WITOLD ROSIŃSKI
Zakład Elektroniki IPPT PAN

ROZWÓJ ELEKTRONIKI PÓŁPRZEWODNIKÓW

Część druga[1])

TRANZYSTORY

Tranzystory (podobnie jak diody) dzielą się na dwie grupy: ostrzowe i warstwowe. Podział ten jest charakterystyczny nie tylko ze względu na rodzaj konstrukcji, lecz i ze względu na zasadniczą różnicę wartości parametrów elektrycznych, co znajduje swój wyraz w zasadniczo różnych zastosowaniach.

Tranzystory ostrzowe odznaczają się dużą wartością współczynnika wzmocnienia prądowego α, znacznie większą od jedności, wskutek czego mogą być stosowane do generacji drgań jako czyste oporności ujemne typu łuku lub dynatronu o łatwej regulacji wartości tej oporności. Mają one jednak bardzo ograniczony zakres mocy admisyjnej, nie przekraczający wartości 250 mW, a maksymalna ich częstotliwość graniczna wynosi przeciętnie mniej niż 10 MHz.

Tranzystory warstwowe ze względu na znacznie mniejszą niż jedność wartość współczynnika α są bardzo przydatne w układach wzmacniających — statecznych z natury, mogą być produkowane na duże moce admisyjne, większe niż 50 W, i pozwalają, oczywiście, przy znacznie niższym poziomie mocy wyjściowej (mniej niż 200 mW) osiągać wystarczające wzmocnienie na częstotliwościach około 500 MHz.

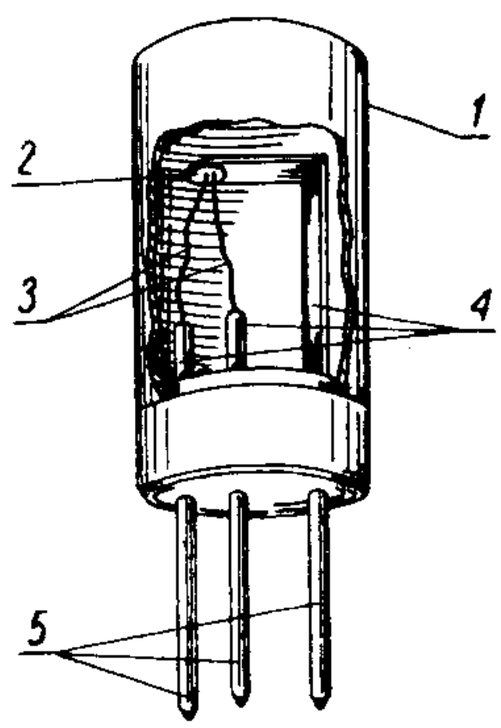
Tranzystor ostrzowy (rys. 1) jest utworzony przez dwie sprężynki stykowe wykonane zwykle z brązu fosforowego i ustawione w niewielkiej odległości względem siebie na płytce półprzewodnikowej. Przeciwna strona

---

[1]) Cz. I — p. Elektronika Nr 6(32).

Przeciętne wartości parametrów tranzystorów ostrzowych i warstwowych

Parametr	α	r_e [Ω]	r_b [Ω]	r_k [kΩ]
Tranzystor warstwowy	< 1	30	200	1000
Tranzystor ostrzowy	2÷6	150	250	10 ÷ 30



Rys. 1. Tranzystor ostrzowy
1 — obudowa; *2* — płytka półprzewodnikowa; *3* — ostrza; *4* — wsporniki; *5* — zakończenie wtyczkowe

płytki półprzewodnikowej jest przylutowana na całej powierzchni do płytki metalowej. Styki tworzą elektrody emitera i kolektora, płytka zaś jest trzecią elektrodą, zwaną bazą. Oddziaływanie prądu emitera na prąd kolektora wyraża się współczynnikiem wzmocnienia prądowego α Ten typ tranzystora, stanowiący pierwszy etap w rozwoju techniki tranzystorowej, odznaczał się wieloma wadami, a mianowicie: małą mocą admisyjną (poniżej 250 mW), niekorzystnym przebiegiem charakterystyk oraz dużą niestałością parametrów elektrycznych, a więc małą trwałością. Spowodowało to przestawienie produkcji na nie posiadający tych wad tranzystor warstwowy.

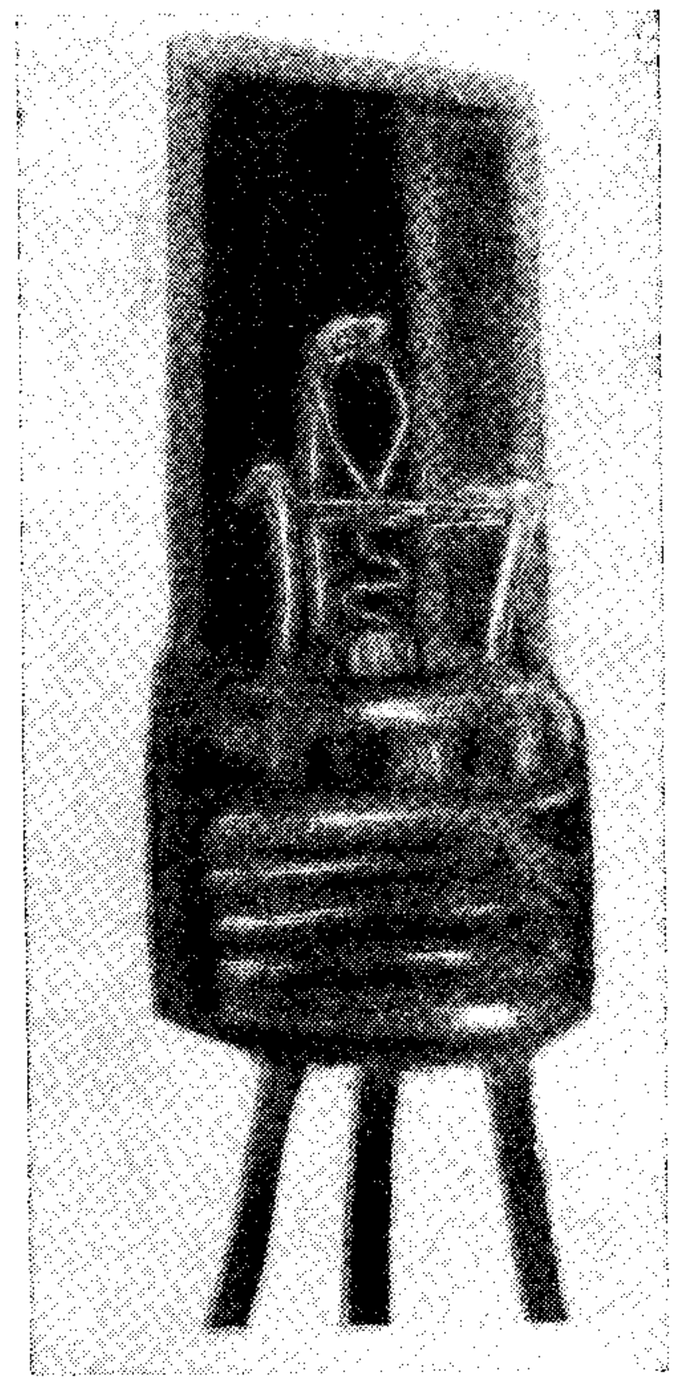
Analiza konstrukcji tranzystora ostrzowego wyjaśnia przyczyny tej niestałości parametrów elektrycznych w czasie, okazuje się bowiem, że własności elektryczne tranzystora ostrzowego należą w dużym stopniu od wzajemnej odległości styków oraz od przebiegu procesu formowania. Wszelkie zatem zjawiska starzenia się materiałów, z których wykonane są elementy tranzystora, wywołują zmiany naprężeń konstrukcji wsporczej, zwłaszcza w czasie cykli cieplnych występujących podczas eksploatacji przy przyłączaniu i odłączaniu tranzystora od źródła zasilania. Zmiany naprężeń mogą wywoływać przesunięcie względne styków i w konsekwencji zmianę parametrów elektrycznych.

