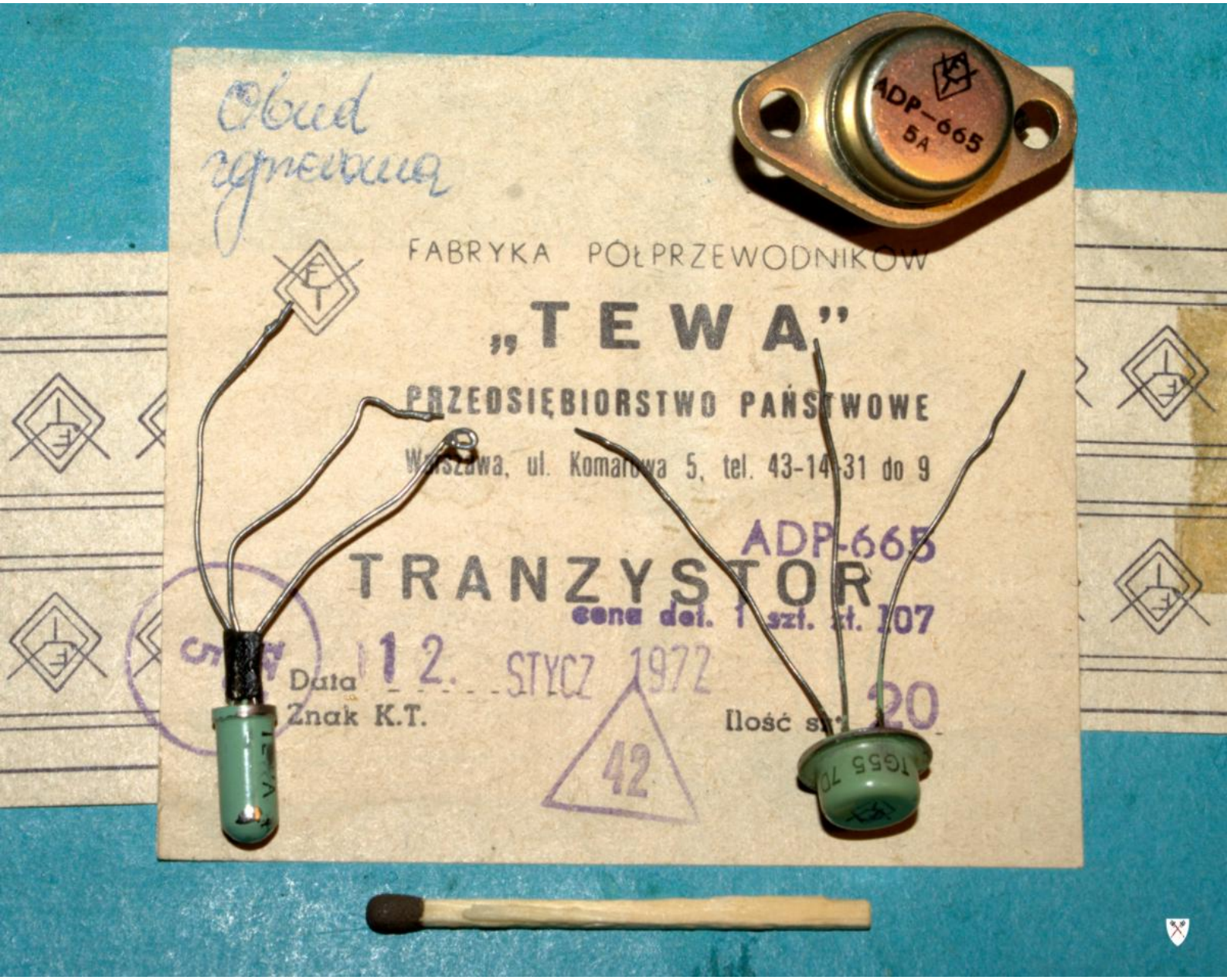
Obud zgniewana
ADP-665
5A
FABRYKA PÓŁPRZEWODNIKÓW
„TEWA"
PRZEDSIĘBIORSTWO PAŃSTWOWE
Warszawa, ul. Komarowa 5, tel. 43-14-31 do 9
ADP-665
TRANZYSTOR
cena det. 1 szt. zł. 107
Data 12. STYCZ 1972
Znak K.T.
Ilość szt. 20
42
1955 70

Adam Cebula „Emocjonalnie o tranzystorach”

Adam Cebula

Foto: Wikipedia

Proszę państwa, oto miś! To znaczy – oto tranzystor. Jak wyglądał wąsaty germanowy protoplasta dzisiejszych miniaturek, można się łatwo przekonać, spoglądając na zdjęcie.

