

Nikt z uczestników pokazu, który odbył się 23 grudnia 1947 w Bell Laboratories, nie zdawał sobie sprawy z jego doniosłości. Trzej panowie: Wiliam Shockley, Walter Brattain i John Bardeen, demonstrowali swym zwierzchnikom pierwszy na świecie tranzystor ostrzowy, efekt wielu miesięcy wytężonej pracy. Wynalazek ten zapoczątkował nową erę w elektronice i zmienił świat, w którym żyjemy.



Półprzewodniki

Już w wieku dziewiętnastym zaobserwowano niezwykle właściwości elektryczne niektórych materiałów, nazwanych później półprzewodnikami. Wykazują

one ujemny współczynnik temperaturowy oporności właściwej (1833, Faraday), zdolność do prostowania prądu (prostownik miedziowy 1874, Schuster i selenowy 1883, Frits) i efekt fotoelektryczny (1876, Adams i Day). Własności te długo

nie były jednak wykorzystywane, a ich mechanizm przez wiele lat pozostawał niezrozumiały.

Pierwszymi produkowanymi na skalę przemysłową przyrządami półprzewodnikowymi były prostowniki z miedzi i tlenku miedzi (zwane kuprytowymi) i prostowniki selenowe. Znalazły one zastosowanie w urządzeniach zasilających.

Efekt fotoelektryczny w półprzewodnikach został także wykorzystany w fotometrach fotograficznych.

Rozwój radiofonii zrodził zapotrzebowanie na diody detekcyjne. Lampowa dioda Fleminga, a krótko potem trioda czyli audion de Foresta były początkowo bardzo kosztowne, dlatego szeroko rozpowszechniły się proste, a przede wszystkim tanie, detektory kryształkowe, wykonywane z kryształu galeny (siarczku ołowiu) dotykane cienkim drucikiem. "Kryształki" były jednak bardzo zawodne, pozycję drucika na kryształku trzeba było często zmieniać. Pomimo tego używano ich powszechnie do lat dwudziestych, a w Polsce ogołoconej z radiodiodników przez okupanta (za posiadanie radia groziła kara śmierci), jeszcze w pierwszych latach powojennych.

"Kryształek" był pierwszą, bardzo prymitywną, ale nadającą się do prakty-



Radio kryształkowe.

Dawnych wspomnień czar

cznego użytku diodą półprzewodnikową. "Ostrzowy" styk drucika z kryształem tworzył elementarne złącze p-n.

Podstawy teoretyczne

W ciągu lat 20-tych i 30-tych prowadzono szereg prac nad półprzewodnikami, ale działało się to na marginesie wysiłków skupionych na technologii lampowej. Nawet małe usprawnienia w tym zakresie przynosiły bowiem szybkie efekty ekonomiczne.

Jednak badania naukowe w dziedzinie fizyki ciała stałego były kontynuowane. Do ich przyspieszenia przyczyniły się znacznie prace Erwina Schrödingera i jego opublikowane w 1926 równanie, które zapoczątkowało gwałtowny rozwój mechaniki kwantowej. W rok później Werner Heisenberg sformułował swoją zasadę nieoznaczoności. Wkrótce przy pomocy mechaniki kwantowej wyjaśniono wszystkie znane wówczas zjawiska z teorii ciała stałego i metali. Droga do praktycznego zastosowania tej wiedzy stanęła otworem.

Dioda

W latach 30-tych radio zajmowało już silną pozycję w technice, a jego zastosowanie szybko się poszerzało. Używano coraz wyższych częstotliwości, na których spore pojemności międzyelektrodowe lamp elektronowych zaczynały ograniczać ich stosowanie.

Badania nad półprzewodnikami zostały przyspieszone po wybuchu wojny w związku z szybkim rozwojem radaru. Urządzenia te działały na stosunkowo wysokich częstotliwościach, więc pojawiło się zapotrzebowanie na niezawodne podzespoły do wielkich częstotliwości. Znacznie mniejsze wymiary diod półprzewodnikowych predestynowały je do stosowania na wyższych częstotliwościach, jednak poziomem technologicznym nie dorównywały diodom lampowym.