Procesowi starzenia podlega również formowany obszar (formowanie polega na impulsowym zgrzewaniu obszaru styku, co w rezultacie powoduje zmiany strukturalne w tym obszarze), czemu towarzyszy częstokroć dość znaczna zmiana wartości współczynnika α i oporności r_k.

Ze względu na powyższe zjawiska konstrukcja tranzystora ostrzowego musi być bardzo starannie przemyślana. Cokół, na którym znajduje się konstrukcja wsporcza, powinien mieć mały współczynnik temperaturowy rozszerzalności — najlepszym pod tym względem materiałem jest szkło. Część wsporcza, na której montuje się płytkę półprzewodnikową, oraz sprężynki stykowe są osadzone w cokole w postaci próżnioszczelnych przepustów (rys. 2). Całość przed zmontowaniem musi być poddana procesowi starzenia.

W celu lepszego ustabilizowania miejsca styku płytkę trawi się w ten sposób, aby powierzchnia była chropowata, co sprzyja zahaczeniu ostrza na powierzchni i unieruchomieniu miejsca styku. Miejsce styku zabezpiecza się oprócz tego odpowiednio dobranymi masami plastycznymi, które zwiększają stabilność punktu styku.

Bardzo staranne wykonanie konstrukcji i dobór sposobu montowania nie daje całkowitej gwarancji stabilności tranzystora w czasie, co objawia się stosunkowo znacznym odpadem tranzystorów podczas produkcji i w okresie procesu przyspieszonego ich starzenia i co w rezultacie doprowadziło do znacznego ograniczenia produkcji tego typu tranzystorów ze względu na znaczny koszt. Obecnie w Polsce produkuje się tych tranzystorów tylko tyle, ile potrzeba ich do sprzętu specjalnego.



Rys. 2. Tranzystor ostrzowy w cokole szklanym

W Stanach Zjednocz. Am. Płn. tranzystory tego typu produkuje firma Transistor Products, a w Anglii firmy Brimar i General Electric Company.

Oprócz powyższego poważną wadą tranzystorów ostrzowych jest stosunkowo wysoki poziom szumów, zauważalnych już przy sygnałach wynoszących kilkanaście miliwoltów.

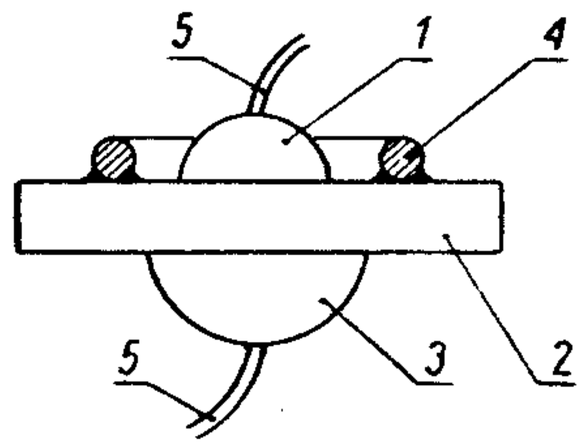
W ostatnich latach zarysowuje się tendencja do zastępowania styków ostrzowych nałożonymi metodą stopową elektrodami, wytwarzanymi w sposób stosowany w technologii tranzystorów warstwowych. Badania nad tym są jeszcze w stadium początkowym. Technologia tego rodzaju elektrod jest trudna i okazuje się, że poziom szumów ulega tylko niewielkiej zmianie.

Wartości parametrów w tego typu tranzystorach bardzo nieznacznie różnią się od wartości parametrów spotykanych w zwykłych tranzystorach ostrzowych. Jedyną może zaletą tego rodzaju konstrukcji jest większa trwałość mechaniczna. Wydaje się jednak, że w najbliższej przyszłości dzięki odpowiedniemu wykorzystaniu zjawiska powielania nośników w obszarze bariery (kolektora) uzyska się możliwość produkcji tranzystorów o współczynniku α większym niż jedność, co w zupełności wyeliminuje tranzystory ostrzowe z wszelkiego rodzaju zastosowań.

Tranzystor warstwowy powstaje wówczas, gdy w płytce półprzewodnikowej (rys. 3) obszar o przewodnictwie typu $n(p)$ graniczy z obszarami

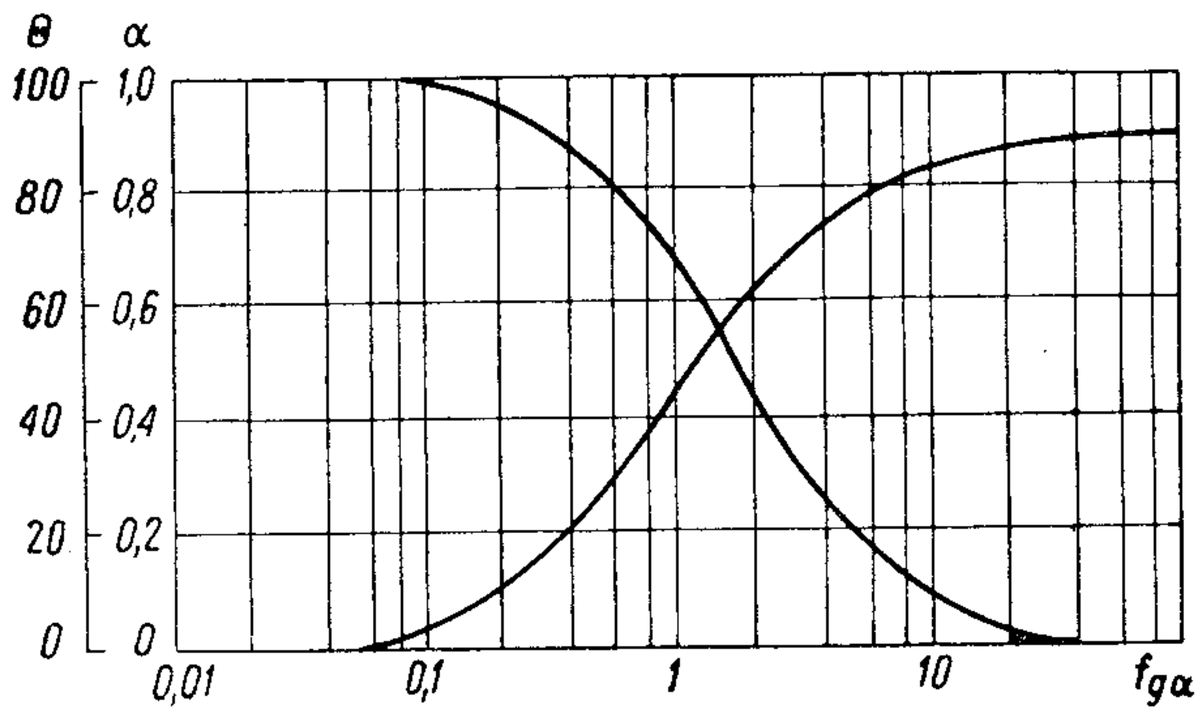
o przewodnictwie typu $p(n)$. W tym przypadku mamy do czynienia z tranzystorem typu p-n-p(n-p-n). Powstające w ten sposób złącza p-n nazywają się odpowiednio złączem emitera i złączem kolektora; obszar środkowy nazywany jest bazą.

