

TECHNOLOGIA TRANZYSTORÓW OSTRZOWYCH (Część pierwsza)

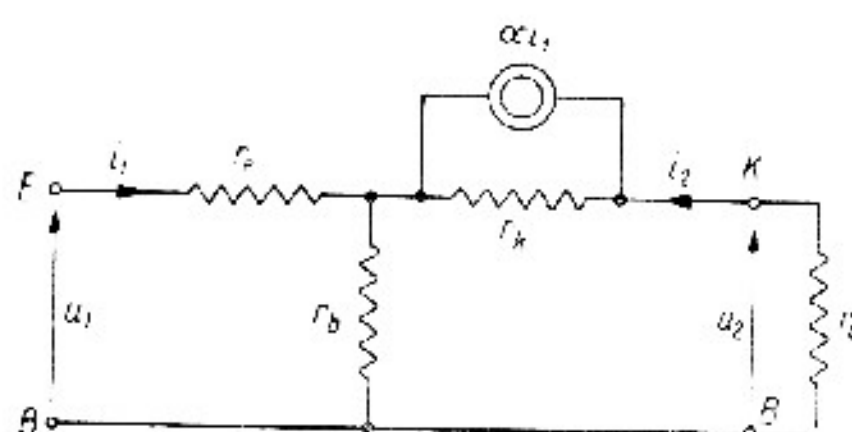
W artykule omówiono zasady projektowania tranzystorów ostrzowych oraz procesy technologiczne stosowane przy produkcji ich, obejmujące technologię oprawki, styku metal-półprzewodnik i elektrycznego formowania styków.

ZAŁOŻENIA KONSTRUKCYJNE

Tranzystory ostrzowe znajdują zastosowanie w różnego rodzaju układach wzmacniających i generacyjnych. Zależnie od rodzaju zastosowania dobiera się odpowiednie parametry tranzystora.

Dokładną ocenę wpływu poszczególnych parametrów na właściwości układów tranzystorowych umożliwia analiza wzorów określających współczynnik wzmocnienia k_p oraz stabilność układu.

Rys. 1. Układ zastępczy tranzystora (przy małych częstotliwościach)



Analizę wzoru określającego współczynnik k_p ograniczymy do najczęściej stosowanego przypadku ze względu na stabilność układu, a mianowicie do przypadku układu o wspólnej bazie (rys. 1). Wzór ten ma postać następującą:

$$k_p = \frac{\alpha^2}{\left(1 + \frac{r_b}{r_e} + \frac{r_o}{r_k}\right) \left[\frac{r_b}{r_o} \left(1 - \alpha + \frac{r_e}{r_k} + \frac{r_o}{r_k}\right) + \frac{r_e}{r_o} \left(1 + \frac{r_b}{r_k}\right) \right]} \quad (1)$$

przy czym: α — zwarciovowy współczynnik wzmocnienia prądowego;
 r_e — oporność emitera; r_b — oporność bazy; r_k — oporność kolektora;
 r_o — oporność obciążenia.

Z wyrażenia (1) wynika, że wzmacnienie wzrasta ze wzrostem wartości współczynnika α ; wartość pozostałych parametrów musi być jednak jednocześnie taka, aby warunek stabilności układu był zachowany. Z warunku

$$r_b \left(1 - \alpha + \frac{r_e}{r_k} + \frac{r_o}{r_k} \right) + r_e \left(1 + \frac{r_o}{r_k} \right) \approx 0 \quad (2)$$

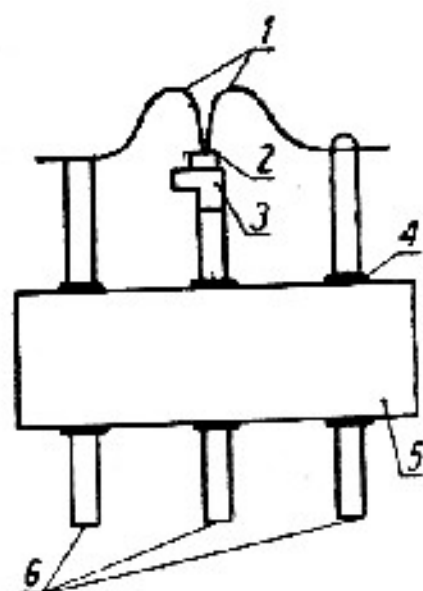
wynika, że wartość oporności bazy r_b powinna być jak najmniejsza, aby zachowana była nierówność

$$\alpha < 1 + \frac{r_e}{r_b} \left(1 + \frac{r_o}{r_k} \right) + \frac{r_o}{r_k} + \frac{r_o}{r_k} \quad (3)$$

