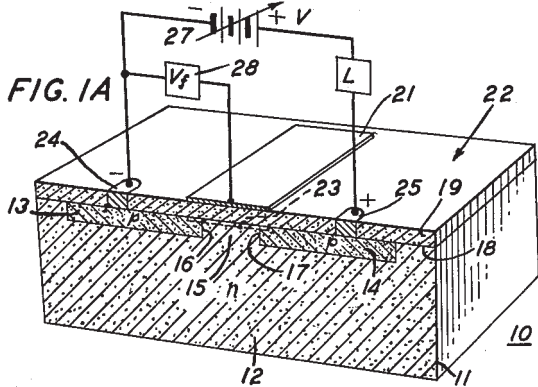
Historia spletała figła: długo, z wielkimi nadziejami oczekiwane, sterowane napięciem tranzystory polowe z początku okazały się wielkim rozczarowaniem. Na co najmniej 30 lat rozpowszechniły się stworzone przypadkowo w roku 1947 tranzystory bipolarne. Jednak z biegiem czasu tranzystory polowe uzyskiwały, czy może raczej odzyskiwały dominującą pozycję.

Najprostsze w budowie tranzystory polowe złączone (JFET) nie tylko były małe i delikatne, ale były niewygodne do sterowania. Najprościej biorąc, były to elementy normalnie otwarte i do ich zatkania, wyłączenia, potrzebne było napięcie sterujące ujemne, podobnie jak w lampach elektronowych. Tranzystory bipolarne były pod tym względem zdecydowanie wygodniejsze, bo były normalnie wyłączone, zatkane i do otwarcia nie wymagały napięcia sterującego, powiedzmy ujemnego. Dlatego przełomem było wynalezienie tranzystora polowego, normalnie zamkniętego, który nie wymagał „ujemnego” napięcia sterującego. Tranzystor taki powstał na początku lat 60. i upowszechniał się pomalutko przez ponad 20 lat.

### MOSFET-y

Historia tranzystora MOSFET sięga przełomu lat 50. i 60. (D. Kahng + M.M. Atalla z Bell Labs) i laboratoryjnych badań nad czymś tak

Aug. 27, 1963 DAWON KAHNG 3,102,230  
ELECTRIC FIELD CONTROLLED SEMICONDUCTOR DEVICE  
Filed May 31, 1960



Rysunek 9.

specyficznym i zachowującym się bardzo nieintuicyjnie, jak zbudowany na powierzchni półprzewodnika kondensator MOS (ogólnie MIS – Metal, Insulator, Semiconductor). W kondensatorze takim występują zaskakujące zjawiska, dużo bardziej skomplikowane niż w prostym tranzystorze JFET. Dodanie do takiego specyficznego kondensatora dodatkowych elektrod daje tranzystor MOSFET o bardzo pożądanym właściwościach.

Nazwa MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) wskazuje na budowę tego elementu. Jest to tranzystor sterowany polem elektrycznym, czyli 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 cieniutka warstwa tlenku (O – oxide), a ściślej dwutlenku krzemu ( $\text{SiO}_2$ ). Między izolowaną bramką a resztą tranzystora tworzą się kondensatory (pojemności), mające bardzo duży wpływ na dynamiczne właściwości tego elementu. **Rysunek 9** to fragment złożonego, jak widać, w roku 1960 zgłoszenia patentowego na tranzystor MOSFET, o budowie, którą dziś nazywamy lateralną (poziomą, płaską). Najpierw, jeszcze w latach 60. tranzystory te wykorzystano do budowy układów scalonych. Natomiast rynkowe wersje MOSFET-ów mocy o innej, wertykalnej, czyli pionowej budowie wewnętrznej (V-MOS, D-MOS, U-MOS, ...) zaczęły się pomału ukazywać i upowszechniać znacznie później. Na przykład tak cenione przez audiofilów HexFET-y o specyficznej, sześciokątnej budowie komórek elementarnych zaczęły pojawiać się na rynku od roku 1978 (IRF100). Popularność MOSFET-ów mocy przyniosły dopiero lata 80. i 90. A dziś ponad połowa produkowanych tranzystorów mocy to właśnie krzemowe MOSFET-y, najczęściej o budowie nazywanej *superjunction*.

Istnieje kilka odmian tranzystorów polowych z izolowaną bramką (IGFET – Insulated Gate FET), w tym MOSFET-ów z izolacją z tlenku. Co ważne, typowy tranzystor MOSFET jest normalnie zamknięty (zamknięty). **Rysunek 10** pokazuje symbole komplementarnych tranzystorów MOSFET z kanałem wzbogacanym (*enhancement mode*) typu N i typu P, czyli normalnie zamkniętych.

Przy zerowym napięciu elektrody sterującej taki MOSFET nie przewodzi prądu. Zostaje otwarty po podaniu na bramkę napięcia o biegunowości takiej, jak główne napięcie zasilające. Dziś mamy setki typów krzemowych tranzystorów MOSFET o mocy strat od kilkudziesięciu do kilkuset watów.

### JFET-y mocy?

Wcześniej mówiliśmy, że z uwagi na głębokość wnikanie pola w półprzewodnik elementarne struktury tranzystorów złączowych JFET są małe i nie sposób zbudować jednej potężnej struktury JFET dużej mocy.



Rysunek 10.

Rysunek 11.

Generalnie jest to prawdą także w przypadku tranzystorów MOSFET. Tranzystory dużej mocy są w istocie złożeniem – połączeniem równoległym mnóstwa małych tranzystorków MOSFET.

Jak najbardziej możliwa jest analogiczna realizacja krzemowych tranzystorów JFET dużej mocy. Jest możliwa, ale na rynku nie ma klasycznych krzemowych JFET-ów dużej mocy! Warto jednak wiedzieć, że już w latach 70. pojawiły się tranzystory SIT (Static Induction Transistor), m.in. słynne w środowisku audiofilów Sony 2SK28, które można traktować jako odmianę JFET-ów o dużej mocy. Jednak elementy te szybko znikły z rynku. Ciekawostką jest też fakt, że idea tranzystorów SIT została opracowana zaskakująco wcześniej, bo już w roku 1950 w Japonii (Nishizawa i Watanabe).

Nieco ponad 10 lat temu niewielka amerykańska firma Lovoltech oferowała krzemowe tranzystory JFET dużej mocy. **Rysunek 11** to fragmenty karty katalogowej JFET-a mocy (24 V, 50 A, 69 W) o oznaczeniu LU1014D. Wywołały one zrozumiałe zainteresowanie miłośników audio z uwagi na „lampopodobne” właściwości. Niestety, wygląda na to, że rynkowe zainteresowanie było zbyt małe, żeby produkcja tych interesujących elementów była opłacalna. Firma Lovoltech najpierw zmieniła nazwę na Qspeed, a potem (2011) została wykupiona przez Power Integrations Inc. Ale nie z uwagi na takie JFET-y mocy, tylko na ulepszone odmiany diod. JFET-ów mocy nie ma w ofercie Power Integrations, która dziś jest znana ze swoich sterowników sieciowych przetwornic indukcyjnych.