W tego rodzaju konstrukcji część prądu spolaryzowanego w kierunku przewodzenia emitera powiększa prąd kolektora. Sposób oddziaływania



Rys. 3. Tranzystor warstwowy
1 — czasza indowa (emiter); *2* — płytka półprzewodnikowa; *3* — czasza indowa (kolektor); *4* — pierścień lewy; *5* — połączenia z emiterem i z kolektorem

prądu emitera na prąd kolektora określa współczynnik wzmocnienia prądowego α, którego wartość w odróżnieniu od wartości tego współczynnika w przypadku tranzystora ostrzowego jest zawsze mniejsza niż jedność i wynosi zwykle 0,96÷0,99, jeżeli nie zastosowano powielania nośników w barierze kolektora, co daje wartości współczynnika α większe niż jedność.



Rys. 4. Zależność wartości współczynnika Θ od wartości częstotliwości $f_g\alpha$

Tranzystor działa w ten sposób, że wartość współczynnika α zależy od częstotliwości wzmocnionego sygnału (rys. 4). Zmniejszaniu się wartości współczynnika α ze wzrostem częstotliwości przeciwdziała się przez zastosowanie odpowiednio cienkich obszarów bazy, co zależy bezpośrednio od technologii tranzystorów.

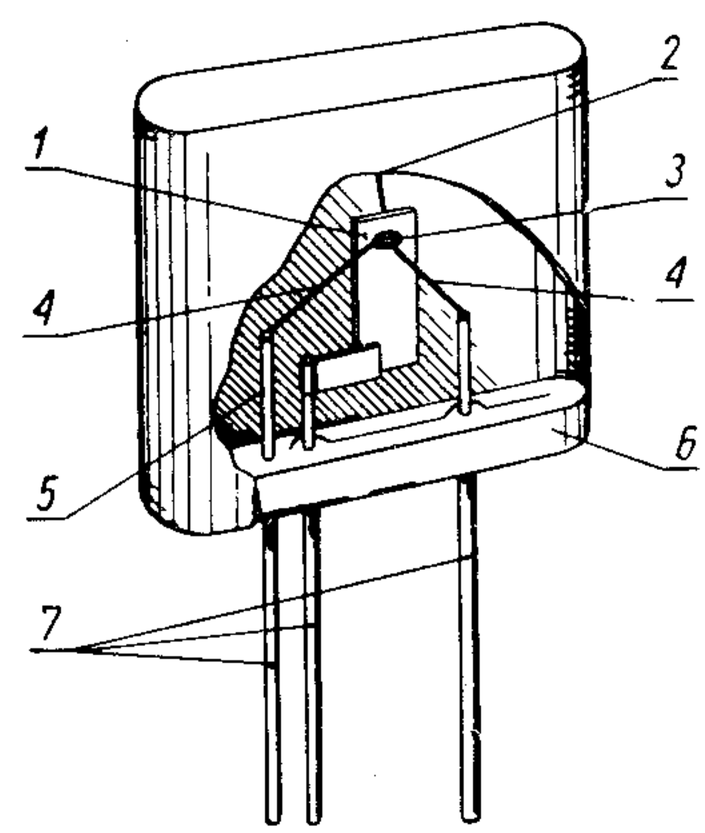
Analiza układów tranzystorowych pozwala określić, jakim warunkom powinny odpowiadać parametry elektryczne tranzystora, aby uzyskać

możliwie duże wzmocnienie w dostatecznie szerokim pasmie częstotliwości przy dostatecznie wysokim poziomie mocy sygnału wyjściowego.

Przy bliższym rozpatrzeniu tych warunków okazuje się, że rodzaj technologii stosowanej przy wytwarzaniu przejść *p-n* wpływa w różnym stopniu na poszczególne właściwości tranzystora.

Analiza historycznego rozwoju technologii tranzystorów warstwowych wskazuje, że celem stopniowo pojawiających się metod technologicznych jest przede wszystkim zwiększenie częstotliwości granicznej tranzystora. Obecnie stosuje się kilka metod produkcji złącz tranzystorów, a mianowicie: metoda stopowa, metoda wzrostu przejść *p-n*, metoda elektrochemiczna (surface barrier) i metoda dyfuzyjna.

Należy podkreślić, że są to metody stosowane do niedawna, najstarsza bowiem spośród nich, tzn. metoda stopowa, została zastosowana zaledwie przed siedmiu laty. Pozostałe metody są jeszcze w trakcie opracowywania lub też w stadium zupełnie początkowym. Ściśle rzecz biorąc, nawet w przypadku stosowania metody stopowej wykonuje się jeszcze bardzo szczegółowe badania nad zwilżaniem stapianej w półprzewodnikach domieszki lub nad działaniem stopów domieszki z innymi metalami itp. Charakterystyczną rzeczą jest to, że pewne metody opracowane dla germanu są niedostatecznie opanowane dla krzemu i przeciwnie.