Robiąc małą kwerendę po sieci odkryłem, że – ku mojemu zdumieniu – tranzystory przechodzą do historii. Tranzystor o oznaczeniu TG 5 sprzedaje się po 54 złocisze sztuka, pisze się o nim „legendarny”. Pomyślałem sobie, że czas na kilka osobistych refleksji o technologii, która dziś jest wszechobecna.

Refleksja jest taka, że trzeba było mieć sporo wyobraźni, żeby w tę technologię wierzyć. W półprzewodniki. Startowało to z takiego punktu, że człowiek drapał się po głowie: po co to komu? Prawdopodobnie cała historia miałaby zupełnie inny przebieg, gdyby nie zupełnie inne nastawienia „tamtych ludzi” do nowoczesności i (zapewne) do marzeń. Każdy chciał mieć maleńkie radio. Maleńkie było na tamte czasy, na dzisiejsze – ogromne, wielkości torby na zakupy. Ale przenośne.

O tym, jak wynaleziono tranzystor, o historii jego produkcji, można poczytać w wielu miejscach. Natomiast o tym, jak te pierwsze konstrukcje były kiepskie – mało gdzie. Nie wiem jaki typ historycznie pierwszy pojawił się w Polsce, ale wiem, że pochodził z serii TG1–TG5. Zaczęto je produkować około roku 1960 i zakończono około 1970. Z dzisiejszego punktu widzenia są do niczego. Podstawowe parametry, np. dopuszczalne napięcie kolektor-emiter 10 woltów, powodują, że każdy projektant straci wiarę w siebie. Układ zbudowany na czymś takim właściwie można zasilać bateryjką 4,5 wolta.

Kolejny parametr: dopuszczalna temperatura złącza – 75 stopni. Oznacza tyle, że jak położymy paczkę z takimi tranzystorami na słońcu, mogą tego eksperymentu nie przetrwać. Kolejny parametr: prąd kolektora –10 miliamperów. To jedna setna ampera. Prąd, który jest w stanie wychylać wskazówki mierników, ale już nie potrafi rozżarzyć włókna malutkich żaróweczek, bo nawet te miniaturowe potrzebowały go pięć razy więcej.

Współczynnik wzmocnienia tego tranzystora, tak zwana w żargonie „beta” (od greckiej litery, jaką się go oznacza), wynosił od 9 do 20. Prawie nic na dzisiejsze czasy. Wreszcie parametr, który może być dla nieelektroników tajemniczy mimo prostej nazwy, czyli maksymalna częstotliwość pracy 0,3

MHz, kładła na łopatki możliwość zbudowania przy pomocy tego czegoś przenośnego radyjka.

Ostatnia dana mówi nam, że to coś nadawało się tylko do budowy części wzmacniacza małej częstotliwości. Części, nie całości.

Sygnały radiowe, które odbiera antena dla zakresu fal długich, leżą w przedziale 150-300 kHz, to jest 0,15–0,3 MHz. Nasz tranzystor wbrew stwierdzeniu „dopuszczalna częstotliwość pracy" nie poradzi sobie, bo podana wartość oznacza, że naprawdę dobrze będzie pracował przy częstotliwościach jakieś dziesięć razy niższych. Czyli akustycznych, nie radiowych. Konkluzja jest taka, że w dawnych czasach, gdy nie było porządnych tranzystorów, tor radiowy musiał być zbudowany na czymś innym – na lampach.

Wadą lamp jest duża moc konieczna do żarzenia katody. Mniejszą (ale kłopotliwą) jest to, że pracują one przy stosunkowo wysokich napięciach. Poza tym mają w stosunku do tranzystorów właściwie same zalety. Na przykład wytrzymują krótkotrwałe ogromne przeciążenia, przy odpowiednim doborze czasu i wielkości takiego przeciążenia, praktycznie bez szkody. To powoduje, że za pomocą lamp można np. emitować krótkotrwałe impulsy radiowe o ogromnej mocy. Tak pracują radary. Lampa pracuje przez czas 1 mikrosekundy, po czym następuje przerwa trwająca kilka dziesiątych sekundy. W tym czasie ciepło, które się wydzieliło (głównie na anodzie) jest rozpraszane, czy można powiedzie inaczej, rozchodzi się po konstrukcji i lampa utrzymuje przyzwoitą temperaturę.