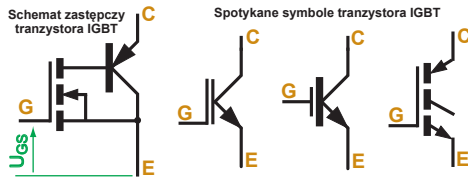
W Internecie można dziś znaleźć JFET-y dużej mocy i ich karty katalogowe, ale nie elementów krzemowych, tylko wykonanych z innego półprzewodnika, na przykład z węgla krzemu ( $\text{SiC}$ ), materiału o którym jeszcze będziemy mówić.

W każdym razie nie ma krzemowych JFET-ów mocy, ale dostępne są działające praktycznie tak samo krzemowe tranzystory MOSFET dużej mocy, które są normalnie otwarte. To są MOSFET-y z kanałem zubożonym (depletion mode). Na rynku dostępne są tylko MOSFET-y zubożane z kanałem N (nie ma wersji z kanałem P), a ich najczęściej używany symbol różni się od tranzystora MOSFET N – **rysunek 12**. Są one wykorzystywane w nielicznych aplikacjach. Mają budowę wewnętrzną praktycznie taką, jak klasyczne MOSFET-y normalnie zamknięte, czyli dużo bardziej skomplikowaną niż tranzystory złączowe JFET.

Absolutnie dominujące są dziś MOSFET-y mocy normalnie zamknięte (*enhancement mode*), o najróżniejszych dopuszczalnych napięciach, prądach i mocach. Zdziwiająco dobre są właściwości MOSFET-ów niskonapięciowych. Dziś istnieją liczne typy, które po otwarciu mają rezystancję  $R_{DSon}$  poniżej 1 milioma. Prąd 100 amperów, płynąc przez rezystancję 1 m $\Omega$ , daje spadek napięcia tylko 100 mV i stosunkowo niewielką jak na taki prąd moc strat 10 W (100 A · 0,1 V). Niskonapięciowe MOSFET-y są przełącznikami



Rysunek 12.



Rysunek 13.

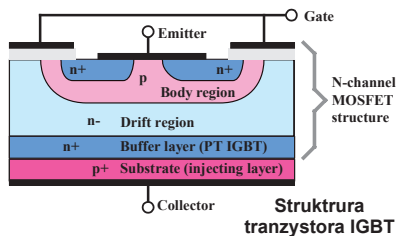
bliskimi ideału! Dla porównania warto dodać, że 10-centymetrowy odcinek miedzianego przewodu instalacyjnego o przekroju 1,5 mm<sup>2</sup> (średnicy 1,4 mm) ma rezystancję nieco powyżej 1,1 milioma...

Dużo gorzej jest z MOSFET-ami wysokonapięciowymi. Najprościej biorąc, aby w stanie zatkania wysokie napięcie nie przebiło struktury między źródłem i drenem, musi być ona odpowiednio gruba. A gruba warstwa półprzewodnika daje stosunkowo dużą rezystancję w stanie otwarcia, a tym samym duże spadki napięcia i duże moce strat. Nie ma problemu, żeby wytworzyć MOSFET-y mocy o napięciach pracy kilkaset woltów czy nawet kilku tysięcy woltów. Jednak ze wzrostem napięcia maksymalnego nieproporcjonalnie rośnie rezystancja, a tym samym straty mocy w stanie otwarcia stają się nieakceptowalnie duże. Pod tym względem wysokonapięciowe MOSFET-y okazują się dużo gorsze od wysokonapięciowych tranzystorów bipolarnych. I tak dochodzimy do...

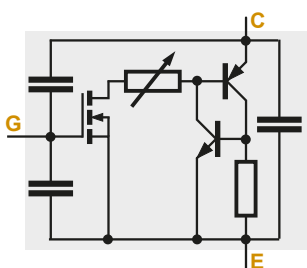
### IGBT

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) to inaczej tranzystor bipolarny z izolowaną bramką. Rysunek 13 pokazuje uproszczony schemat zastępczy i spotykane symbole tranzystora IGBT. Tranzystory IGBT zostały wynalezione w latach 80., a na rynku stały się dostępne w latach 90. Są to tranzystory dużej mocy, łączące zalety MOSFET-ów (łatwość sterowania) i klasycznych bipolarnych tranzystorów złączowych BJT (duży prąd i napięcie pracy, niskie 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.

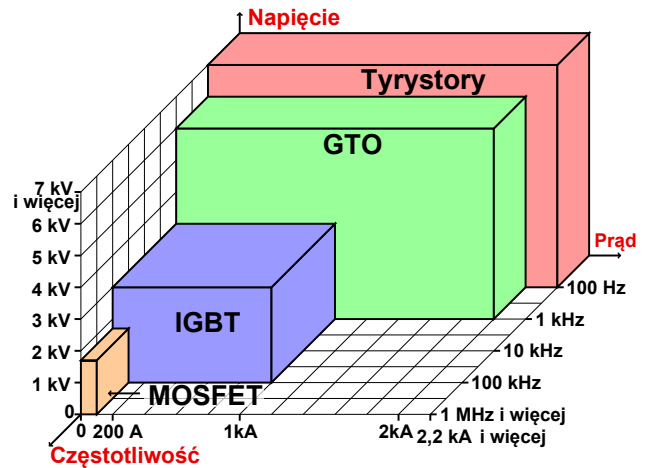
Rysunek 13 sugeruje, że IGBT to połączenie dwóch niezależnych tranzystorów. W rzeczywistości IGBT to pojedyncza struktura półprzewodnikowa (rysunek 14) o specyficznych cechach, a rysunek 13 jest zbyt mocno uproszczony, by pokazać kluczowe właściwości. Taka dość prosta struktura półprzewodnikowa ma specyficzne cechy i ograniczenia. Zagadnienie jest skomplikowane, a jakies pojęcie



Rysunek 14.



Rysunek 15.



Rysunek 16.

o ograniczeniach daje rysunek 15, pokazujący nieco dokładniejszy schemat zastępczy takiego elementu.

Dla porządku warto nadmienić, że nie ma tranzystorów IGBT niskonapięciowych ani IGBT małej mocy. Dziś tranzystory IGBT znajdują szereg zastosowań tam, gdzie występują wysokie napięcia i płyną duże prądy. Dostępne są moduły IGBT o napięciach co najmniej kilkaset woltów i prądach nawet setek amperów. Wykorzystywane są m. in. do budowy coraz popularniejszych płyt – kuchni indukcyjnych (ale nie mikrofalowych), falowników, spawarek inwertorowych, nagrzewnic indukcyjnych, przecinarek plazmowych, itd. Nieprzerwalnym ograniczeniem jest w nich maksymalna szybkość przełączania struktury bipolarnej pnp, co najwyżej kilkaset kiloherców, w praktyce do 100 kHz. A wiele współczesnych urządzeń musi pracować przy częstotliwościach wyższych. I wtedy znów trzeba wrócić do tranzystorów polowych.