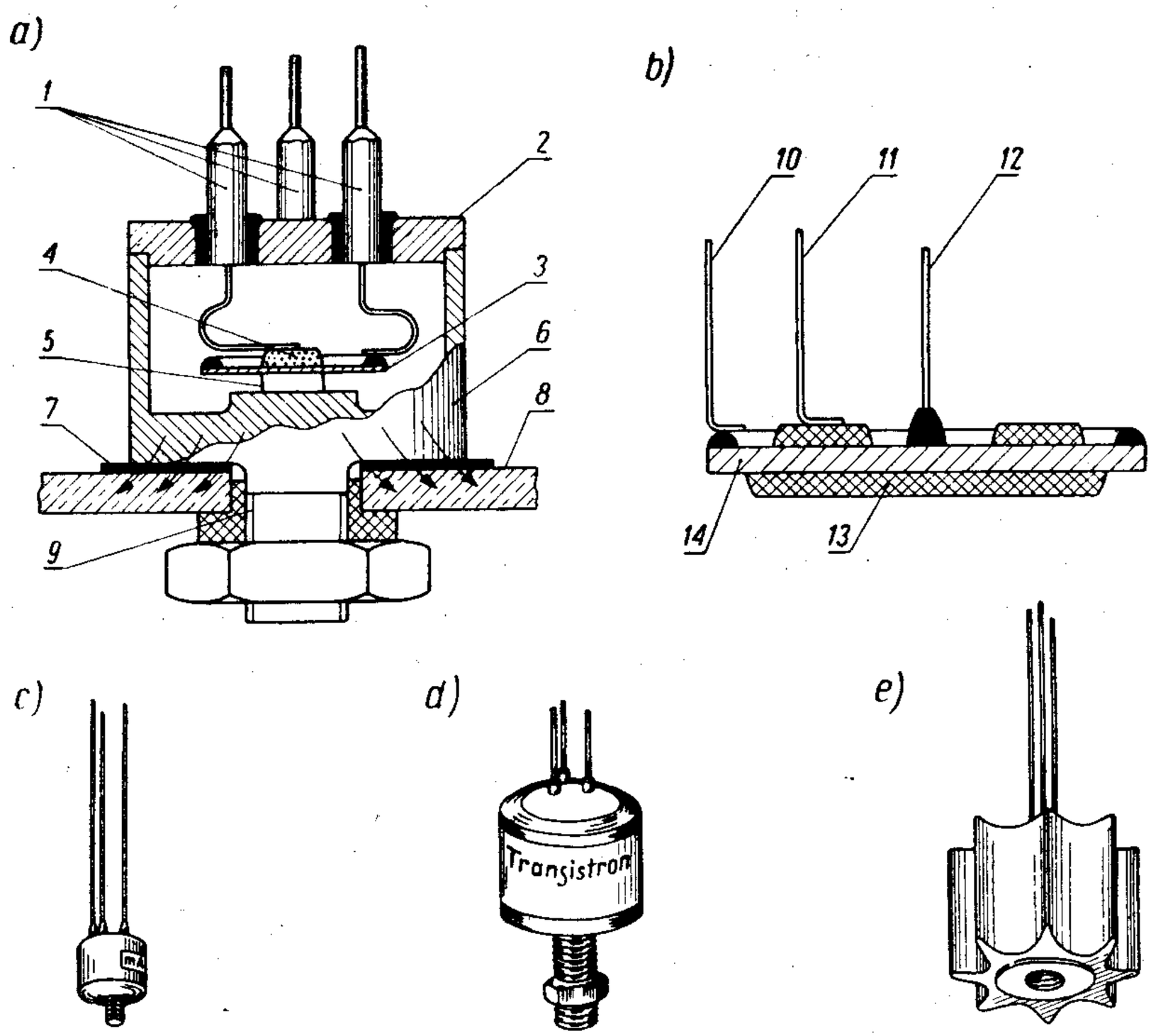


Rys. 5. Tranzystor warstwowy małej częstotliwości i małej mocy (100 mW) *1* — płytka półprzewodnikowa; *2* — płytka metalowa; *3* — kulka indowa; *4* — połączenie z indem; *5* — wspornik; *6* — podstawka; *7* — nóżki

Metoda stopowa otrzymywania złącz *p-n* jest najczęściej stosowana ze względu na prostotę i bardzo dobre własności elektryczne tranzystorów. Metoda ta daje bardzo dobre wyniki w przypadku tranzystorów zarówno małej (rys. 5), jak i dużej (rys. 6) mocy małej częstotliwości (do 1 MHz) oraz w przypadku tranzystorów małej mocy i wielkiej częstotliwości (do 15 MHz).

Metoda stopowa polega na wprowadzaniu domieszki akceptorowej lub donorowej (zależnie od typu przewodnictwa płytki półprzewodnikowej) przez stapianie jej z materiałem półprzewodnikowym. Zatrzymana przy

rekrystalizacji liczba atomów domieszki powoduje zmianę typu przewodnictwa części stopowej i powstanie przejścia *p-n* na granicy obszaru stopionego i niestopionego. Domieszki, zwykle w postaci kulek, umieszcza się dokładnie naprzeciw siebie po obu stronach płytki. Średnica kulek zależy od maksymalnej mocy tranzystora lub od jego częstotliwości.



Rys. 6. Tranzystory warstwowe dużej mocy (60 mW): a), b) schematy dwóch różnych konstrukcji; c), d), e) widok zewnętrzny
1 — połączenia z elektrodami; *2* — pokrywa z próżnioszczelnym przepustem; *3* — płytka półprzewodnikowa; *4* — emiter; *5* — kolektor; *6* — obudowa; *7* — przekładka; *8* — płytka montażowa; *9* — przekładka izolacyjna; *10* — baza; *11* — emiter; *12* — elektroda dodatkowa; *13* — kolektor; *14* — płytka germanowa

Niemożliwe jest jednoczesne uzyskanie dużej mocy i dużej częstotliwości, gdyż ze względu na dopuszczalne maksymalne gęstości prądu powierzchnia złącza w tranzystorach mocy musi być dostatecznie duża, co jednak powoduje wzrost pojemności kolektora do wartości rzędu 100 pF, która zbocznikuje oporność obciążenia w obwodzie kolektora i ogranicza szerokość pasma częstotliwości.

Uzyskanie jak największej częstotliwości przy zastosowaniu metody stykowej jest przedmiotem bardzo szczegółowej analizy, z której wynika konieczność zmniejszenia średnicy elektrod emitera i kolektora, co ogra-

nicza pojemność kolektora, oraz zmniejszenia odległości między tymi elektrodami, co narzuca jednocześnie taki dobór konstrukcji, żeby oporność bazy była jak najmniejsza. Wydaje się, że osiągnięto już optymalne wyniki uwarunkowane względami technicznymi.

Trzeba sobie zdać sprawę, że środkowanie kulek w czasie procesu stapiania jest niezmiernie ważne, przesunięcie bowiem osi obydwóch elektrod o 0,05 mm powoduje przy średnicy elektrod wynoszącej około 0,3 mm znaczne zmniejszenie częstotliwości granicznej. Niemożliwe jest również dalsze zmniejszanie oporności bazy oraz odległości elektrod ze względu na zbyt krytyczne warunki procesu stopowego i obniżenie napięcia przebicia między kolektorem a emiterem.

Metoda stopowa jest stosowana prawie wyłącznie w przypadku tranzystorów dużej mocy. Konstrukcje elektrod ulegają stale pewnym modyfikacjom w celu uzyskania jak najmniejszej oporności bazy (co jest rzeczą oczywistą, gdy się weźmie pod uwagę, że w tranzystorze o mocy 50 W prąd bazy może być większy niż 0,25 A). Przy mocach do 10 W konstrukcja przypomina tranzystor małej mocy, przy mocach większych jedna strona płytki jest pokryta całkowicie przez elektrodę kolektora, druga zaś strona płytki jest pokryta kilku pierścieniami tworzącymi na przemian elektrody bazy i emitera, które łączy się odpowiednio równolegle.

Zarówno w tym, jak i w innych przypadkach chłodzenie odbywa się przez elektrodę kolektora. Chłodzenie przez bazę jest dużo mniej skuteczne, co najlepiej ilustruje współczynnik cieplny określający, o ile stopni podnosi się temperatura złącza kolektora przy zwiększeniu się mocy traconej w kolektorze o 1 W. Współczynnik ten przy chłodzeniu przez bazę ma wartość większą niż 8 °C/W, przy chłodzeniu przez kolektor ma wartość mniejszą niż 5 °C/W, a w tranzystorach dużej mocy wynosi około 1÷1,5 °C/W.

Poważną wadą tranzystorów mocy jest to, że ich moc admisyjna zależy od temperatury otoczenia i jak wskazuje na to wartość współczynnika cieplnego — podwyższenie temperatury otoczenia o na przykład 10 °C powoduje zmniejszenie mocy o kilka lub kilkanaście watów w zależności od mocy tranzystora.

Sztuczne chłodzenie może zwiększyć wartość mocy admisyjnej, jest to jednak poważna komplikacja urządzenia tranzystorowego, którego głównym zadaniem jest osiągnięcie dużej sprawności energetycznej.

W tranzystorach stopowych dużej mocy bardzo istotną rzeczą jest utrzymanie możliwie stałej wartości współczynnika wzmocnienia prądowego przy dużych wartościach prądu sterowania, co jest konieczne dla utrzymania niskiego poziomu zniekształceń i uzyskania dużej sprawności w przetwornicach tranzystorowych. Wymaganie to jest spełnione przy

zastosowaniu odpowiednich stopów na kulki domieszkowe emitera. Stosuje się 0,5-procentowy stop indu z galem lub 1- lub 2-procentowy stop aluminium z indem. Wyniki elektryczne są dobre, lecz proces technologiczny jest bardzo trudny ze względu na pogarszanie właściwości mechanicznych w przypadku galu (kruchość elektrody) i utrudnione stapianie się aluminium w przypadku aluminium, ponieważ łatwo powstają tlenki (co w rezultacie powoduje rozrzut charakterystyk $\frac{\alpha}{1-\alpha} = f(I_e)$ między poszczególnymi sztukami).