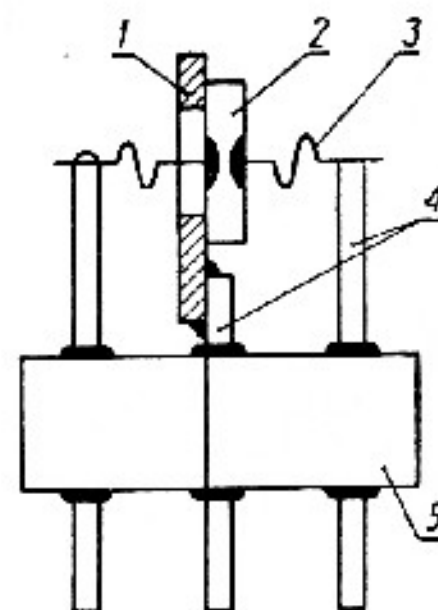
W przypadku stosowania układów generacyjnych parametry ich muszą mieć takie wartości, aby spełniona była nierówność

$$\alpha > 1 + \frac{r_e}{r_b} \left(1 + \frac{r_o}{r_k} \right) + \frac{r_o}{r_k} + \frac{r_o}{r_k} \quad (4)$$

Z warunku tego widać, że wartość oporności bazy r_b powinna być duża, wartość zaś oporności emitera r_e — mała. Oprócz tego oporność obciążenia r_o powinna być dużo mniejsza od oporności kolektora.



Rys. 2. Konstrukcja tranzystora ostrzowego płaskiego
1 — ostrza emitera i kolektora; 2 — płytka germanu; 3 — stopka; 4 — przepust ceramika-metal; 5 — podstawa ceramiczna; 6 — wyprowadzenia elektrod



Rys. 3. Konstrukcja tranzystora osiowego
1 — płytka niklowa; 2 — płytka półprzewodnikowa; 3 — ostrza; 4 — wyprowadzenia elektrod; 5 — podstawa ceramiczna

Ponieważ oporność r_b może być zwiększona za pomocą oporności dodatkowej, przeto tranzystory w obu omówionych wyżej rodzajach powinny mieć dużą wartość współczynnika α , małą oporność bazy r_b i dużą oporność kolektora r_k .

Tranzystor ostrzowy może być wykonany w dwóch postaciach przedstawionych na rys. 2 i 3. W przypadku pierwszym (rys. 2) tranzystor jest

utworzony przez dwa ostrza z brązu fosforowego, ustawione obok siebie na płytce germanu. Przeciwna strona tej płytki jest metalizowana, co zapewnia małą oporność (liniową) połączenia z płytką półprzewodnikową. W drugim przypadku (rys. 3) ostrza z brązu fosforowego znajdują się naprzeciw siebie i są rozdzielone płytką półprzewodnikową zaopatrzoną w symetrycznie umieszczone odprowadzenie mające małą oporność, wykonane zwykle w postaci przylutowanego pierścienia.

Rozpatrzmy teraz wpływ konstrukcji tranzystora na wartości parametrów r_b , r_k i α .

Zwarciovyy współczynnik wzmocnienia prądowego

Zwarciovyy współczynnik wzmocnienia prądowego

$$\alpha = - \left(\frac{\partial I_k}{\partial I_e} \right)_{U_k = \text{const}} \quad (5)$$

jest określony wyrażeniem

$$\alpha = \alpha^* \beta \delta \quad (6)$$

Współczynnik γ określa stosunek prądu mniejszościowego emitera do jego prądu całkowitego. Wartość tego współczynnika zależy od wartości prądu emitera. Przy prądach emitera mniejszych niż 5 mA wynosi on dla germanu o przewodnictwie typu n 0,9÷0,95. Dla tranzystorów wykonanych z germanu typu p wartość tego współczynnika zależy od sposobu formowania i wynosi 0,3÷0,65.

Wartość współczynnika γ nie zależy od rodzaju zastosowanego na ostrze metalu.

Współczynnik przenoszenia nośników β jest funkcją stosunku czasu przelotów τ_p do czasu życia τ_z

$$\beta = \frac{1 - \exp\left(-j\omega\tau_p - \frac{\tau_p}{\tau_z}\right)}{j\omega\tau_p + \frac{\tau_p}{\tau_z}} \quad (7)$$

Czas przelotu τ_p określa zależność

$$\tau_p = \frac{\sigma W^2}{u I_e} \quad (8)$$

w której: σ — przewodność płytki, w $\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$; W — odległość ostrzy, w cm; u — ruchliwość nośników mniejszościowych, w cm^2/Vs ; I_e — prąd emitera, w A.