Znany z wielu źródeł rysunek 16 pokazuje, w jakich zakresach prądów, napięć i częstotliwości do niedawna pracowały poszczególne półprzewodnikowe elementy dużej mocy. W ostatnich latach sytuacja znacząco się zmienia za sprawą pojawienia się nowych elementów SiC i GaN, o czym za chwilę.

### Święty Graal i szybkość tranzystorów

Na początku, w latach 50., gdy pojawiały się pierwsze tranzystory, konstruktorzy urządzeń analizowali, w jakich zastosowaniach dostępne wtedy tranzystory mogą zastąpić lampy elektronowe oraz czy dostępne tranzystory dałoby się wykorzystać w zupełnie nowych urządzeniach, których nie można zbudować na prądożernych i niewygodnych, dużych lampach.

Z upływem czasu naukowcy i wytwórcy półprzewodników opracowywali coraz to lepsze technologie produkcji, co dawało lepsze tranzystory. Na rynku pojawiały się nowe, w tym szybsze i potężniejsze tranzystory. Szybko okazało się, że nie można zrealizować tranzystorów uniwersalnych „do wszystkiego”. Wprowadzano na rynek tranzystory optymalizowane i przeznaczone do konkretnych, ściśle określonych zastosowań. W wielu z nich potrzebne były jak najszybsze tranzystory mocy. Tu należy podkreślić, że w jednych zastosowaniach tranzystory takie miały pracować w trybie liniowym jako wzmacniacze sygnałów w.cz., a w innych jako jak najszybsze klucze – przełączniki załącz/wyłącz. Między innymi pojawiły się tranzystory bipolarne, pracujące przy częstotliwościach ponad 1000 MHz. Jednak w przypadku większych napięć i większych mocy możliwości koncepcji i technologii bipolarnych się wyczerpały. Szczególnie w przypadku bipolarnych tranzystorów przełączających, gdzie kluczowym problemem jest zachowanie nośników prądu w obszarze bazy podczas wyłączania. Nie ulegało wątpliwości, że trzeba odejść od tranzystorów bipolarnych, które okazały się ślepą uliczką i wrócić do polowych. Szybko okazało się, że na pozór bliskie ideału MOSFET-y też mają poważne wady, jeżeli mają pracować jako bardzo

szybkie przełączniki przy dużych prądach i napięciach. A w ciągu ostatnich lat gwałtownie rośnie zapotrzebowanie na coraz szybsze tranzystory przełączające dużej mocy, głównie do wszelkiego rodzaju impulsowych zasilaczy dołączonych do sieci 230 V.

Czyśm bardzo pożądanym, świętym Graalem elektroniki jest dziś bardzo szybki przełącznik – klucz dużej mocy.

W zakresie niskich napięć do 100 V potrzeby zaspokajają klasyczne krzemowe MOSFET-y. Obiektem poszukiwań są jak najszybsze przełączniki – klucze wysokonapięciowe. Moduły IGBT są do tego celu zbyt powolne z uwagi na tzw. ogon prądowy (*current tail*) podczas wyłączenia. Wykonapięciowe krzemowe MOSFET-y okazują się mocno niedoskonałe, bowiem najprościej biorąc: wysokie napięcie pracy wymusza znaczną grubość struktur i tym zwiększa rezystancję w stanie otwarcia. Wprawdzie rezystancję  $R_{DS(on)}$  można dowolnie zmniejszyć, zwiększając powierzchnię struktury, ale wtedy rosną nieuniknione pojemności, co mocno utrudnia szybkie przełączanie i powoduje duże straty dynamiczne.

Aby uzyskać bardzo szybkie wysokonapięciowe tranzystory przełączające, trzeba było szukać innych rozwiązań, które co ciekawe, wcześniej zastosowano w liniowych wzmacniaczach w.c.z. Dlatego choć liniowe wzmacniacze w.c.z. dużej mocy to specyficzny i wąski zakres zastosowań, trzeba się z nimi zapoznać, ponieważ wyznaczyły one drogę do świętego Graala współczesnej elektroniki – do szybkiego przełącznika wysokonapięciowego.

## Tranzystory w.c.z. dużej mocy

Zasadniczo tranzystory mocy pracujące w zakresie mikrofalowym, przy częstotliwościach ponad 1 GHz, interesują tylko wąskie grono profesjonalistów. Podkreśliśmy, że nie są to elementy przełączające, tylko liniowe wzmacniacze sygnałów mikrofalowych o częstotliwościach od pojedynczych gigaherców do nawet setek gigaherców.

Warto przypomnieć, że od wielu lat do wzmacniania mikrofalowych sygnałów małej mocy wykorzystywano odcinek charakterystyki przejściowej o ujemnej rezystancji rozmaitych diod (diody waraktrowe, tunelowe, Gunna, IMPATT, BARITT...). Natomiast wzmacniacze mikrofalowe dużej mocy realizowano wyłącznie na specyficznych mikrofalowych lampach elektronowych, takich jak klustrony, lampy z falą bieżącą (TWT) i magnetrony. Magnetrony o mocy wyjściowej rzędu 1 kilowata są zresztą powszechnie wykorzystywane do dziś w dobrze nam znanych kuchenkach mikrofalowych.

Postęp technologii półprzewodników spowodował, że aktualnie do wzmacniania sygnałów mikrofalowych coraz częściej wykorzystuje się tranzystory, także dużej mocy, we wzmacniaczach o mocach ponad 100 W i przy częstotliwościach grubo ponad 1 GHz.

Dziś na rynku dostępne są rozmaite mikrofalowe tranzystory, takie jak: bipolarne Si, SiGe i GaAs HBT a także unipolarne krzemowe LD-MOSFET oraz MESFET i pHEMT z innych półprzewodników, między innymi z GaAs, ale coraz częściej także z SiC i GaN.

Rozszyfrujmy szczegóły!

W opowieści o poszukiwaniu świętego Graala elektroniki mniej interesuje nas fakt, że dostępne są bipolarne tranzystory krzemowe mocy, mogące wzmacniać sygnały o częstotliwościach do kilku gigaherców. Zupełnie nie interesują nas też skądinąd intrygujące tranzystory SiGe, czyli krzemowo-germanowe, o których do niedawna było głośno i które mogą pracować do 200 GHz. Po prostu nie ma tranzystorów SiGe dużej mocy, choć były próby wprowadzenia takich na rynek. Zasługują na wzmiankę tylko dla porządku: są to tranzystory bipolarne, ale oznaczane są HBT. Chodzi o *Heterojunction Bipolar Transistor* – heterozłączeniowy tranzystor bipolarny. Przypomnijmy, że heterozłączenie to złącze pn 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.