Ze względu na prostszą technologię i lepsze wyniki stosuje się również tranzystory *n-p-n*, w których kulka domieszkowa stapiana z płytką jest utworzona z 2÷5-procentowego stopu arsenu z ołowiem.

Zaletą metody stopowej w przypadku tranzystorów mocy są znacznie mniejsze wartości oporności poszczególnych obszarów tranzystora, co zmniejsza straty mocy w tranzystorach i zwiększa jego sprawność.

Charakterystyczną cechą metody stopowej jest to, że jest ona dobrze opracowana i stosunkowo prosta w przypadku tranzystorów germanowych, nastręcza jednak duże trudności produkcyjne w przypadku tranzystorów krzemowych ze względu na niekorzystne właściwości mechaniczne materiałów stosowanych jako domieszki. W wyniku tego tranzystory mocy wykonane przy zastosowaniu krzemu mają znacznie mniejsze wartości mocy admisyjnej (mniej niż 10 W). Przyczyną tych trudności jest również niedoskonałość monokryształów krzemu (niedostateczna jednorodność powierzchni). Ze względu na sposób wykonania tranzystorów metoda stopowa nie nadaje się do zautomatyzowania, a więc mimo posiadania innych zalet ma kardynalną wadę produkcji ręcznej — duży stosunkowo rozrzut parametrów.

Metoda wzrostu przejść *p-n* — stosuje się tu zasadniczo dwa rodzaje techniki produkcji. W jednym przypadku przejścia *p-n* uzyskuje się w czasie wzrostu monokrystalicznej pałeczki dzięki okresowej zmianie szybkości wzrostu pałeczki lub okresowej zmianie temperatury. W drugim przypadku pałeczka monokrystaliczna (zawierająca zarówno domieszki akceptorowe, jak i donorowe) jest przy pomocy odpowiedniej długości impulsu nagrzewana w ten sposób i w takim układzie cieplnym, że stopieniu ulega jeden z jej końców. Po ustaniu impulsu wskutek gwałtownego ochładzania następuje taka segregacja domieszek, że powstają dwa złącza *p-n* o wzajemnej odległości zależnej od szybkości ochładzania. Odległości te są bardzo małe (nie przekraczają 10 μ), co zapewnia uzyskiwanie wartości częstotliwości granicznej większych niż 30 MHz i dochodzących nawet do 100 MHz.

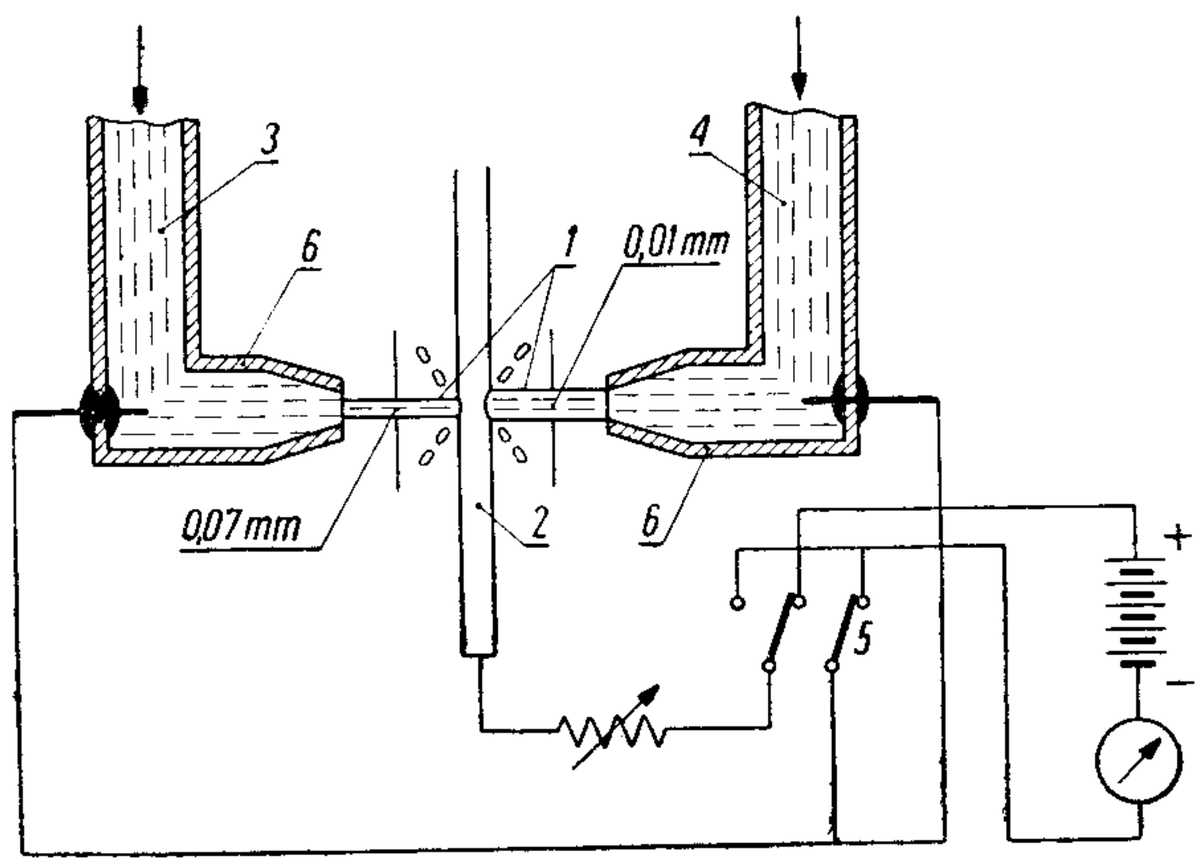
Tranzystory wykonywane metodą wzrostu przejść *p-n* pracują doskonale jako tranzystory małej mocy i bardzo wielkiej częstotliwości. Tego

typu tranzystory pracują przeważnie jako tranzystory tetrodowe, tj. takie, w których obszar bazy ma dwa wyprowadzenia umieszczone po przeciwnych jej stronach.

Tranzystory o przejściach *p-n* uzyskiwanych metodą wzrostu nadają się doskonale do produkcji zautomatyzowanej i taką właśnie uruchomiono w firmie General Electric Company (w oparciu o prace Bell Laboratories Record) i w firmie Texas Instruments.

Aparatura jest bardzo precyzyjna, gdyż musi ona bardzo dokładnie określić środek obszaru bazy, którego grubość może wynosić niewiele więcej niż 2÷4 μ. W tym punkcie wykonuje ona również połączenie do bazy (o małej oporności przejścia i charakterystyce liniowej). Proces wzrostu złącz *p-n* jest szczególnie użyteczny w produkcji tranzystorów krzemowych.

Tranzystory wykonywane metodą elektrochemiczną powstają w dwuetapowym procesie elektrolitycznym. W etapie pierwszym płytkę ścienia się obustronnie w jej części środkowej za pomocą dwu współosiowych strumieni elektrolitu o średnicy około 0,5÷0,7 mm (rys. 7). Po wytrawieniu dołków o takiej głębokości, aby przedzielająca je grubość płytki wynosiła 2÷5 μ kierunek prądu odwraca się, co powoduje nakładanie się metalu elektrod (np. indu, kadmu, miedzi). Bariery *p-n* powstają przy powierzchni półprzewodnika w bezpośrednim sąsiedztwie elektrod.