Wartości τ_p obliczone według tego wzoru są trzy- lub czterokrotnie mniejsze niż wartości wyznaczone doświadczalnie i zależą — ze względu

na wpływ pola elektrycznego — od układu elektrod. Wartości te są na ogół większe w przypadku osiowego układu elektrod (rys. 3).

Ze względu na oddziaływanie prądu I_e na przewodność σ stosunek σ/I_e pozostaje stały.

Współczynnik α^* uwzględnia sposób oddziaływania nośników mniejszościowych, wprowadzanych przez emiter, na wielkość bariery potencjału w obszarze kolektora. Wartość tego współczynnika zależy przede wszystkim od sposobu formowania styku kolektora.

Dużą wartość współczynnika α uzyskuje się dzięki doborowi odpowiedniego materiału półprzewodnikowego o czasie życia powyżej 5 μ s, co zapewnia wartość współczynnika $\beta \approx 1$ przy stosowanych w praktyce odległościach ostrzy 40 ÷ 50 μ , oraz dzięki właściwej metodzie formowania styku kolektora, co wywołuje zbliżenie obszarów emitera i kolektora oraz zwiększenie wartości współczynnika α^* .

Oporność emitera

Oporność emitera r_e składa się z oporności bariery obszarów emiter-baza oraz oporności obszaru między stykiem a barierą. Obie te wielkości są w przybliżeniu odwrotnie proporcjonalne do prądu emitera. Oporność przejścia maleje ponadto odwrotnie proporcjonalnie do oporności właściwej materiału. Oporność emitera wynosi przy $I_e = 1$ mA około 100 ÷ 150 Ω .

Oporność bazy

Oporność bazy r_b wynika z oddziaływania prądu obwodu kolektora na obwód emitera. Oddziaływanie to zależy od stosunku odległości W ostrzy do grubości d płytki (rys. 2 i 3). W przypadku tranzystora o konstrukcji pokazanej na rys. 2 jest ona określona wzorem

$$r_b = \frac{\rho}{2\pi W} \left[1 - 0,693 \frac{W}{d} + 0,113 \left(\frac{W}{d} \right)^2 \right] \quad (9)$$

Małe wartości r_b uzyskuje się przez dobór materiału o możliwie małej wartości ρ (ok. 1 ÷ 3 Ω cm) i możliwie małej grubości d płytki. Ze względu na trudności formowania grubości tej nie należy zmniejszać poniżej 0,15 mm. Proces formowania ze względu na zmniejszenie się efektywnej wartości W wywołuje wzrost oporności bazy.

W przypadku tranzystora osiowego oporność bazy określa zależność

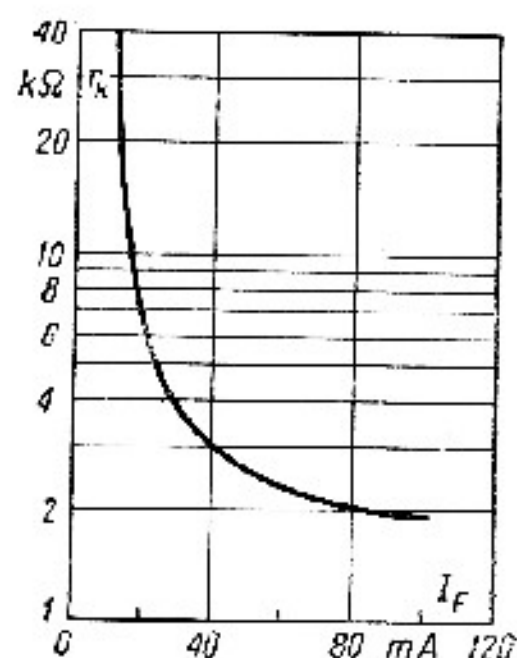
$$r_b = \frac{\rho}{8\pi d} \quad (10)$$

W celu zmniejszenia oporności r_b korzystne jest w tym przypadku wykonać w płytce zagłębienia, co pozwala zmniejszyć odległość ostrzy.