Wzmianka o HBT jest tu potrzebna o tyle, że tranzystory heterozłączeniowe można też realizować z półprzewodników innych niż krzem

i german. I tak oto doszliśmy do innych materiałów półprzewodnikowych, których niektóre właściwości są dużo lepsze niż germanu i krzemu. Często oznaczane są WBG – WideBand Gap, bo mają szerszą przerwę energetyczną niż german i krzem.

Pierwszym znaczącym „innym” półprzewodnikiem był arsenek galu – GaAs. 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.

Pierwsze komercyjne elementy GaAs, a mianowicie podczerwone diody laserowe, zostały wykonane w roku 1962. A pierwszy eksperymentalny bipolarny tranzystor GaAs powstał już w roku 1961. Około roku 1966 powstały pierwsze tranzystory polowe GaAs. Od wczesnych lat 70. zaczęły się pojawiać doniesienia o tranzystorowych wzmacniaczach GaAs. W roku 1976 przedstawiono pierwszy MMIC, czyli mikrofalowy układ scalony GaAs. Dopiero jednak w latach 80. tranzystory GaAs zaczęły się upowszechniać. W latach 80. z arsenku galu wykonywano też bardzo szybkie mikroprocesory, które pracowały m.in. w słynnych swego czasu superkomputerach Cray. Na początku lat 90. przedstawiono wzmacniacz GaAs pracujący w mikrofalowym paśmie W, a więc przy częstotliwościach rzędu 100000 MHz, czyli 100 GHz.

Opracowano liczne tranzystory bipolarne GaAs, ale nie są to „zwykłe” tranzystory bipolarne (BJT), tylko głównie HBT, czyli tranzystory heterozłączeniowe, na przykład AlGaAs/GaAs, mogące pracować aż do 150 GHz. Od dawna z GaAs wykonuje się też tranzystory polowe (FET). Mogą to być klasyczne tranzystory FET normalnie otwarte ze złączem pn, także tranzystory polowe SIT.

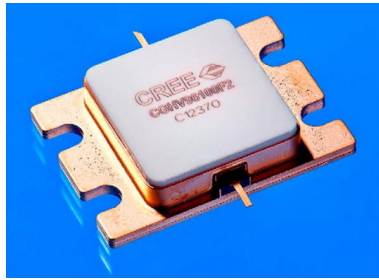
Interesujące są też tranzystory polowe złączeniowe MESFET. W „zwykłych” JFET-ach występuje klasyczne złącze półprzewodnikowe, czyli złącze pn, składające się z dwóch obszarów różnie domieszkowanego półprzewodnika. Natomiast w diodach Schottky’ego wykorzystuje się złącze metal-półprzewodnik (Metal – Semiconductor). I takie złącze może być wykorzystane w tranzystorze polowym. Wtedy zamiast klasycznego JFET-a, otrzymujemy MESFET (koncepcja patentowa Lilienfelda z ilustracji tytułowej najbliższa jest właśnie tranzystorowi MESFET). Wykonano MESFET-y z GaAs, ale są to tranzystory małej mocy, mało i trudno dostępne.

Popularną odmianą i rozwinięciem tranzystora polowego MESFET jest HEMT – High Electron Mobility Transistor. Jego inna, nieco mniej strasząca nazwa to HFET (Heterostructure FET) oraz MODFET (Modulation-Doped FET). HEMT to tranzystor polowy MESFET zawierający w swej strukturze złącze Schottky’ego, a ponadto inne dodatkowe warstwy. Pierwszy tranzystor HEMT zademonstrowano 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 pozwala zdecydowanie zwiększyć szybkość tranzystorów. Najpierw były to tranzystory z GaAs/AlGaAs. 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.

Istnieją tranzystory mocy pHEMT z GaAs i innych materiałów. Dominują HEMT normalnie otwarte (*depletion mode*), jak klasyczne JFET-y. Jednak istnieją też wersje normalnie zatłoczone (*enhancement mode*). Przykładem GaAs E-pHEMT (Enhancement Mode Pseudomorphic HEMT) jest AVAGO ATF-50189. Jest to w zasadzie JFET ze złączem Schottky’ego małej mocy, ale wspominamy o nim, bowiem ma ścisły związek z głównym wątkiem artykułu. Zachowuje się podobnie jak klasyczny MOSFET (o niekorzystnie niskim napięciu progowym  $U_{Gsth}$  typowo 0,38 V). Takich dziwolągów, wykraczających poza klasyczne, popularne tranzystory w zastosowaniach w.c.z. znajdziemy dziś więcej, o czym za chwilę.

W zakresie bardzo wysokich częstotliwości wykorzystuje się też inne materiały półprzewodnikowe. Bipolarne tranzystory

heterozłączone (HBT) można zrealizować z wykorzystaniem m.in. następujących zestawów półprzewodników: InGaAs/InP, InGaP/GaAs, AlInAs/InGaAs i InP/InGaAs. Do realizacji różnych odmian tranzystorów polowych FET są wykorzystywane związki glinu



Fotografia 17.

(Al), galu (Ga), indu (In) z azotem (N), fosforem (P) i arsenem (As). I tak na przykład fosforek indu (InP) pozwala wytworzyć tranzystory i wzmacniacze na zakres częstotliwości ponad 500 GHz.

Aktualnie najbardziej dynamicznie rozwija się rynek wzmacniaczy mocy w.cz. 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 90. Dużym krokiem naprzód było opracowanie technologii wytwarzania warstw GaN na podłożu SiC (węglika krzemu).

Na fotografii 17 pokazany jest mikrofalowy tranzystor mocy produkcji słynnej firmy Cree CGHV96100F2 o rozmiarach około 24x17,5x5 mm. Moc strat wynosi ponad 100 W, napięcie maksymalne 100 V, maksymalny prąd pracy to 12 A. 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, przy napięciu +2 V złącze bramkowe jeszcze (znacząco) nie przewodzi, bo napięcie przewodzenia złącza diodowego GaN jest dużo wyższe niż krzemowej. Prąd nasycenia maksymalnie otwartego tranzystora  $I_{DS}$  typowo wynoszący 26 A określany jest właśnie przy napięciu  $U_{GS} = +2$  V.

Rysunek 18 pokazuje fragment strony internetowej Macom z opisem 500-watowego tranzystora mikrofalowego. Jest to tranzystor HEMT GaN-on-Si, czyli czynna struktura GaN jest umieszczona na podłożu krzemowym (Si). Co prawda zakres pracy to „tylko” 1,2...1,4 GHz, ale moc jest imponująca.