Russel Ohl, chemik w Bell Laboratories, już przed wojną znacznie udoskonalił metodę wytwarzania kryształów krzemu, podstawowego materiału półprzewodnikowego. Posiadał też umiejętność wprowadzania do krzemu śladowych ilości domieszek, potrzebnych do otrzymywania krzemu typu p i typu n. Szybko też udało mu się opracować sposób wprowadzania obu rodzajów przewodności do tego samego krzemowego podłoża. W 1941 Ohl otrzymał złącze p-n i stwierdził, że działa ono doskonale jako prostownik. Technologia diod półprzewodnikowych robiła szybkie

postępy, a parametry diod stawały się coraz lepsze.

Tranzystorowa trójka

Pod koniec wojny w Bell Laboratories doceniono wielkie możliwości otwierające się przed technologią półprzewodników. Na wiosnę 1945 odbyła się duża konferencja na temat przyszłości badań w tej dziedzinie. W jej następstwie zdecydowano podjąć badania "prowadzące do zdobycia wiedzy, której można by użyć do opracowania zupełnie nowych i doskonalszych podzespołów".

W wyniku tych decyzji została utworzona grupa badawcza fizyki ciała stałego pod kierownictwem Wiliama Shockleya i Stanleya Morgana. Shockley kierował także podgrupą półprzewodników, w której uczestniczyli również Walter Brattain i John Bardeen. Trójka ta wynalazła tranzystor.

Wiliam Shockley był Amerykaninem urodzonym w 1910 Londynie. Jego rodzice po trzech latach powrócili z nim do USA i osiedlili się w pobliżu San Francisco. Tu ukończył on studia w California Institute of Technology, a następnie w 1936 otrzymał tytuł doktora w Massachusetts Institute of Technology. Rozpoczął potem pracę w Bell Laboratories, gdzie początkowo zajmował się dyfrakcją elektronów. W 1955 opuścił tę firmę i w swoim rodzinnym Palo Alto założył własne przedsiębiorstwo, Shockley Semiconductors, które przyciągnęło wielu innych specjalistów półprzewodnikowych. Niewiele później powstało w pobliżu wiele innych podobnych przedsiębiorstw. Jedno z nich, Fairchild Camera and Instrument Company, zostało utworzone w 1957 przez kilku dawnych współpracowników Shockleya. Zapoczątkowało to całą lawinę i wkrótce na tym małym obszarze

powstało największe zagęszczenie specjalistów półprzewodnikowych w USA. Tak powstała słynna Krzemowa Dolina (Silicon Valley).

Walter Brattain, tak jak i Shockley, nie urodził się w USA. Kilka lat dzieciństwa spędził w Chinach i powrócił następnie z rodzicami do domu w stanie Waszyngton. Dyplom otrzymał w Whitman College w stanie Waszyngton, a doktorat na Uniwersytecie Minnesota. Po studiach chciał rozpocząć pracę w Bell Laboratories, ale nie został przyjęty. Zatrudnił się więc w National Bureau of Standards (odpowiednik Głównego Urzędu Miar). Wkrótce ponownie zwrócił się do Bell Laboratories i tym razem został przyjęty. Początkowo zajmował się prostownikami miedziowymi i selenowymi, co zapewniło mu solidne podstawy wiedzy o półprzewodnikach. Brattain pracował w Bell aż do emerytury w 1967. Potem, do swojej śmierci w 1987, pozostawał na stanowisku Visiting Professor w Whitman College.

Z tej trójki tylko John Bardeen urodził się w USA, w stanie Wisconsin, w 1908 r. Po studiach na Uniwersytecie Wisconsin stopień doktora uzyskał w Princeton. Początkowo związany był z Uniwersytetami Harvard i Minnesota, a w 1945 został zatrudniony w Bell Laboratories.