Rys. 7. Schemat ideowy stosowany przy produkcji tranzystorów metodą elektrolityczną
1 — strumień elektrolitu; *2* — płytka półprzewodnikowa; *3*, *4* — elektrolit; *5* — przełącznik; *6* — rurki szklane

Tego typu tranzystor jest produkowany w dość znacznych ilościach przez amerykańską firmę Philco. Zaletą jego jest duża częstotliwość graniczna wynosząca 30÷80 MHz zależnie od typu. Wadą jest jednak niskie napięcie kolektora wynoszące około 4,5 V i mała moc admisyjna wynosząca około 20 mW. Produkcja tego typu tranzystorów jest trudna, wymaga nadzwyczajnej czystości zarówno elektrolitu, jak i warunków, w których odbywa się proces obróbki elektrolitycznej. Metodą tą wykonuje się tranzystory krzemowe i germanowe.

Metoda dyfuzyjna, jak sama nazwa wskazuje, polega na dyfuzji domieszek do wnętrza półprzewodnika. Przy odpowiednim doborze dwóch domieszek wprowadzanych jednocześnie lub osobno, przy odpowiednim doborze temperatury i czasu trwania procesu oraz początkowej koncentracji domieszek w płytce można uzyskać dwa złącza *p-n* o żądanej względem siebie odległości.

Zaletą tego rodzaju technologii jest bardzo prawidłowa geometria złącz uzależniona tylko od kształtu powierzchni płytki. Jeżeli ścianki płytki są równoległe, to i powierzchnie złącz będą równoległe. Dzięki tym właściwościom złącz dyfuzyjnych uzyskuje się bardzo małe odległości między nimi (rzędu 2 μ), a dzięki ich płaskości osiąga się bardzo wielkie częstotliwości: około 500 MHz w przypadku germanu i ponad 100 MHz w przypadku krzemu (różnica w wartości częstotliwości wynika tylko z różnicy ruchliwości nośników w obu rodzajach materiałów). Otrzymuje się również stosunkowo duże moce (ok. 200 mW dla germanu i 400 mW dla krzemu). Wszystkie te właściwości wskazują na to, że jest to niewątpliwie technologia przyszłości. Trzeba podkreślić jednak, że informacje dotyczące technologii wykonywania tranzystorów tą metodą są bardzo skąpe i dane powyższe uzyskano przy badaniu serii prototypowych (mniej niż 100 sztuk) i dalszych informacji brak. Niewątpliwie pewne trudności nastręcza technologia połączeń z obszarami bazy i emitera, wydaje się jednak, że z chwilą rozwiązania tej kwestii możliwe jest nawet daleko posunięte zautomatyzowanie procesów produkcyjnych.

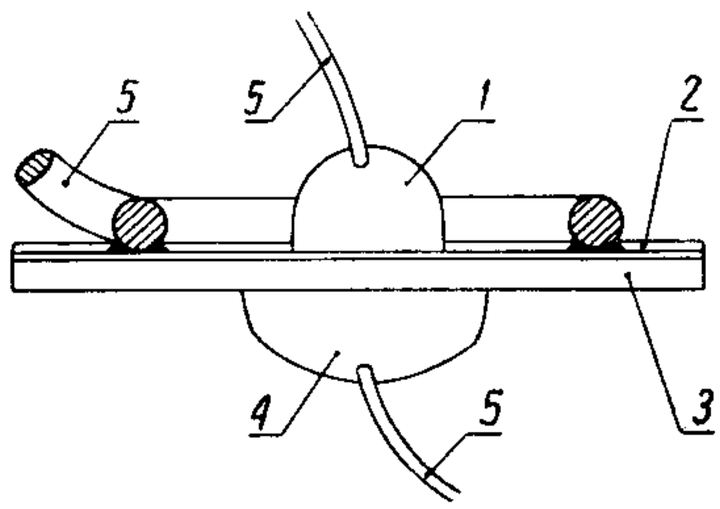
Aby ocenić w sposób wystarczający osiągnięcia w technice wykonywania tranzystorów, należy jeszcze wspomnieć o dwu etapach rozwoju tej techniki. Pierwszy z nich to opracowanie tranzystorów z warstwą samoistną, tzn. *p-n-i-p* (lub *n-p-i-n*), drugi zaś to opracowanie tranzystorów polowych (fieldistor). Oba te typy pozwalają nie tylko uzyskać większe częstotliwości graniczne, lecz także umożliwiają uzyskanie większych mocy.

W tranzystorze o warstwie samoistnej (rys. 8), który może być produkowany zarówno metodą stopową, jak i metodą wzrostu złączy *p-n*, warstwa ta redukuje znacznie pojemność kolektora oraz umożliwia podwyższenie napięcia kolektora, a więc i zwiększenie mocy admisyjnej. Maksymalne częstotliwości graniczne tranzystorów germanowych tego typu wynoszą 200 MHz przy mocach admisyjnych dochodzących do 100 mW. Częstotliwość drgań w układach generatorowych osiąga 10^9 Hz.

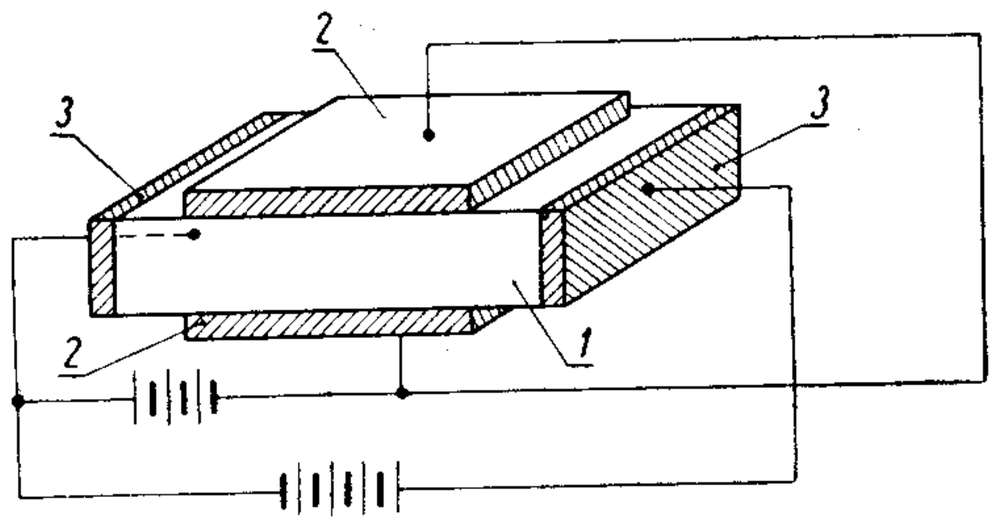
Fieldistory (rys. 9) wykonywane metodą stopową pozwalają na osiągnięcie częstotliwości granicznych rzędu około 100 MHz i zapewniają dość duże moce admisyjne, np. 5 W przy częstotliwości 2 MHz i około 200 mW przy częstotliwości 50 MHz. Produkcja tego typu tranzystorów nie wy-

szła jednak poza laboratorium. Oprócz tego ze względu na stosunkowo wysoki poziom szumów fieldistory są stosowane wyłącznie w stopniach pracujących przy wysokim poziomie mocy, np. w generatorach.