MACOM  
Partners from RF to Light  
Home > Products > RF Power Products > RF Power Transistors - GaN on Si > RF Power Transistors - GaN on Si  
**MAGx-101214-500L00**  
500 W GaN on Silicon Transistor  
The MAGx-101214-500L00 is a gold-metalized matched Gallium Nitride (GaN) on Silicon (Si) RF power transistor optimized for pulsed L-Band radar applications. The MAGx-101214-500L00 is constructed using a thermally enhanced, flanged ceramic package which provides excellent thermal performance. High breakdown voltages allow for reliable and stable operation under compared with older semiconductor technologies.

Features	Specifications	Technical Resources	Packages	Quality	Support	Ordering
----------	----------------	---------------------	----------	---------	---------	----------

Specifications > Supply Voltage: 50 V > PSAT: 500 W > Gain: 16 dB

Rysunek 18.

INTEGRA  
RF POWER DEVICES  
PRODUCTS  
ABO  
**IGN1300CW300** High Power GaN Transistor for Av  
Frequency Low (GHz) 1.30  
Frequency High (GHz) 1.30  
Output Power (W) 300  
Gain (dB) 12  
Efficiency (%) 70  
Pulse width & Duty factor CW  
Voltage (V) 36  
Matcol Input & t

**FEATURES**  
GaN on SiC HEMT Technology  
300W Output Power  
Class AB Operation  
Pre-matched Internal Impedance  
Negative Gate Voltage/Bias Sec

**APPLICATIONS**  
L-Band Avionics

Rysunek 19.

**Microsemi**  
RF Integrated Solutions  
**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.

**CASE OUTLINE**  
551W-FET  
(Common Gate)

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

Rysunek 20.

Innym przykładem może być tranzystor HEMT GaN-on-SiC Integra IGN1300CW300 o mocy ciągłej 300 W, przeznaczony do zastosowania w lotnictwie – rysunek 19. Tu struktura GaN umieszczona jest na podłożu z węglika krzemu.

Rysunek 20 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.

Postęp techniczny powoduje, że na rynku dostępne są tranzystory mikrofalowe o coraz większej mocy i pojawiły się pierwsze realizacje kuchenek mikrofalowych, które nie zawierają lampy – magnetronu.

W kontekście poszukiwania świętego Graala współczesnej elektroniki, informacje o potężnych i bardzo szybkich tranzystorach mikrofalowych z SiC i GaN są wprowadzeniem do tematyki tranzystorów, o których dziś najgłośniejsze. Przypomnijmy, że w zakresie niskich napięć, poniżej 100 V, w większości zastosowań wystarczająco dobrze radzą sobie klasyczne krzemowe MOSFET-y, a poszukiwanym świętym Graalem są wysokonapięciowe tranzystory przełączające dużej mocy o napięciu pracy co najmniej 650 V.

### Przełączające tranzystory SiC i GaN

Prawie wszystkie przeznaczone do liniowych wzmacniaczy mikrofalowe tranzystory mocy SiC i GaN są odmianami złączowych tranzystorów JFET i są normalnie otwarte, co jednak w takich zastosowaniach nie jest żadną przeszkodą. Z węglika krzemu i azotku galu można wykonać podobne wysokonapięciowe tranzystory mocy, optymalizowane nie do wzmacniaczy liniowych, tylko do roli szybkich przełączników.

I takie wysokonapięciowe przełączniki powstały. Ciekawostką jest też fakt, że z węglika krzemu wykonuje się tranzystory bipolarne! Rysunek 21 pokazuje fragmenty katalogu GeneSiC GA506JT12-247. Choć elektrody oznaczone są jak w tranzystorze MOSFET i podana jest rezystancja  $R_{DS(on)}$ , jest to tranzystor bipolarny. Ale to wyjątek.

Rysunek 22 to fragmenty karty katalogowej bardzo poważnego producenta, koncernu Infineon. Karta

**GeneSiC**  
SEMICONDUCTOR  
**GA506JT12-247**  
Normally-OFF Silicon Carbide Junction Transistor  
 $V_{DS} = 1200V$   
 $R_{DS(ON)} = 20m\Omega$   
 $I_D (T_C = 25^\circ C) = 100A$   
 $I_D (T_C > 125^\circ C) = 50A$   
 $h_{FE} (T_C = 25^\circ C) = 85$

TO-247

Drain Current,  $I_D$  (A)

Drain Source Voltage,  $V_{DS}$  (V)

$T_J = 25^\circ C$   
— Meas.  
--- SPICE

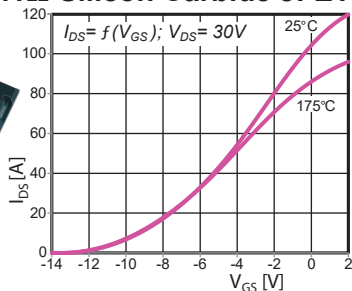
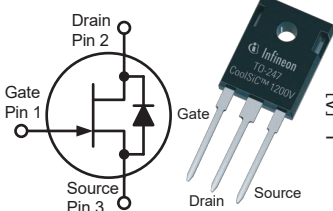
$I_G = 1500 mA$   
 $I_G = 1000 mA$   
 $I_G = 800 mA$   
 $I_G = 600 mA$   
 $I_G = 400 mA$   
 $I_G = 200 mA$   
 $I_G = 0 mA$

Rysunek 21.



### CoolSiC™ 1200V 78A 0.1Ω Silicon Carbide JFET

#### IJW120R100T1



Rysunek 22.

katalogowa tranzystora IJW120R100T1 pochodzi z roku 2013 i nie jest już dostępna na stronie [www.infineon.com](http://www.infineon.com).

JFET-y mocy pojawiły się w ofercie United Silicon Carbide Inc. (USCi), na przykład 1200-woltowy, 38-amperowy UJN1205K. Rysunek 23 pokazuje fragmenty jego karty katalogowej.

Dziś takie tranzystory należy uznać za przestarzałe. Nie wchodząc w szczegóły, problem w tym, że są to nietypowe przełączniki, normalnie otwarte, zatykane „ujemnym” napięciem bramki, jak większość tranzystorów JFET. A takie przełączniki nie mogłyby być atrakcyjną alternatywą dla dotychczasowych przełączników – kluczy, jakimi są klasyczne MOSFET-y oraz identycznie sterowane tranzystory IGBT. Choćby tylko dlatego, że wymagałyby zmiany nie tylko przyzwyczajajeń konstruktorów, ale też wprowadzenia jakichś całkiem nowych sterowników dla takich przełączników.

Jednak zapotrzebowanie na szybkie przełączniki jest ogromne i wciąż rośnie, ale muszą to być tranzystory normalnie zamknięte, otwierane napięciem „dodatnim”.