Bardeen wraz z Shockleyem i Brattainem za prace nad tranzystorem otrzymał w 1956 nagrodę Nobla. Był on równocześnie zaangażowany w prace nad nadprzewodnictwem. Uważał, że w tej właśnie dziedzinie osiągnął swój życiowy sukces, i za te prace otrzymał drugą nagrodę Nobla w 1972. Oprócz tego został uhonorowany jeszcze innymi nagrodami, w tym złotym medalem Radzieckiej Akademii Nauk. Umarł w wieku 82 lat w 1991.

kp



Laureaci Nagrody Nobla 1956, Walter Houser Brattain (pierwszy z lewej), John Bardeen (czwarty z prawej) i William Shockley (drugi z prawej).

Początek

Grupa półprzewodnikowa rozpoczęła pracę nad jednym z pomysłów Shockleya. Uważał on, że powinno być możliwe skonstruowanie rodzaju półprzewodnikowej triody. Wyobrażał ją sobie w postaci warstw krzemu typu n i typu p. Główny prąd płynąłby w jednej z tych warstw, a jej przewodność byłaby sterowana przez pole zewnętrzne. Zmieniałoby ono ilość tworzących ten prąd nośników ładunku (dziur lub elektronów). Była to w gruncie rzeczy zasada działania powszechnie obecnie używanego tranzystora polowego (Field Effect Transistor, FET).

Swoją myśl Shockley wypróbował przy pomocy struktury z cienkiej warstwy krzemu, wykonywanej metodą osadzania. Był to nowy proces, dopiero co opracowany przez innego pracownika Bella, o nazwisku Teal. Shockley sądził, że zmiana pola sterującego wywoła znaczną zmianę przewodności. Ku jego wielkiemu rozczarowaniu efektu takiego nie udało się zaobserwować. Obliczenia były wielokrotnie sprawdzane przez innych członków grupy, ale przyczyny niepowodzenia długo nie można było wykręcić. Problem ten udało się rozwiązać dopiero w marcu 1946. To Bardeen wpadł na to, że powierzchnia półprzewodnika wiąże elektrony, które ekranują główny kanał przed polem elektrycznym. Shockley stwierdził później, że to odkrycie było jednym z najważniejszych osiągnięć całego programu półprzewodnikowego.

Zmiana kierunku

Grupa uznała się za pokonaną przez związane elektrony i jakiś czas zajmowała się innymi zastosowaniami złącza p-n. Ale idea wzmacniacza półprzewodnikowego nie została porzucona.

Z początkiem grudnia 1947 Bardeen i Brattain rozpoczęli doświadczenia z dwoma blisko umieszczonymi złączami ostrzowymi. Zaobserwowali, że jeżeli jedno z nich jest spolaryzowane zaporowo a drugie w kierunku przewodzenia, to daje się zauważyć niewielkie wzmocnienie. Wkrótce doszli do wniosku, że dwa złącza diodowe należy umieścić bardzo blisko siebie. Udało się to wykonać wyjątkowo łatwo. Mały klin perspeksu został położony, poczyną z samego jego ostrza za pomocą żyłki usunięto warstwę złota. Następnie klin został dociśnięty małą sprężynką do warstwy germanu. Dwa klinowe styki utworzyły emiter i kolektor, a warstwa germanu bazę. Przyrząd ten został wypróbowany 16 grudnia 1947 i ku zaskoczeniu eksperymentatorów od razu zaczął działać. Tak powstał

pierwszy tranzystor ostrzowy.

Już w tydzień później Shockley, Bardeen i Brattain przedstawiali swój nowy pomysł naczelnemu kierownictwu Bell. Pokaz ten przyjęło się uważać za ogłoszenie ery tranzystora. Potrzeba było jednak jeszcze wielu wysiłków aby tranzystory mogły stać się powszechną rzeczywistością.

