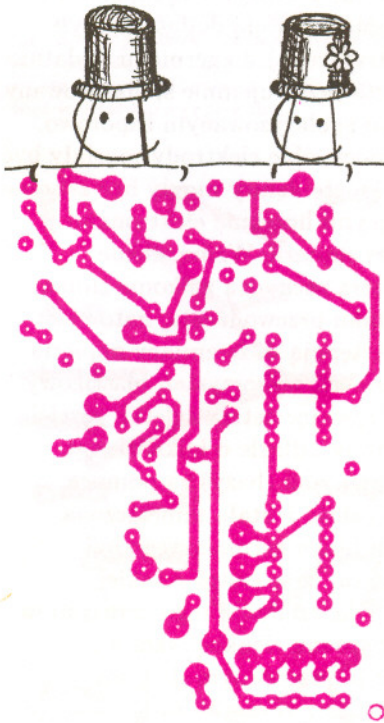


Zbudowanie pierwszego tranzystora i co z tego wynikło

Paweł TRAUTMAN

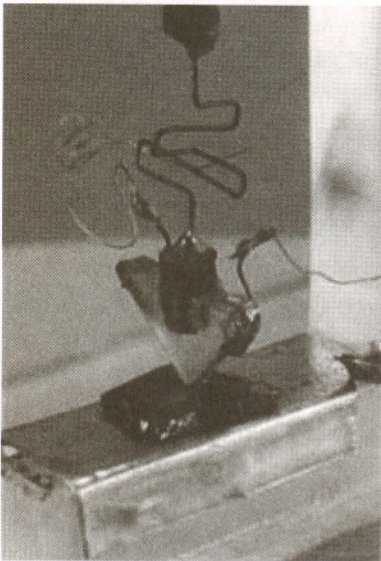


Niemalże cudem współczesnej techniki jest to, że wybierając numer telefonu, możemy w ciągu zaledwie kilkunastu sekund uzyskać połączenie z jednym z setek milionów numerów dostępnych na świecie. Odpowiedzialne za to są centrale telefoniczne składające się z tysięcy przełączników. Aby realizować miliony połączeń, przełączniki te muszą być niezawodne i zużywać niewiele energii. Pierwsze sieci telefoniczne w latach międzywojennych wykorzystywały przełączniki mechaniczne (przełączniki) i lampy elektronowe dla wzmacniania i przekazywania sygnałów na znaczne odległości. Wielka firma amerykańska *American Telephone and Telegraph Company (AT&T)*, założona przez Aleksandra Grahama Bella, przewidywała pod koniec drugiej wojny światowej, że jej sieć telefoniczna będzie musiała być bardzo rozbudowana, aby obsłużyć rosnące zapotrzebowanie na połączenia telefoniczne. Przełączniki nie wystarczały do zaspokojenia tych rosnących potrzeb. Powstała konieczność skonstruowania nowych małych przełączników, pozbawionych części ruchomych i zużywających małe ilości energii.

Badania i rozwój od dawna były mocną stroną AT&T. Już w roku 1925 utworzyła ona wydzieloną, niezależną jednostkę badawczą, Laboratoria Bella (*Bell Telephone Laboratories*). Laboratoria szybko się rozrastały i przeniosły ze swojej pierwotnej siedziby na West Street na Manhattanie w Nowym Jorku do Murray Hill w New Jersey. Marvin Kelly, dyrektor do spraw badań w tych laboratoriach, rozpowszechniał memorandum, w którym przekonywał, że mechaniczne przełączniki muszą wkrótce zostać zastąpione przez nową technologię. Dla realizacji tego zadania w lecie 1945 roku utworzył grupę badawczą, która miała zajmować się badaniem własności półprzewodników. Długofalowym zadaniem tej grupy było stworzenie przyrządu półprzewodnikowego, który mógłby zastąpić lampę elektronową, triodę. Szefem tej grupy został fizyk teoretyk William Shockley, a jej najważniejszymi członkami okazali się: John Bardeen, również teoretyk, oraz eksperymentator Walter Brattain.