### Powraca... nowe, czyli normalnie zatkane tranzystory SiC i GaN

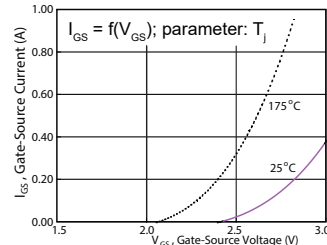
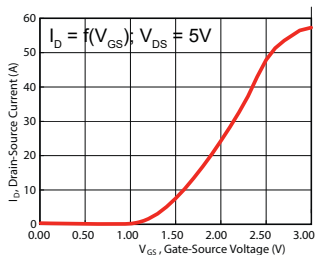
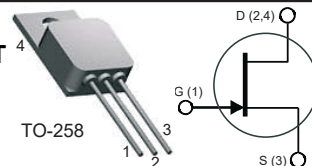
Najprościej mówiąc, potrzebne byłyby dużo szybsze od krzemowych, normalnie zatkane wysokonapięciowe MOSFET-y N. Różne czynniki powodują, że nie mają tu szans tranzystory z GaAs, a użytecznymi materiałami są węgiel krzemu (SiC), a jeszcze lepszym azotek galu (GaN). Jednak realizacja MOSFET-ów z tych materiałów jest z różnych względów trudna, a nawet bardzo trudna. Dlatego najpierw zaczęły się pojawiać pewne nietypowe rozwiązania.

I tak pod adresem: <https://bit.ly/3k3pafv>, można znaleźć karty katalogowe JFET-ów mocy pod marką Micros Components. Jak jednak widać na rysunku 24, charakterystyka przejściowa mało przypomina charakterystykę klasycznego JFET-a, bo przy zerowym napięciu

### micros ADVANCE INFORMATION components SiC JFET ASJE1200R063

#### Normally-OFF Trench Silicon Carbide Power JFET 1200V 60A 0.063Ω

SemiSouth Die Inside



Rysunek 24.

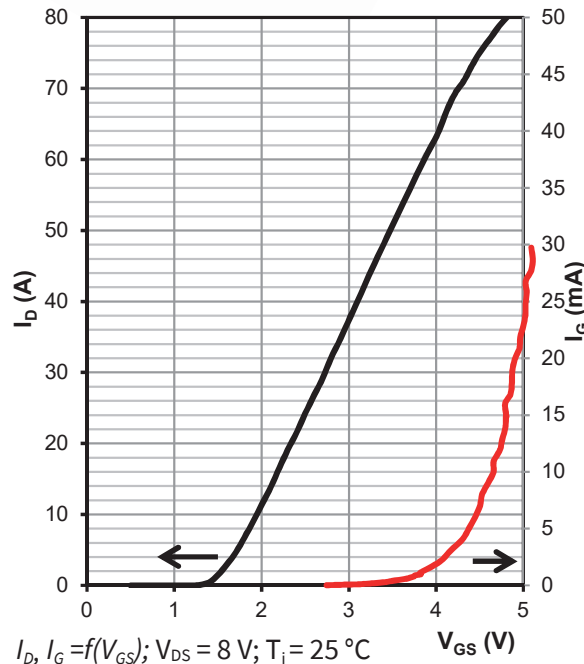
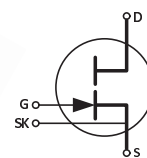
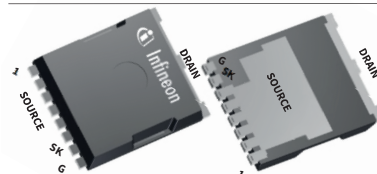
bramki jest on... zatkany. Zaczyna się otwierać dopiero przy dodatnim napięciu bramki około 1 V. Jest to możliwe m.in. dzięki zastosowaniu SiC, przez co napięcie przewodzenia złącza wejściowego jest wysokie, w temperaturze pokojowej wynosi około 2,4 V.

Podobny tranzystor, wykonany z GaN, znajdziemy choćby w ofercie Infineona. Rysunek 25 pokazuje charakterystykę przejściową tranzystora IGT60R070D1, a druga, czerwona krzywa pokazuje... prąd bramki, pojawiający się przy zwiększaniu (dodatniego) napięcia bramki! Podobne tranzystory znajdziemy i u innych producentów. Mamy tu nietypowe tranzystory JFET normalnie zatkane, w których dopuszcza się przepływ prądu bramki.

Na rynku są i inne nieco zaskakujące, skuteczne rozwiązania. Normalnie otwarty tranzystor jest stosunkowo prosty i ma znakomite właściwości jako wysokonapięciowy przełącznik. Wadę, że jest normalnie otwarty, likwiduje dodanie klasycznego, niskonapięciowego

### IGT60R070D1

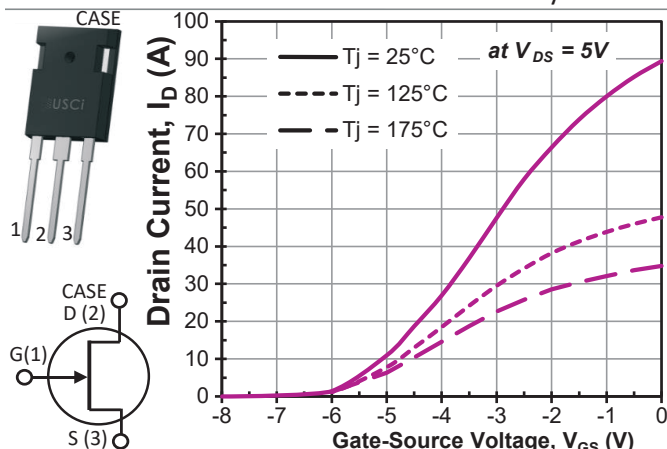
600V CoolGaN™ enhancement-mode Power Transistor



Rysunek 25.

### USCi UJN1205K the power to do more with less

xJ SiC Series 1200V 38A 45mΩ SiC Normally-On JFET



Rysunek 23.

MOSFET-a według **rysunku 26**. Taka hybryda ma istotne zalety: dobre właściwości i „klasyczny” sposób sterowania. Wadą jest konieczność montażu w obu-dowie dwóch struktur.

Przykład kaskody SiC można znaleźć na przykład pod adresem: <https://bit.ly/2BWE1ad>.

Niedawno takie tranzystory GaN + Si wypuściła Nexperia (NXP, dawniej Philips) – **rysunek 27**.

Jeżeli chodzi o prawdziwe tranzystory MOSFET z materiałów WBG, to znana firma Cree, od dawna wyko-rzystująca SiC, między innymi do wczesnych niebieskich diod LED, wprowadziła pierwszy SiC MOSFET w styczniu 2011. Kosztowny jak na tamte lata tranzystor CMF20120D w obudowie TO-247 miał moc 215 W, 1200 V, 42 A ( $T_c=25^\circ\text{C}$ ), 80 m $\Omega$ .