Uzupełniając informacje dotyczące charakterystycznych właściwości tranzystorów należy podkreślić, że poziom szumów produkowanych obecnie tranzystorów nie zależy w zasadzie od rodzaju technologii złącz, lecz przede wszystkim od niedoskonałości dalszych procesów, którym poddaje się tranzystor. Dotyczy to w szczególności zjawiska rekombinacji po-



Rys. 8. Tranzystor z warstwą samoistną
1 — emiter; *2* — warstwa bazy; *3* — warstwa samoistnego półprzewodnika; *4* — kolektor; *5* — połączenie do emitera kolektora i bazy



Rys. 9. Fieldistor
1 — płytka germanowa; *2* — elektrody indowe prostujące; *3* — elektrody nie prostujące o małej oporności

wierzchniowej, która jest uwarunkowana w wysokim stopniu stanem powierzchni, a więc zależy od metody trawienia, czystości mieszanki trawiącej, czystości wody destylowanej itp. Wynika z tego duży rozrzut poziomu szumów, wynoszący przeciętnie około 16 dB. Przy tym w tranzystorach warstwowych, które były prawidłowo przygotowane, poziom szumów jest bardzo bliski wartości teoretycznej.

Charakterystyczną cechą tranzystorów warstwowych jest to, że szumy ich zależą w bardzo wysokim stopniu od temperatury pracy i przy dostatecznie niskich napięciach kolektora poniżej 0,3 V, mogą być nawet mniejsze niż szumy lampy elektronowej.

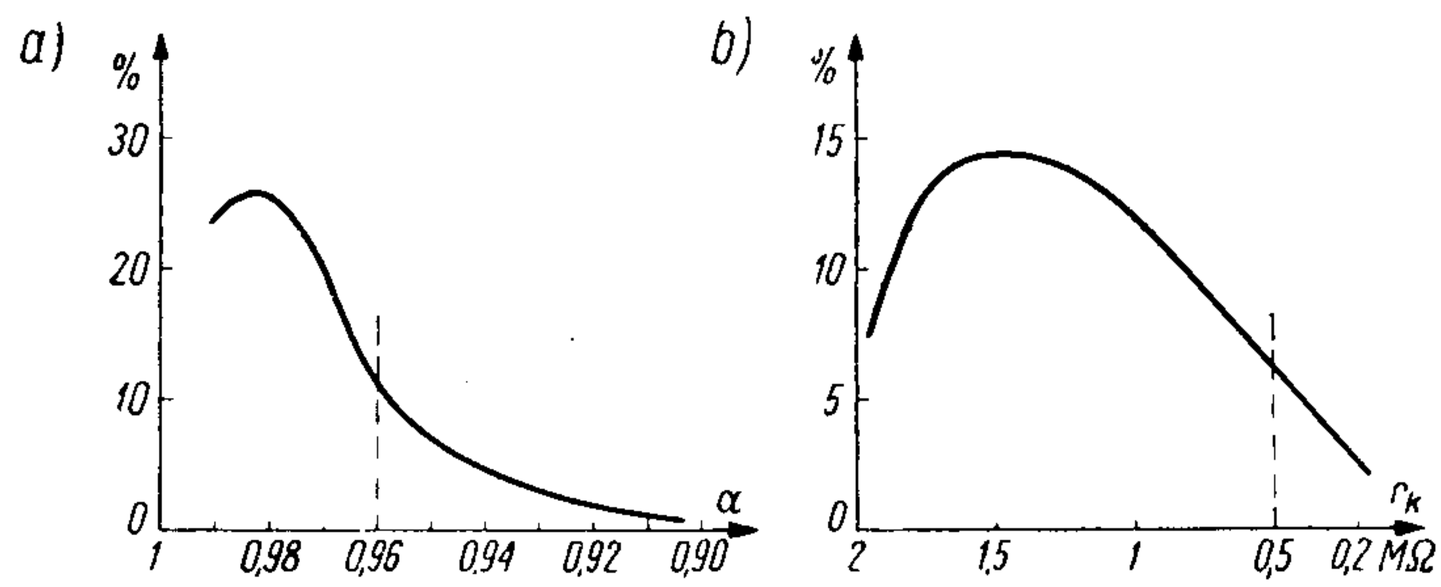
*
* *

Ten krótki przegląd stanu techniki tranzystorowej można podsumować w sposób następujący:

Produkcja tranzystorów o mocy do 100 W i częstotliwości do 10 MHz została rozwiązana w sposób zadowalający. Obserwuje się jej stały wzrost. Przewidywana na 1957 r. produkcja tranzystorów mocy miała wynosić 4 mln sztuk, tranzystorów małej mocy zaś ponad 30 mln sztuk. Około

1960 lub 1961 roku powinno nastąpić zrównanie produkcji przyrządów półprzewodnikowych z produkcją lamp elektronowych. Koszt tranzystorów, szczególnie tranzystorów mocy i wielkiej częstotliwości, jest wyższy niż koszt lamp elektronowych. Mimo stałego wzrostu produkcji istnieje jednak jeszcze szereg poważnych trudności, których usunięcie wymaga rozległych badań laboratoryjnych:

a. Dotyczących metody ograniczenia podczas produkcji rozrzutu wartości parametrów elektrycznych, szczególnie współczynnika α (rys. 10 a) i oporności kolektora r_k (rys. 10 b) oraz przebiegu współczynnika $b = \frac{\alpha}{1-\alpha}$ w funkcji prądu emitera. Z tym związane jest zagadnienie



Rys. 10. Krzywe rozrzutu współczynnika α i oporności kolektora r_k zdjęte dla 500 tranzystorów

opracowania zastosowań dla tranzystorów o wartościach parametrów odbiegających od wartości przeciętnych. Obniży to, oczywiście, koszt wyprodukowania tranzystora. Wydaje się, że metoda dyfuzyjna jest jedyną metodą produkcyjną, która zapewni minimum rozrzutu parametrów i minimum odpadu.

b. Dotyczących zwiększenia trwałości tranzystorów i ograniczenia rozrzutu szumu. Sprowadza się to do opracowania sposobów oczyszczania powierzchni i stabilizacji jej właściwości przed ostatecznym uszczelnieniem (hermetyzacją). Opieramy się obecnie na niedostatecznej liczbie obserwacji, a raczej na zbiorze doświadczalnie określonych przepisów nie popartych dostateczną znajomością zjawisk. Prace te należą do najbardziej istotnych dla techniki tranzystorowej. Z dotychczasowych danych wynika, że współczynnik b może podczas eksploatacji zmniejszyć się dwukrotnie oraz że trwałość może wynosić równie dobrze 1000, jak i 20000 godzin. Brak jest szczegółowych danych statystycznych ze względu na stosunkowo krótki okres produkcji i eksploatacji.

c. Dotyczących zwiększenia częstotliwości granicznej tranzystorów — badania zmierzają bądź w kierunku opracowania materiałów półprzewodnikowych o większej ruchliwości nośników (wystarczy kilkakrotne

zwiększenie tej ruchliwości w stosunku do ruchliwości nośników w germanie), bądź to w kierunku opracowania nowych zasad wzmacniania. Nowa teoretycznie zasada wzmacniania w tranzystorze została podana w numerze 1 z 1957 roku czasopisma „Proceedings of the nstitute of Radio Engineers".

d. Dotyczących powiększenia mocy użytecznej tranzystora przez wprowadzenie materiałów o szerszym pasmie zabronionym niż w przypadku germanu. Zastosowanie krzemu przy jednoczesnym użyciu sztucznego chłodzenia powinno przesunąć granicę mocy użytecznych w okolicę 1 kW. Osiągnięcie tych wartości mocy jest uzależnione od dalszej poprawy właściwości monokryształów krzemu oraz od postępów w technice krzemowych tranzystorów stopowych. Ze względu na znacznie lepsze charakterystyki temperaturowe niż w przypadku germanu korzystne wydaje się stosowanie stopów krzemowo-germanowych. Już przy nieznacznej bowiem zawartości procentowej krzemu powyżej 5% szerokość pasma zabronionego ulega dużemu powiększeniu — podwyższa się przy tym napięcie wsteczne.

e. Dotyczących zwiększenia mocy admisyjnej tranzystorów wielkiej częstotliwości, która obecnie jest zbyt mała, jeżeli chodzi o zastosowania w urządzeniach nadawczych. Moce 1,5 W przy częstotliwości 5 MHz i 200÷400 mW przy częstotliwości 100 MHz są osiągane w tranzystorach krzemowych produkowanych metodą wzrostu i metodą dyfuzyjną.