Tranzystor „pada" przy bardzo krótkich przeciążeniach. Różnica pomiędzy nim a lampą wynika z tego, że w lampie element nagrzewający się, owa anoda, to kawał blachy. W tranzystorze objętości newralgicznych fragmentów konstrukcji są mikrusie, ich masa to mikrogramy. Pojemność cieplna blachy przy nich jest potężna, nawet jeśli jest to blaszka o grubości folii. Ponadto blacha ulega uszkodzeniu przy temperaturze dobrze ponad 500 stopni Celsjusza, a tranzystor germanowy, bo z takiego materiału były robione te pierwsze, pada po przekroczeniu 75 stopni Celsjusza.

W rezultacie urządzenia z tranzystorami stawiały przed ludźmi, którzy się nimi zajmowali, zupełnie nowe wymagania, jeśli chodzi o serwis i budowę. W urządzeniu lampowym, jak się nam obsunął śrubokręcik, to zaświeciła na moment siatka lampy i na tym się problem kończył, w tranzystorowym niekontrolowane zwarcie praktycznie zawsze prowadziło do rozległych uszkodzeń.

Niska dopuszczalna temperatura przyrządów powodowała problemy podczas lutowania. Przegrzewanie elementów podczas operacji do tej pory zdarzało się wyjątkowo, teraz trzeba było mocno uważać. Trzeba było zmienić oprzyrządowanie, np. wprowadzić zasilacze z zabezpieczeniami przeciwzwarciowymi.

Dopiero wprowadzenie w okolicy połowy lat 60. „nowoczesnych" tranzystorów na „wysokie" częstotliwości (cudzysłowy odnoszą się do współczesnych czasów, takich jak TG 40, który miał częstotliwość graniczną 40 MHz) pozwalało zbudować „prawdziwe" radio tranzystorowe, bez lamp. Gdzieś w tych okolicach pojawiły się też rewelacyjne, jak na tamtą rzeczywistość, tranzystory mcz TG 50, na których dawało się zbudować wzmacniacz mocy, który mógł zasilać miniaturowy głośnik.

Warto się chwilę zastanowić: trzeba było sporo entuzjazmu, przynajmniej na początku, by się wynalazkiem pod nazwą tranzystor germanowy w ogóle zajmować. Od pierwszych konstrukcji do takiego opanowania technologii, żeby dało to wyraźny zysk, musiało minąć kilka lat. Dopiero gdy weszły owe niezwykłe półprzewodniki pracujące na częstotliwościach radiowych, i tranzystory, które wytrzymywały trochę więcej niż 10 woltów i kilka miliamperów prądu, można było zbudować radyjko wielkości mydelniczki, które odbierało fale długie, średnie i nic więcej. Ale to już miało sens, bo nie było w tym żadnych lamp.

Jaka była zaleta tranzystorów, że konstruktorzy nie powiedzieli producentom „dopóki nie zrobicie czegoś o sensownych parametrach, nie zawracajcie nam głowy”? Ograniczenie mocy. Lampy potrzebują, by dobrze pracować, kilka watów najmniej – tranzystor kilka setnych części wata. Czyli spadek mocy wynosił lekką rączką licząc 100 razy. To chyba tłumaczy, dlaczego nie ciepnięto owego produktu od razu do kosza. Wbrew pozorom miniaturyzacja, moim subiektywnym zdaniem, nie była zasadniczym powodem. Objętość, jaką zajmował tranzystor germanowy, na początku była może dwa trzy razy mniejsza od objętości lampy, a to z powodu trudności z lutowaniem, trzeba było zostawić długie nóżki. Dopiero za jakiś czas nauczono się je zwijać. A gdyby nie to drastyczne ograniczenie mocy, nic by z miniaturyzacji nie wyszło, bo albo „gotowałby się” sam tranzystor, albo elementy wokół niego.