Tranzystory ostrzowe czy złączowe

Pierwsze tranzystory ostrzowe były bardzo zawodne i nie nadawały się do produkcji. Shockley, opierając się na teoretycznych obliczeniach, zaproponował więc zastąpienie styku ostrzowego złączem p-n. Zaskakujące było to, że wpadł na ten pomysł już w kilka zaledwie tygodni od wynalezienia tranzystora ostrzowego. Realizacja tranzystora złączowego okazała się jednak trudna. Pierwszy egzemplarz udało się Shockleyowi wykonać dopiero w kwietniu 1949. Dokonał tego upuszczając kroplę stopionego germanu typu p na rozgrzany german typu n. Powstała grudka musiała zostać następnie do połowy rozcięta, aby otrzymać dwa złącza p-n. Na przykładzie tego prymitywnego przyrządu potrafił jednak dowieść, że wykazuje on wzmocnienie prądowe i mocy.

Technologia materiałów

Postęp w wytwarzaniu tranzystorów był uzależniony w wielkim stopniu od technologii materiałowej. Surowcem do produkcji półprzewodników są monokryształy o bardzo wysokiej czystości. Metody ich wytwarzania i oczyszczania wymagały doskonalenia.

W 1950 do produkcji kryształów germanu Teal zastosował metodę Czochralskiego. Profesor Jan Czochralski (1885 - 1953) do 1928 pracował w Niemczech, gdzie był prezesem Deutsche Gesellschaft für Metallkunde, a później został profesorem i dr h.c. Politechniki Warszawskiej, gdzie doskonalił swoją metodę produkcji monokryształów.

Później Pfann do oczyszczania materiałów półprzewodnikowych zaproponował metodę rafinacji strefowej. W procesie tym wzdłuż kryształu przesuwa się cewka pieca indukcyjnego wielkiej częstotliwości. W miarę jej ruchu obejmowany przez nią kryształ topi się, a zanieczyszczenia opadają, aż zostaną w końcu doprowadzone na kraniec oczyszczanej partii.

W początkowym okresie prac Shockley mógł produkować kryształy, do których potrafił wprowadzać kontrolowane ilości właściwych

domieszek, potrzebnych do wykonywania złącz p-n. Później mógł już wykonywać w germanie kompletne struktury p-n-p. Tak wykonywane tranzystory działały, ale ich parametry nie osiągały spodziewanego przez Shockleya poziomu. Jakość materiałów była za niska.

W miarę udoskonalania technologii materiałów, coraz więcej przedsiębiorstw uruchamiało produkcję tranzystorów. Początkowo Bell wytwarzał zarówno tranzystory ostrzowe jak i wyciągane złączowe. Wkrótce potem General Electric wprowadził nowy rodzaj tranzystora, nazwany stopowym złączowym.

Do tego czasu wszystkie tranzystory wykonywano z germanu. Na konferencji Institute of Radio Engineers w maju 1954 wielu mówców twierdziło, że tranzystory krzemowe to jeszcze sprawa lat. Tymczasem ku zaskoczeniu wszystkich Teal, który przeniósł się do mało znanej firmy Texas Instruments, rozpoczął produkcję tranzystorów krzemowych. Dzięki temu Texas Instruments wysforował się na czoło producentów tranzystorów, stając się jednym z głównych wytwórców półprzewodników. Inni producenci potrzebowali lat na wprowadzenie na rynek własnych tranzystorów krzemowych.

Gdy Texas przewodził w opracowywaniu tranzystorów krzemowych, Bell i General Electric podążały w innych kierunkach badań. Tak usprawniono sterowanie procesem dyfuzji domieszek w półprzewodniku, że można było produkować dowolne struktury. Dodatkowym ważnym udoskonaleniem była możliwość tworzenia na tych strukturach warstw tlenkowych. Specjalne techniki fotograficzne umożliwiły dokładne kształtowanie domieszkowanych obszarów.

Udoskonalone metody dyfuzji i fotografii umożliwiały produkcję wielu tranzystorów z jednej płytki krzemu, którą można potem pociąć na indywidualne tranzystory. Mogły więc być one produkowane w ilościach umożliwiających obniżanie ceny do poziomu pozwalającego im konkurować z lampami elektronowymi.