*

* *

Ten krótki przegląd rozwoju techniki półprzewodników pozwala na wyciągnięcie następujących wniosków dotyczących: a) stopnia przydatności przyrządów półprzewodnikowych w urządzeniach tele- i radiokomunikacyjnych, b) badań w zakresie technologii i konstrukcji oraz c) zagadnień techniczno-produkcyjnych.

a. Można stwierdzić, że zarówno diody, jak i triody krystaliczne skutecznie zastępują lampę elektronową w większości wykonywanych przez nią funkcji, jak na przykład we wzmacniaczach małej i wielkiej częstotliwości małej mocy, w generatorach częstotliwości, w urządzeniach akustycznych średniej mocy (mniejszych niż 100 W) itp. W szeregu zastosowań lampa elektronowa ustępuje elementom półprzewodnikowym ze względu na ich dużą sprawność energetyczną, wynikającą przede wszystkim z braku żarzenia i korzystnej charakterystyki napięciowo-prądowej, a w szeregu przypadków ze względu na prostotę układu, co szczególnie w przypadku takich urządzeń, jak maszyny matematyczne, bardzo obniża koszt inwestycyjny tego rodzaju urządzeń, chociaż liczba tranzystorów jest na ogół o 50÷100% większa niż liczba lamp elektronowych. Zaletą

przyrządów półprzewodnikowych jest oprócz tego ich duża trwałość, która przy dalszej poprawie technologii produkcji znacznie przekroczy trwałość lamp elektronowych. Dotyczy to szczególnie lamp prostowniczych i w stopniach końcowych.

Z powyższych względów konieczny jest szybki rozwój tej gałęzi techniki postępujący równolegle z rozwojem techniki lampowej. Dostatecznie szybki rozwój produkcji elementów półprzewodnikowych umożliwi ich eksport na rynki zagraniczne, które w tej chwili są bardzo chłonne, gdyż produkcja światowa jeszcze nie zaspokaja popytu.

b. Jeżeli chodzi o badania, to, biorąc pod uwagę osiągnięcia i potrzeby w dziedzinie tranzystorów, należy wysunąć następujące zagadnienia:

1) technologia diod bardzo dużej mocy o wysokim napięciu pracy,
2) technologia tranzystorów wielkiej i bardzo wielkiej częstotliwości,
3) tranzystory bardzo dużej mocy,
4) elementy półprzewodnikowe o małym wpływie temperatury na właściwości elektryczne.

Rozwiązanie problemów wymienionych pod 1, 3 i 4 wymaga opracowania materiałów o małym wpływie temperatury na właściwości przyrządów półprzewodnikowych, a więc odznaczających się dużą szerokością pasma zabronionego oraz dużym współczynnikiem przewodności cieplnej. Zapewnia to skuteczne chłodzenie złącz *p-n*.

Na plan pierwszy należy wysunąć prace nad krzemem, a następnie nad stopami krzemu z germanem. Opanowanie technologii krzemu oraz krzemowych diod stopowych i tranzystorów mocy rozwiąże zagadnienie elementów dużej mocy, opanowanie zaś technologii monokrystalizacji stopów krzemowo-germanowych rozwiąże zagadnienie tranzystorów wielkiej częstotliwości większej mocy.

Pozytywne rozwiązanie problemów wymienionych w p. 1, 2 i 3 wymaga takiego opracowania monokrystalizacji germanu i krzemu, aby możliwe było uzyskanie monokryształów o odpowiednich właściwościach, a mianowicie o określonej koncentracji domieszek (oporności właściwej), określonym czasie życia oraz gęstości dyslokacji. Na przykład dla diod mocy wymagana jest dostatecznie duża oporność zależna od wymaganej charakterystyki oraz stosunkowo długi czas życia. Dla tranzystorów oporność powinna wynosić 1 Ωcm, a czas życia — co najmniej 500 μs.

Uzyskiwanie monokryształów o zadanych z góry właściwościach wymaga wykonania długotrwałych i intensywnych badań. Zagadnienia konstrukcji obejmuje prace nad sposobami efektywnego chłodzenia złącz *p-n* oraz ich geometrią zapewniającą otrzymanie zadanych wartości parametrów, np. małych oporności czynnych obszarów sąsiadujących ze złączem, małej oporności bazy, małych pojemności złącz itp.

c. Produkcja elementów półprzewodnikowych oraz materiałów stosowanych przy ich wykonywaniu wymaga — podobnie jak i wykonywanie badań nad półprzewodnikami — zorganizowania odpowiedniej bazy dostarczającej surowców do produkcji czystych materiałów półprzewodnikowych, dostarczającej materiałów domieszkowych o bardzo dobrej czystości, zwykle lepszej niż spektralna, pewnych metali, jak tantal, złoto, nikiel, oraz chemikaliów, jak ług potasowy, kwas azotowy, kwas fluorowodorowy, kwas solny i smarów.

Wszystkie chemikalia muszą być doskonale czyste, jest to bowiem zasadniczy warunek ekonomicznej produkcji gwarantujący mały odpad.

Ze względu na duży wpływ szeregu parametrów geometrycznych, a więc na przykład grubości płytki półprzewodnikowej, rozmiarów elektrod indowych itp., na parametry elektryczne konieczna jest bardzo szczegółowa analiza wyników połączona z celowo wykonywanymi zmianami parametrów geometrycznych oraz warunków obróbki cieplnej, co w konsekwencji prowadzi do szeregu prac badawczych o dużym znaczeniu dla jakości i ekonomiki produkcji.

* *
*

Jak z tego krótkiego przeglądu wynika, nasze laboratoria badawcze oraz jednostki produkcyjne mają szereg poważnych problemów do rozwiązania, od których zależy należyty rozwój techniki elementów półprzewodnikowych.

В. Росиньски

О ТРАНЗИСТОРАХ

В статье обсуждено точечные и плоскостные транзисторы. После вступительной части, указывающей различия в конструкции и действии этих родов транзисторов, представлено в хронологическом порядке развитие методов их производства. Особое внимание уделено плоскостным транзисторам и разобрано методы получения p—n переходов: метод вплавления, метод вытягивания, метод электрохимического осаждения и метод диффузии. В заключении автор делает выводы о направелниях дальнейшего совершенствования методов производства транзисторов.

W. Rosiński

ON TRANSISTORS

In the article point- and junction transistors are discussed generally. After some introductory information about differences in the design and working of the two transistor types the development of their production methods is given chronologically. A main subject of the article is the survey of the following methods: alloying, growing, electrochemical method and diffusion method. In the final part of the article the author gives his conclusions as to the directions of further improvement of transistor production methods.