Punktem wyjścia do skonstruowania tranzystora było poznanie prostujących własności złącz metal-półprzewodnik, nazywanych diodami Schottky'ego. W latach 30. i 40. były prowadzone w Wielkiej Brytanii i USA bardzo intensywne badania nad wykorzystaniem fal radiowych do zdalnego wykrywania samolotów. Spowodowane one były potrzebą obrony przed licznie przeważającym lotnictwem niemieckim. Badania te zaowocowały skonstruowaniem radarów pracujących na krótkich falach radiowych, mikrofalach, dających możliwość śledzenia samolotów na znacznych odległościach i z dużą precyzją. Źródłem fal radiowych były specjalne lampy elektronowe, magnetrony, natomiast za detektory posłużyły złącza: metal-german. Te germanowe diody ostrzowe przewyższały pod względem szybkości działania lampę elektronową – diodę. Skonstruowanie odpowiednika lampy elektronowej w postaci diody półprzewodnikowej sugerowało możliwość skonstruowania półprzewodnikowego odpowiednika lampy wzmacniającej – triody, w której prąd regulowany jest przez napięcie przykładane do siatki. Należało tylko znaleźć analog siatki odpowiedni do zastosowania w przypadku diody półprzewodnikowej.

W germanie typu n przepływ prądu związany jest z ruchem ujemnie naładowanych elektronów. Kiedy metalowa elektroda, przytknięta do takiego kryształu, jest spolaryzowana ujemnie, odpycha ona elektrony i nie następuje przepływ prądu. Kiedy elektroda spolaryzowana jest dodatnio, przyciąga ona elektrony i następuje przepływ prądu. To zjawisko odpowiedzialne jest za



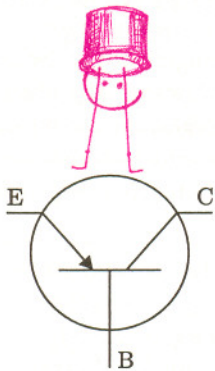
Fotografia pierwszego tranzystora zbudowanego w Bell Labs w grudniu 1947 roku.

prostujące własności złącza metal-półprzewodnik. Polaryzacje są przeciwne, gdy w kryształach znajdują się dodatnio naładowane dziury. Badacze z grupy Shockleya do budowy pierwszego tranzystora wykorzystali zaporowo (ujemnie) spolaryzowane złącze między metalowym kontaktem (kolektorem) a germanem typu n. W złączu tym nie płynął prąd. Aby wywołać przepływ prądu, zbliżyli oni do tego kontaktu drugą elektrodę (emiter) spolaryzowaną dodatnio, czyli w kierunku przewodzenia, która dostarczyła (wstrzyknęła) do germanu dodatnio naładowane dziury. Dziury te zostały przyciągnięte przez ujemnie spolaryzowany kolektor, tak że nastąpił przepływ prądu w złączu spolaryzowanym zaporowo. Aby w takim przyrządzie uzyskać wzmocnienie mocy, obie elektrody musiały być umieszczone bardzo blisko siebie, tak aby wstrzyknięte dziury mogły być zebrane przez kolektor, zanim zrekombinują z przeważającymi liczebnie elektronami. Prąd kolektora jest w przybliżeniu równy prądowi emitera. Wzmocnienie