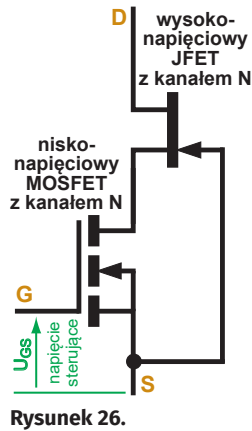
Dzisiaj dostępnych jest wiele wy-sokonapięciowych MOSFET-ów SiC (nie ma niskonapięciowych). Tranzystory takie ma w swej ofercie wiele firm, w tym choćby tacy giganci jak ST czy Infineon. Przykład na **rysunku 28**.

Interesującym pytaniem jest: czy dostępne są też „prawdziwe” MOSFET-y GaN? Czy istnieją tranzystory GaN z izolowaną bramką?

### MOSFET-y i układy scalone GaN?

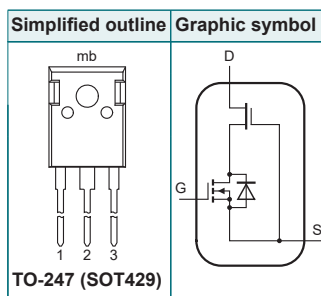
Odpowiedź jest interesująca i zaskakująca. Jeżeli weźmiemy kartę katalogową tranzystora e-GaN z Efficient Power Conversion Corporation (EPC), to zobaczymy tam dobrze znany graficzny symbol MOSFET-a N. Tak, ale zaskakuje informacja, że prąd upływu bramka-źródło w temperaturze  $+125^\circ\text{C}$  maksymalnie może sięgnąć 5 mA, co zupełnie nie pasuje do MOSFET-a, czyli tranzystora z izolowaną bramką. Ze zdziwieniem odnotujemy też, że firma ta ma w ofercie przede wszystkim niskonapięciowe bardzo szybkie przełączające tranzystory z GaN – przykład na **rysunku 29**. Można to dokładniej sprawdzić na stronie: <https://bit.ly/2XpqBv2>.

Jeżeli chodzi o pytanie o „prawdziwe MOSFET-y”, to gdy otworzymy kartę katalogową kanadyjskiej firmy GaNPower International Inc., zobaczymy dziwny symbol tranzystora podobnego do MOSFET-a, ale jakby niekompletny, pokazany na **rysunku 30**. A z zawartych



Rysunek 26.

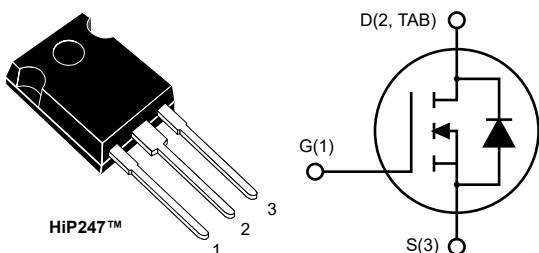
**GAN041-650WSB**  
650V, 35m $\Omega$  Gallium Nitride (GaN) FET in a TO-247 package  
19 May 2020 Objective data sheet



Rysunek 27.



Automotive-grade silicon carbide Power MOSFET  
650V, 100A, 20m $\Omega$  (typ.,  $T_j=25^\circ\text{C}$ )



Rysunek 28.

eGaN® FET DATASHEET EPC2023

**EPC2023 – Enhancement Mode Power Transistor**

$V_{DS}$ , 30 V  
 $R_{DS(on)}$ , 1.45 m $\Omega$   
 $I_D$ , 90 A

EFFICIENT POWER CONVERSION

RoHS Halogen-Free

Rysunek 29.

**GaNPOWER**  
WWW.IGANPOWER.COM

**GPI65060DDK**

### N-channel 650 V 30 A GaN Power HEMT

Rysunek 30.

**GaN Systems**  
**GS66516T**

### Top-side cooled 650 V E-mode GaN transistor

- 650 V enhancement mode power transistor

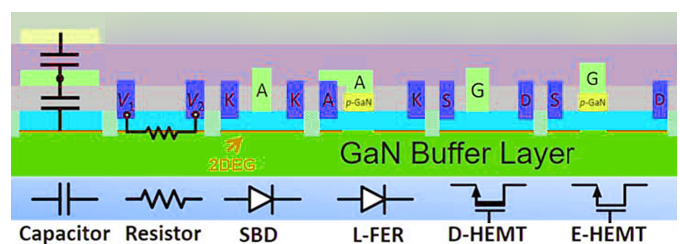
Rysunek 31.

w karcie parametrów wynika, że przy napięciu bramki  $U_{GS}$ , typowy prąd upływu bramki wynosi około 0,3 mA, co też oczywiście nie pasuje do tranzystora MOSFET...

W kartach katalogowych GaN Systems znajdziemy symbol tranzystora jak na **rysunku 31** i wzmiankę, że przy maksymalnym napięciu  $U_{GS}=6\text{ V}$  może popłynąć prąd bramki do 1 mA.

Symbole normalnie zatkaných tranzystorów GaN są różne. Różnie oznaczane są też kaskodowe hybrydy GaN+Si. Dlatego mocno mylić mogą takie różne dziwne oznaczenia – symbole, a także nazwy – opisy: *Enhancement Mode Power Transistor*, *E-mode GaN transistor*, wskazujące na wzbogacanie i to, że w spoczynku tranzystor jest zatkany jak klasyczny MOSFET. Pewne podobieństwa z (lateralny) MOSFET-em są, ale kluczowe szczegóły są inne, zdecydowanie bardziej skomplikowane. Z innych źródeł niż karty katalogowe można się dowiedzieć, że normalnie zatkané przełączniki GaN to nie jest kopia klasycznych MOSFET-ów zrealizowana z GaN. Aktualnie wszystkie normalnie zatkané tranzystory GaN to w istocie **GaN Power HEMT**, czyli specyficzne odmiany tranzystorów złączowych MESFET, czyli też JFET, a nie MOSFET. Garść szczegółów na przykład w pierwszej części tutoriala na stronie: <https://bit.ly/3gpWTgM>.

Jak na razie na rynku nie ma tranzystorów MOSFET GaN. Są one jedynie obiektem eksperymentów i badań laboratoryjnych. Najprościej biorąc, wszystkie dzisiejsze tranzystory GaN to lateralne, poziome



Rysunek 32.

MESFET-y (HEMT), a wersje normalnie otwarte (D – depletion) różnią się od normalnie zatknięch (E – enhancement) obecnością w obwodzie bramki dodatkowej warstwy półprzewodnika p-GaN, co jednak tylko na pozór jest drobną różnicą. Co interesujące, lateralna budowa pozwala budować na powierzchni półprzewodnika nie tylko pojedyncze tranzystory, ale też układy scalone. Ilustruje to **rysunek 32**.