Jak był to kłopotliwy element, można się przekonać, czytając stare poradniki dla radioamatorów. Pobrzmiewa w nich moc irytacji wywołanej legendarną wręcz wrażliwością półprzewodników. Tak na marginesie – warto przypomnieć sobie o odporności urządzeń lampowych. Nie na darmo Ludowe Wojsko Polskie broniło się przed tranzystorami. Wejście odbiornika, gniazdo, do którego podłączamy antenę, w technologii lampowej można było w wojskowym wykonaniu podłączyć do sieci 230 woltów (wówczas 220) . Można było być pewnym , że w wyniku takiego eksperymentu najwyżej wywali bezpieczniki, odbiornikowi nic się nie stanie. Oczywiście niestraszny mu impuls elektromagnetyczny. Podejrzewam, że te konstrukcje przetrwałyby wybuch dowolnie silnej bomby jądrowej, byleby nie znalazły się w strefie, w której zostałyby zniszczone mechanicznie. I tak sobie myślę, że jak rozmaici mądrale nas dziś straszą armagedonem na skutek burzy słonecznej, to nie zdają sobie sprawy z tego, że wspomniane obsunięcie się śrubokręta dostarczało do siatki lampy tysiące razy większą energię niż realnie występujące impulsy wywołane nawet uderzeniami piorunów. Wrażliwość urządzeń elektronicznych jest wynikiem technologicznego niechlujstwa, a nie cechą, której nie da się zneutralizować.

Lampy długo zachowały zasadniczą przewagę nad tranzystorami. Paradoksalnie dotyczyło to układów, w których chodziło o mikrusie co do mocy i napięcia stopnie wysokiej częstotliwości. Długo tzw. głowice telewizyjne musiały być lampowe. Dlaczego? Wspomniana niezwykła konstrukcja TG 40 kończyła się tak naprawdę w okolicy kilku MHz. Sygnały telewizyjne to częstotliwości wówczas w okolicy 100 MHz. Tylko lampy pozwalały je wzmacniać.

Inna cecha tranzystorów rugowała je z „poważniejszych” układów odbiorników komunikacyjnych pracujących np. na statkach obsługujących „służbową” łączność. To była silna nieliniowość charakterystyki bazowej. Prąd bazy zmieniał się nieliniowo z napięciem. To powodowało, że tranzystor potrafił zmieszać ze sobą sygnał silnej i słabej radiostacji tak, że nie dało się później nijak ich rozdzielić. W stopniach wejściowych ważnych odbiorników stacyjnych długo musiały pracować lampy. Pomimo że były już świetne tranzystory, które radziły sobie doskonale z wysokimi częstotliwościami.

Innym newralgicznym parametrem była moc strat. Co to jest? Prąd, płynąc przez urządzenie (dowolne), wydziela ciepło. Spełniona jest zasada zachowania energii. Co zostało doprowadzone z zasilnia, musi zostać odprowadzone albo w postaci innej formy energii, np. (w silniku) mechanicznej, albo w postaci ciepła. Tranzystor może się jedynie grzać. Owa moc strat określa, ile watów ciepła może się wydzielić w określonych warunkach. Te warunki to kąpiel olejowa, która utrzymuje temperaturę powierzchni 25 stopni Celsjusza.

W takich warunkach nasz TG2 i jemu podobne wytrzymywały wydzielanie mocy 75 miliwatów. To siedem i pół setnych wata. Bardzo mało. Tym bardziej że nawet jeśli wnętrze (powiedzmy) radia się nie ogrzało, to temperatura powierzchni tranzystora była w powietrzu znacznie wyższa, niż w owej kąpieli.

Przedmiotem pożądania majsterklepków były tranzystory takie jak TG 70. Na swoje czasy niemal kosmiczne urządzenie, można było na tym zbudować wzmacniacz do gitary elektrycznej. Moc strat tych tranzystorów wynosiła 10 watów. Oczywiście przy utrzymaniu temperatury obudowy 25 stopni. Oznaczało to, że w układzie tzw. wzmacniacza przeciwsobnego pracującego w klasie B (cokolwiek to znaczy) z pary takich TG 70 (trudno, do zbudowania stopnia przeciwsobnego potrzeba nad dwóch) można by wycisnąć aż 50 watów mocy elektrycznej zasilającej kolumny. Po prostu bębenki w uszach pękają. Trzeba by pewnie chłodzić wzmacniacz wodą z lodem, ale teoretycznie było to możliwe.