mocy jest spowodowane tym, że w obwodzie emitera zachodzą znikome zmiany napięcia, bo złącze to jest spolaryzowane w kierunku przewodzenia, natomiast w zaporowo spolaryzowanym złączu kolektora występują duże zmiany napięcia. Do budowy pierwszego tranzystora Brattain i Bardeen wykorzystali plastikowy klin, na którego boki nakleili pasek złotej folii. Używając ostrza żyłki, rozciągli złoto na czubku tego klina, uzyskując dwie elektrody odległe o kilkadziesiąt mikrometrów. Klin został przyciśnięty do bloku germanu (bazy) za pomocą sprężyny z powyginanego spinacza do papieru, a całość została umieszczona w bloku z plastiku w kształcie litery U. Do spodu bloku germanowego był przymocowany trzeci kontakt elektryczny, czyli baza. Tranzystor o takiej konstrukcji nazywa się tranzystorem ostrzowym. Dla działania tego tranzystora sprawą kluczową była obecność na powierzchni germanu cienkiej warstwy inwersyjnej, czyli warstwy o przewodnictwie typu p, przeciwnym do typu przewodnictwa objętościowego kryształu. Z konstrukcją tranzystora ostrzowego wiąże się symbol elektryczny tranzystora bipolarnego, to znaczy tranzystora, w którym są dwa złącza pomiędzy półprzewodnikami o przeciwnym typie przewodnictwa. Wkrótce po skonstruowaniu pierwszy tranzystor został wykorzystany do budowy wzmacniacza akustycznego podłączonego do mikrofonu i słuchawek. Działanie tego pierwszego na świecie wzmacniacza tranzystorowego zostało zademonstrowane szefem Laboratoriów Bella 23 grudnia 1947 r. Tę datę przyjmuje się oficjalnie za datę wynalezienia tranzystora. Odkrycie to zostało podane do publicznej wiadomości 30 czerwca 1948 r. na konferencji prasowej w głównej siedzibie Laboratoriów Bella na West Street. *The New York Times* z 1 lipca 1948 r. donosił o tym wydarzeniu na 46. stronie w dziale *The News on Radio* po notatce o zmianach w ramówce programu radiowego. Zainteresowanie prasy nowym wynalazkiem było niewielkie. Skonstruowanie tranzystora zostało uhonorowane werdyktem Szwedzkiej Akademii Nauk, która w 1956 roku przyznała Nagrodę Nobla z fizyki Bardeenowi, Brattainowi i Shockleyowi za skonstruowanie tranzystora i za badania w dziedzinie fizyki półprzewodników.

Pierwszymi urządzeniami wykorzystującymi tranzystory były aparaty słuchowe. Alexander Graham Bell doświadczył tragedii utraty słuchu we własnej rodzinie i poświęcił wiele czasu i pieniędzy na badania nad głuchotą. Dla uczczenia pamięci swojego założyciela Laboratoria Bella nie pobierały żadnej opłaty licencyjnej od tranzystorów, które miały być wykorzystane w aparatach słuchowych. Jedną z pierwszych firm produkujących tranzystory do aparatów słuchowych był *Raytheon*, gigant amerykańskiej elektroniki zbrojeniowej, znany między innymi z przeciwrakietowych systemów obronnych Patriot. *Raytheon* w końcu lat czterdziestych wprowadził na rynek pierwszy tranzystor ostrzowy o symbolu CK703.

Tranzystory ostrzowe były trudne w produkcji, a ich parametry elektryczne niezbyt dobre i mało stabilne ze względu na konstrukcję wykorzystującą niestabilne dociskane złącza metal-półprzewodnik. W 1950 roku Shockley skonstruował pierwszy tranzystor złączowy składający się z cienkiej warstwy germanu typu p, pełniącej rolę bazy, umieszczonej między grubszymi warstwami



Symbol tranzystora bipolarnego p-n-p.



Rozwiązanie zadania M 896.

