

W poprzednim numerze opisaliśmy odkrycia i przedsięwzięcia, które doprowadziły do stworzenia nowoczesnych elementów półprzewodnikowych. Dziś przedstawiamy wydarzenia związane z wynalezieniem tranzystora, co w konsensusie - bez żadnej przesady - dało początek nowej epoce w rozwoju cywilizacji.



Grupa półprzewodnikowa rozpoczęła pracę nad jednym z pomysłów Shockleya. Uważał on, że powinno być możliwe skonstruowanie 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 poleowego (Field Effect Transistor, FET).

Swoją pracę 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 zna-

czną 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 złączy p-n. Ale idea wzmacniacza półprzewodnikowego nie została porzucona.

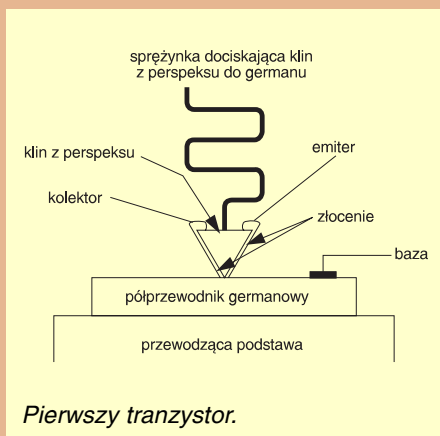
Z początkiem grudnia 1947 Bardeen i Brattain rozpoczęli doświadczenia z dwoma blisko umieszczonymi złączami ostrzowymi. Zaobserwowali, że jeżeli jedno z nich jest spolaryzowane zaporowo a drugie w kierunku przewodzenia, to daje się zauważyć niewielkie wzmocnienie. Wkrótce doszli do wniosku, że dwa złącza diodowe należy umieścić bardzo blisko siebie. Udało się to wykonać wyjątkowo łatwo. Mały klin perspektu został położony, poczym z samego jego ostrza za pomocą żyłki usunięto warstwę złota. Następnie klin został dociśnięty małą sprężynką do warstwy germanu. Dwa klinowe styki utworzyły emi-

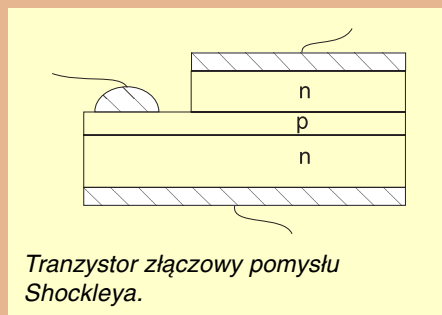
ter i kolektor, a warstwa germanu bazę. Przyrząd ten został wypróbowany 16 grudnia 1947 i ku zaskoczeniu eksperymentatorów od razu zaczął działać. Tak powstał pierwszy tranzystor ostrzowy.

Już w tydzień później Shockley, Bardeen i Brattain przedstawiali swój nowy pomysł naczelnemu kierownictwu Bella. 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. Dokołał 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 wzmocnienie mocy.





## Technologia materiałów

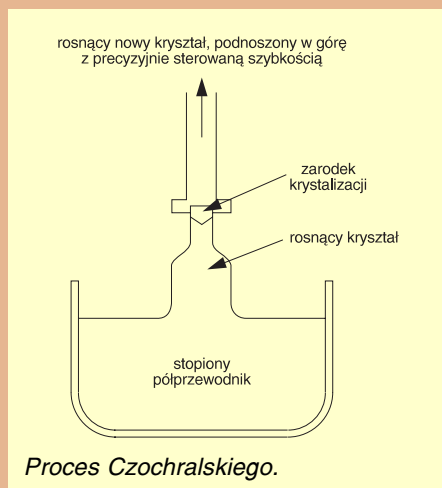
Postęp w wytwarzaniu tranzystorów był uzależniony w wielkim stopniu od technologii materiałowej. Surowcem do produkcji półprzewodników są monokryształy o bardzo wysokiej czystości. Metody ich wytwarzania i oczyszczania wymagały doskonalenia.

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 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 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 - półprzewodnikową wersją 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 zadowalających 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, Wanlassa i Saha, 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 dziedzinę, 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