Pomimo tego tranzystory były stosunkowo drogie. Z początkiem lat 60-tych zwykły tranzystor kosztował 1,5 funta, ale można było taniej kupić tranzystory o gorszych parametrach, oznaczane czerwoną lub białą kropką. Były to w gruncie rzeczy odrzuty produkcyjne, ale nadawały się do niektórych zastosowań dla mniej wybrednych odbiorców. Kolorem

Dawnych wspomnień czar

znakowano pasmo częstotliwości, czerwona kropka oznaczała zastosowania audio, a biała wielką częstotliwość, ale najwyżej 1 do 2MHz. Kosztowały 0,25 funta.

W ciągu lat 60-tych w miarę jak rosło zastosowanie tranzystorów ich ceny ogromnie spadły. Krzem zastąpił german, a parametry tranzystorów powszechnego użytku bardzo się poprawiły.

Nowy rodzaj tranzystora

Powodzenie tranzystorów bipolarnych zmniejszyło zainteresowanie pierwszym pomysłem Shockleya półprzewodnikowej wersji triody lampowej. Historia tranzystora polowego zaczęła się jednak dużo wcześniej. Pierwsze patenty pojawiły się w latach 20-tych, Juliusa Lilienfelda w 1926 w USA i Oskara Heila w 1936 Wielkiej Brytanii.

Do dalszego usprawnienia tranzystora polowego (FETa) Shockleya przyczynił się Amerykanin Ross. Wpadł on na pomysł odseparowania elektrody sterującej, czyli bramki, od kanału cienką warstwą izolacyjną. Pomysł był dobry, ale na otrzymanie zadowolających wyników potrzebował czterech lat. Trudność polegała na znalezieniu odpowiedniego izolatora, który musiał być niezmiernie cienki, ale wytrzymywać równocześnie napięcia stosowane w układzie.

Obecnie do tego celu stosuje się dwutlenek krzemu. Wynaleziono to u Bella w 1959, co umożliwiło wyprodukowanie pierwszych MOSFETów (Metal Oxide FET) w 1960. Nie były one wysokiej jakości. Warstwy tlenkowe zawierały obniżające jakość zanieczyszczenia. Dopiero w 1963 udało się wyprodukować dostatecznej jakości warstwy tlenkowe. Stało się to nie tylko przełomem w produkcji FETów, ale odegrało decydującą rolę w udoskonaleniu technologii powstających układów scalonych.

Pierwszy FET pojawił się na rynku w 1958 i to nie w USA, tylko we Francji. Był wykonywany techniką stopową z germanu. Produkcję FETów podjęły w Europie także inne firmy, jak Philips czy Ferranti. Nadal jednak najbardziej liczył się Texas Instruments i jego doskonała technologia.

FETy mają wiele zalet. Ich impedancja wejściowa jest bardzo duża, a szumy niewielkie. Liczyło się także ich podobieństwo do lamp elektronowych, które były wówczas jeszcze bardzo rozpowszechnione. Impulsem do rozszerzenia ich stosowaniu stał się zaproponowany w 1963 przez dwóch Amerykanów, Wanlass'a i Sah'a, układ komplementarny. Ten rodzaj układów

przyjął się szybko, gdy zorientowano się w jego zaletach związanych z małym poborem prądu.

Pod koniec lat 60-tych zastosowanie FETów ogromnie wzrosło, a ich parametry zostały znacznie poprawione. Pod wieloma względami FETy zyskały przewagę nad bardzo rozpowszechnionymi tranzystorami bipolarnymi.

Podsumowanie

Powstanie tranzystorów nadało elektronice ogromnego przyspieszenia. Wprowadziły one elektronikę w dziedziny, do których w formie lampowej nie miała dotychczas dostępu. W przeciętnym domu obok dominujących dotąd radia i telewizji pojawiło się wiele nowych urządzeń elektronicznych. Elektronika rozwijała się coraz szybciej, przygotowując grunt dla nowych, rewolucyjnych zmian.

kp