Załóżmy, że dla pewnego wielościanu wypukłego teza zadania nie jest spełniona. Jeśli oznaczymy przez S_n liczbę ścian będących n -kątaami, a przez W_n – liczbę wierzchołków, z których wychodzi n krawędzi, to oznacza to, że $W_3 = S_3 = 0$. Mamy następujące dwa wzory:

$$2K = 3W_3 + 4W_4 + \dots$$

oraz

$$2K = 3S_3 + 4S_4 + 5S_5 + \dots$$

(pierwszy otrzymujemy, zliczając krawędzie wychodzące z wierzchołków, a drugi – zliczając krawędzie na wszystkich ścianach; wynik jest za każdym razem dwa razy większy, niż powinien być, bo każda krawędź ma dwa końce i przylega do dwóch ścian). Wynika z nich, że w naszej sytuacji

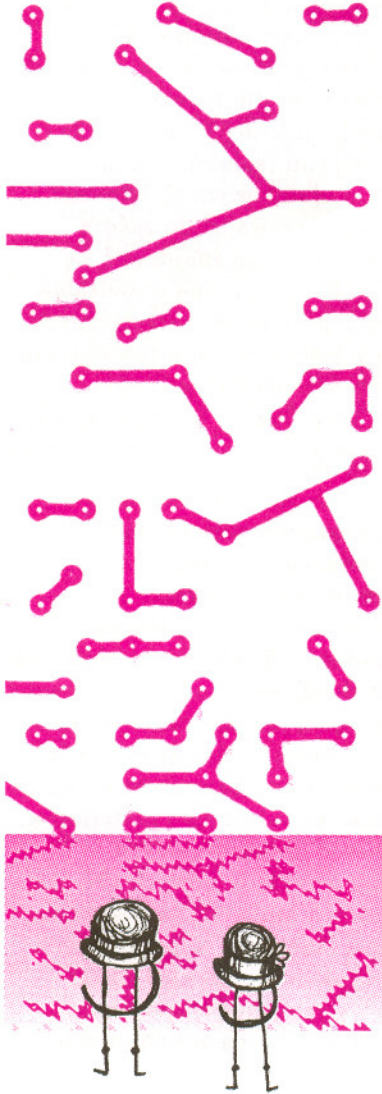
$$\begin{aligned} 2K &= 4W_4 + 5W_5 + \dots \geq \\ &\geq 4(W_4 + W_5 + \dots) \geq \\ &\geq 4W \end{aligned}$$

i analogicznie $2K \geq 4S$. Wtedy jednak $4W - 4K + 4S \leq 0$, co przeczy wzorowi Eulera.



Rozwiązanie zadania F 509.

Wrażenie barwy jest związane z częstotliwością fali świetlnej, która w danym przypadku nie ulega zmianie. Zmienia się prędkość rozchodzenia się fali w danym ośrodku, i odpowiednio zmienia się też długość fali światła. Nurek będzie więc widział barwę czerwoną.



Rozwiązanie zadania F 510.

Promienie różnych barw różnie załamują się w soczewce oka, niebieskie silniej niż czerwone. Jeżeli w jednakowej odległości znajdują się dwie rurki neonowe – czerwona i niebieska, to przy oglądaniu czerwonej rurki soczewka źrenicy akomoduje się i staje się bardziej wypukła niż przy oglądaniu rurki niebieskiej. Z drugiej strony, gdy patrzmy na bliskie przedmioty, to soczewka staje się bardziej wypukła niż wtedy, gdy patrzmy na przedmioty odległe.

typu n spełniającymi rolę emitera i kolektora. Tranzystor ten miał lepsze i bardziej stabilne parametry elektryczne od tranzystora ostrzowego, ale był trudny w produkcji, gdyż wymagał wyhodowania kryształu z warstwami o różnym typie przewodnictwa oraz trudnego do wykonania kontaktu elektrycznego do cienkiego obszaru bazy. W roku 1952 John E. Saby z *General Electric Co.* skonstruował pierwszy złączowy tranzystor stopowy. Jego konstrukcja polegała na wtopieniu kulek indu (domieszki, która czyni german półprzewodnikiem typu p) po przeciwnych stronach cienkiej płytki germanu typu n. Tranzystor stopowy stał się pierwszym masowo produkowanym typem tranzystora.