Można powiedzieć, że jak na razie historia zatoczyła koło i w przypadku najszybszych dziś przełączników-kłuczy GaN wróciliśmy do pierwotnej koncepcji sprzed stu lat, przedstawionej przez Lilienfelda.

### Sterowanie SiC i GaN

W każdym razie aktualnie oferowane tranzystory przełączające GaN nie są tranzystorami MOSFET (z izolowaną bramką) i znacznie różnią się od krzemowych MOSFET-ów. Inne są poziomy napięć potrzebnych do sterowania bramką tranzystorów GaN – ogólnie biorąc, 0 V (zatkanie) i 6 V (pełne otwarcie), a to zaletą nie jest z uwagi na bardzo niską wartość napięcia progowego.

Prawdziwe MOSFET-y SiC istnieją, ale wymagają jeszcze innych napięć sterujących. Generalnie do otwarcia MOSFET-ów SiC potrzebne jest napięcie około 18...20 V, czyli znacząco wyższe niż w krzemowych MOSFET-ach (gdzie wynosi 5...12 V), a do szybkiego ich wyłączenia stosuje się niewielkie napięcie ujemne, rzędu kilku woltów.

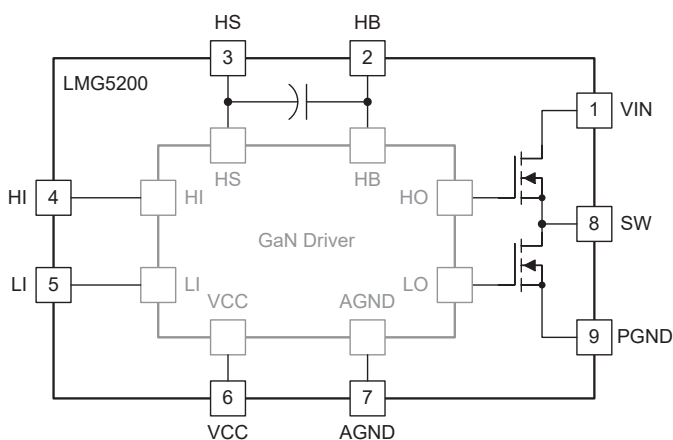
Tylko rozwiązania kaskodowe z oczywistego względu są sterowane praktycznie identycznie, jak klasyczne MOSFET-y.

Nie tylko dlatego omawiane tranzystory SiC i GaN nie mogą tak po prostu zastąpić klasycznych MOSFET-ów. Inne napięcia sterujące bramki to tylko jeden z aspektów zagadnienia. Omawiane nowe tranzystory WBG są dużo szybsze, a przy ogromnej stromości zmian prądu poważnie dają o sobie znać problemy pasożytniczych indukcyjności doprowadzeń samego tranzystora oraz ścieżek i przewodów. Głównie z uwagi na minimalizację pasożytniczych indukcyjności tranzystory mocy GaN najczęściej mają inne obudowy niż klasyczne. Duża stromość impulsów prądu i napięcia drenu poważnie nasila też problemy związane z pojemnością Millera (Crss), co stawia dodatkowe wymagania obwodom sterowania bramki.

Ponieważ w wysokonapięciowych kluczach stosowane są różne rozwiązania technologiczne i konstrukcyjne, inne są ich niektóre ważne właściwości, jak możliwość przewodzenia prądu w „niewłaściwym” kierunku. W niektórych wbudowana jest dioda między źródłem i drenem jak w MOSFET-ach, krzemowa w układach kaskodowych i dioda WBG w innych. Ale istnieją też odmiany, gdzie takiej diody nie ma. Ponieważ są to tranzystory unipolarne z jednym typem nośników, w stanie otwarcia mogą przewodzić prąd obu kierunkach. Jednak szczegóły są różne i konieczne trzeba to uwzględnić w niektórych zastosowaniach, na przykład w tak modnych od niedawna przetwornicach rezonansowych.

Na pewno wykorzystanie tranzystorów SiC i GaN wymaga dodatkowej wiedzy, ale jest ona dostępna w publikacjach wiodących producentów. Konstruktor wykorzystujący krzemowe MOSFET-y dość łatwo dostosuje się do specyfiki SiC i GaN. Ułatwieniem i atrakcyjną alternatywą są też gotowe scalone sterowniki dla nowych tranzystorów oraz tranzystory i półmostki z wbudowanym sterownikiem. Przykładem mogą być elementy oferowane przez TI. **Rysunek 33** pokazuje

### LMG5200 80-V, 10-A GaN Half-Bridge Power Stage



Rysunek 33.

uproszczony schemat wewnętrzny układu LMG5200 – (niskonapięciowego) półmostka GaN z wbudowanym sterownikiem.

### Nadzieje i rzeczywistość

Aktualnie w roli przełączników dominują MOSFET-y superjunction oraz IGBT w zakresie wysokich napięć, dużych prądów i częstotliwości do 100 kHz.

Zamieszczane w niektórych publikacjach porównania właściwości krzemu z SiC i GaN budzi oczekiwania, że tranzystory z tych materiałów WBG będą o wiele lepsze niż dzisiejsze krzemowe.

O wiele, czyli o ile?

Oczywiście nie da się precyzyjnie odpowiedzieć na to pytanie. Porównanie podstawowych parametrów samych materiałów rodzi duże nadzieje, ale trzeba mieć świadomość, że technologia krzemowa jest dobrze opanowana, a technologie WBG jeszcze nie. Dziś najnowsze oferowane krzemowe MOSFET-y w wielu popularnych aplikacjach okazują się niewiele gorsze od oferowanych dzisiaj, znacząco droższych SiC czy GaN. W grę wchodzi nie tylko miara jakości (FOM – Figure of Merit) będąca iloczynem rezystancji  $R_{DSon}$  i ładunku bramki Qg. Duże znaczenie mają różne właściwości dynamiczne i związane z tym specyficzne zagadnienia i problemy. Oraz oczywiście cena.

Wprawdzie nowe technologie WBG wyszły już ze stadium dziecięcego, niemniej jest to początek ich rozwoju i do doskonałości jeszcze daleko. Interesujące jest, czy i kiedy ukażą się „prawdziwe” MOSFET-y GaN, bo współczesne normalnie zatknięte wersje e-GaN HEMT oprócz zalet mają też istotne wady. Jak na razie, rynek tranzystorów GaN i SiC jest nieporównanie mniejszy od rynku MOSFET-ów krzemowych, jednak dynamicznie rośnie, a ceny spadają. Jesteśmy na początku transformacji. Na pewno trzeba interesować się nowymi tranzystorami SiC i GaN, bo wszystko wskazuje, iż to do nich należy przyszłość ważnych gałęzi elektroniki, w szczególności sieciowych przetwornic impulsowych.

Piotr Górecki

O projektach, mini, soft i wielu innych diskutuj  
na <https://forum.ep.com.pl>