Gdy nasze dzielne i socjalistyczne zakłady wypuszczały pierwsze TG 1 i TG 5, to na zgniłym Zachodzi produkowano już pierwsze układy scalone na krzemie. Na dzień dobry byliśmy o jedną epokę technologiczną do tyłu. Tak, początek lat 60. to już układy scalone. W 1958 roku pierwszego scalaka skonstruowali Jack Kilby i Robert Noyce (http://pl.wikipedia.org/wiki/Uk%C5%82ad_scalony).

Krzem jako materiał półprzewodnikowy trzyma się znakomicie do dnia dzisiejszego. Powodem tego jest znaczne polepszenie parametrów urządzeń. Tranzystory tzw. małej częstotliwości, małej mocy, mają moce strat 0,3 wata, prądy 100 mA, czyli 10 razy większe, niż pierwsze z serii TG. Być może postęp razy dziesięć nie imponuje, ale powiem tyle, że to z dużym zapasem spełnia potrzeby projektanta. A jeśli potrzeba więcej, to mamy inne tranzystory.

To, co krzem zmienił dramatycznie, to różne parametry pasożytnicze, tzw. prądy zerowe, które stają się tak małe, że można je w projektowaniu pominąć.

Temperatura pracy podniosła się od 125 stopni Celsjusza dla urządzeń, gdzie nie jest ona krytyczna (np. stopnie wejściowe radia), do 175 C w tranzystorach pracujących z dużą mocą. To także wbrew pozorom dramatyczny skok. Wbrew pozorom, bo z 75 stopni Celsjusza do 125 nie ma nawet „razy dwa”, ale z punktu widzenia projektanta różnica jest zasadnicza. Po prostu we wnętrzu urządzenia może panować temperatura nawet +70 stopni, i wówczas dla urządzeń germanowych nie zostaje żaden „luz”. Dla krzemowych możemy zaprojektować ciągle radiatory i sprawić, by to jakoś działało.

Dla maniaków głośnego brzmienia w epoce krzemowej „kultowy” stał się tranzystor 2N 3055. Moc strat ok. 125 watów, praktycznie można było uzyskać ok. 40 watów. Praktycznie można było na parze takich tranzystorów zbudować wzmacniacz ok. 200 watów i to już było naprawdę głośno.

W epoce krzemowej pojawiły się tranzystory polowe. To była gratka dla krótkofalowców, wszelkiej maści konstruktorów sprzętu radiowego. Dlaczego? Tranzystor polowy to coś zupełnie innego. To – można powiedzieć – kopia lampy elektronowej, ale w krzemie. Obwód sterujący nie pobiera prądu jak siatka (odpowiednio spolaryzowanej) lampy. Pracuje do wysokich częstotliwości. Udało się pokonać w nim kłopoty z nieliniowością charakterystyki. Wreszcie udało się zbudować dwubramkowe tranzystory, które robią nam za układy mieszające częstotliwości. To należałoby wyjaśnić, ale po prostu tranzystory polowe załatwiły kłopoty z półprzewodnikami, jakie występowały w technice radiowej.

Pewnie trochę niespodziewanie tranzystory polowe wkroczyły do techniki wielkich mocy. Dokładniej te urządzenia są układami scalonymi, zespołami na oko pół miliona elementarnych tranzystorów połączonych równolegle, ale w sklepie kupujemy „tranzystor”, ma to trzy nogi i może przełączać prądy kilkudziesięciu amperów. Cymes w tym, że taki tranzystor w stanie przewodzenia ma bardzo mały opór, spadek napięcia na nim jest minimalny. Możemy robić świetne przetwornice oraz inne urządzenia, np. tzw. falowniki. To dzięki nim na przykład możemy bawić się zasilanymi bateryjkami (akumulatorami litowo-jonowymi), dronami, które latają i fotografują uczestników wesela. Silniki kręcące śmigłami działają właśnie dzięki wyśrubowanym parametrom tranzystorów, zwanych też żargonowo mosfetami (od MOS-FET) mocy.