Do roku 1954 tranzystor był ciekawostką laboratoryjną, mającą nieliczne zastosowania w aparatach słuchowych i wojskowych urządzeniach łączności. Zaczęło się to nagle zmieniać, gdy mała firma z Dallas, *Texas Instruments*, rozpoczęła produkcję tranzystorów złączowych do odbiorników kieszonkowych. Wkrótce jednak nieoczekiwanie porzuciła ten rynek, co wykorzystwała mała firma japońska *Sony*. Kiedy *Sony* rozpoczęła w latach sześćdziesiątych produkcję tranzystorowych odbiorników telewizyjnych, amerykańska dominacja w elektronice powszechnego użytku zaczęła zanikać. W roku 1956 *IBM* wykupiła licencję na produkcję tranzystorów i wkrótce zbudowała pierwszy komputer na tranzystorach. W tym czasie prezes *IBM*, Thomas J. Watson, przewidywał: „Sądzę, że jest zapotrzebowanie na może pięć komputerów na świecie.”

W dalszym rozwoju tranzystora german został zastąpiony krzemem, półprzewodnikiem, który ma szerszą (1,1 eV) przerwę energetyczną w porównaniu z germanem (0,67 eV), co zmniejszyło nieporządane generowanie nośników mniejszościowych, umożliwiając pracę tranzystorów w wyższych temperaturach. Bardzo ważnym krokiem było skonstruowanie przez fizyka pochodzenia szwajcarskiego, Jeana Hoerniego, tranzystorów planarnych, w których warstwy bazy i emitera powstają przez kontrolowaną dyfuzję domieszek akceptorowych i donorowych w głąb półprzewodnika. Podążając tym tropem, Robert N. Noyce z firmy *Fairchild Semiconductor* skonstruował w 1959 roku pierwszy układ scalony wykorzystujący proces planarny i napyłoną, a następnie selektywnie wytrawioną warstwę aluminium do utworzenia połączeń elektrycznych. Chociaż Jack Kilby z *Texas Instruments* wynalazł układ scalony sześć miesięcy wcześniej, to cały przemysł półprzewodnikowy wkrótce stosował proces planarny zastosowany przez Noyce'a, bo przewyższał on technicznie rozwiązanie Kilby'ego. W 1965 roku Gordon Moore, pracujący w *Fairchild Semiconductor*, sformułował prorocze prawo. Zauważył on, że liczba elementów znajdujących się w jednym układzie scalonym podwajała się co roku, poczynając od roku 1962, osiągając liczbę 50 w roku 1965. Ekstrapolując to empiryczne prawo, przewidywał, że w roku 1975 liczba ta osiągnie wartość 65000 elementów w jednym układzie. W roku 1968 Noyce i Moore opuścili *Fairchild Semiconductor*, aby założyć własną firmę *Intel*, która w roku 1971 wprowadziła na rynek pierwszy czterobitowy mikroprocesor, układ 4004. Dalej rozwój mikroprocesorów potoczył się w przybliżeniu zgodnie z proroczym prawem Moore'a. Jeden z najbardziej zaawansowanych współczesnych mikroprocesorów 64 bitowych, Alpha 21264 firmy *Digital Equipment Corporation*, zawiera 15 milionów tranzystorów wytworzonych na płytce krzemowej o powierzchni 3 cm². Ten procesor, pracując przy częstotliwości zegara 600 MHz, wykonuje cztery instrukcje w czasie jednego cyklu, co daje szybkość pracy 2,4 miliardów operacji na sekundę.

W ciągu minionego półwiecza tranzystor, miniaturowy obiekt, którego zadaniem jest wzmacnianie sygnałów elektrycznych, zmienił pojęcie potęgi państwa, która obecnie w równym stopniu opiera się na zdolności szybkiego przesyłania, przetwarzania i gromadzenia informacji, jak i na posiadaniu klasycznych atrybutów rewolucji przemysłowej, takich jak stal, nośniki energii czy przemysł chemiczny.