Inspiracją do napisania tego tekstu było wygrzebanie w sieci danych o współczesnych tranzystorach na jeszcze innym półprzewodniku, którego przez długi czas nie dawało się opanować: SiC. Węglik krzemu (po prostu karborund) był do tej pory używany do produkcji osełek. O tym, że teoretycznie mógłby powstać z niego wspaniały półprzewodnik, wiedziano od dawna, ale od niedawna udaje się dopiero zrobić z niego coś praktycznie. Są w sprzedaży już diody, tranzystory i inne przyrządy, takie jak tyrystory. Ceny wydają się zaporowe. Na złotówki 200–300 PLN za sztukę; drogie tranzystory krzemowe kosztują kilka złotych. Ale też parametry tych urządzeń są nieco kosmiczne. Zresztą NASA wyprodukowała (?) pierwsze egzemplarze, przynajmniej tak wynika z niektórych materiałów. Co może najbardziej szokujące dla elektronika, pracują one w temperaturach do 600 stopni Celsjusza. Znów przy postępie w informatyce nawet kilkakrotny wzrost dopuszczalnej temperatury może się wydać niezbyt imponujący, ale to temperatura przy jakiej stale tracą wytrzymałość, a przedmioty zagrzane tak wysoko zaczynają widocznie świecić.

Dla inżyniera projektującego np. elektronikę samochodową po prostu świetne urządzenie. Gdybyśmy wsadzili takie tranzystory do domowego wzmacniacza akustycznego, mielibyśmy kłopot z dobraniem materiałów i na obudowę, i na płytki drukowane, które zniosłyby sąsiedztwo elementów rozgrzanych do tak wysokiej temperatury. Tranzystory te „z urodzenia” pracują przy bardzo wysokich napięciach rzędu 1200 woltów, mają duże prądy i jednocześnie częstotliwości graniczne.

Sprawą, o której kilka razy pisałem, jest to, że urządzenia z użyciem SiC są zazwyczaj dostępne w obudowach pracujących do około 200 stopni Celsjusza . Są wówczas znacznie tańsze. Ich parametry zwykle pozwalają na budowę urządzeń energetycznych. Podstawowe dane dla pierwszego z brzegu tranzystora wyciągniętego z sieci, SCH2080KE, to napięcie pracy 1200 woltów, prąd 40 amperów i rezystancja w stanie włączenia 80 miliomów. Przy pełnym prądzie na tranzystorze wydziela się jakieś 128 watów mocy cieplnej. Moc strat nie wyda się pewnie rewelacyjna (ok. 260 watów), lecz trudno mi sobie wyobrazić, do czego bym potrzebował takiej mocy. Częstotliwości pracy to megaherce.

Aby zobrazować, jak się ma nowa technologia do starej krzemowej, tranzystor 2N 3055 miał maksymalne napięcie (kolektor emiter) 60 woltów, maksymalny prąd kolektora 15 amperów. Maksymalna moc przełączana teoretycznie ~ 900 watów. Nasz tranzystor SiC teoretycznie może przełączać 48000 watów. W praktyce możemy wypaść za tzw. obszar bezpiecznej pracy, ale chyba obrazuje to, co się zmienia. Dla ilustracji dodam, że moc np. pralki elektrycznej to ok. 2000 watów, a tak zwana moc przyłączeniowa mieszkania to jakieś 5000 watów.

Mądrej konkluzji nie będzie. Jedna taka, że niektóre technologie tak mają, że z zapasem spełniają nasze marzenia. Tranzystor przeszedł drogę od czegoś i drogiego, i byle jakiego, dziwoląga, z którym trudno coś zrobić, do wszechobecnego komponentu naszego życia. Dziś każdy nosi ze sobą mnóstwo tranzystorów, jeśli nie w smartfonie, to przynajmniej w zegarku.

Druga refleksja jest taka, że mamy czasy, gdy części maszyn stają się elementem emocjonalnego życia być może wąskich, ale ważnych grup społecznych. Elektronicy są ważni, choć spadli dziś z piedestału, ale proszę mi wierzyć, bez nich nie byłoby elektroniki nas otaczającej. A tranzystorom przysługuje przymiotnik „legendarne”. Dowód – mają na Wikipedi swoje strony:

http://pl.wikipedia.org/wiki/2N3055

Adam Cebula