Oporność kolektora

Wartości oporności kolektora r_k zmieniają się w szerokich granicach ze względu na ogromny wpływ procesu formowania styku kolektora. W końcowym wyniku formowania oporność r_k zależy od oporności materiału półprzewodnikowego, rodzaju metalu styku, średnicy styku oraz siły nacisku.

Na rys. 4 uwidoczniono wpływ formowania prądu styku kolektora. Wartość bezwzględna tej zależności może być całkiem inna, jeśli zmienić nacisk ostrza kolektora przed formowaniem. Oporność r_k jest w tych samych warunkach formowania (zwłaszcza przy mniejszych prądach formowania) tym większa, im większa jest oporność właściwa materiału płytki.

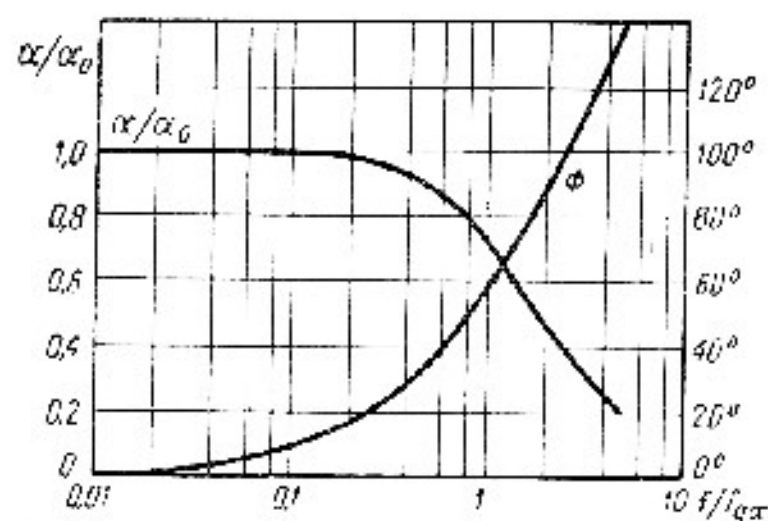


Rys. 4. Zależność oporności kolektora r_k od prądu formowania I_F

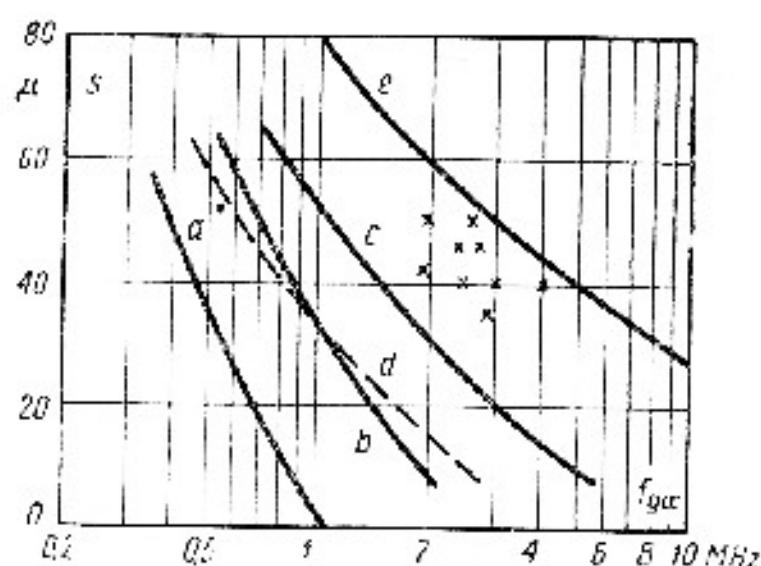
Częstotliwość graniczna $f_{g\alpha}$ i f_{gu}

Szerokość wzmacnianego pasma zależy od przebiegu amplitudy i fazy współczynnika α w funkcji częstotliwości (rys. 5). Właściwości tranzystora pod tym względem określa częstotliwość $f_{g\alpha}$, przy której współczynnik α maleje o 3 dB w stosunku do wartości przy małych częstotliwościach.

Wartość częstotliwości $f_{g\alpha}$ zależy od czasu przelotu τ_p , a więc od odległości ostrzy W i od ruchliwości nośników mniejszościowych u . Ze względu na większą ruchliwość nośników przy stosowaniu germanu typu p często-



Rys. 5. Wykres zależności α/α_0 i fazy ϕ od $f/f_{g\alpha}$



Rys. 6. Wpływ sposobu formowania na częstotliwość graniczną
a — formowanie długimi impulsami styku kolektor-baza; b — formowania krótkimi impulsami styku kolektor-baza; c — formowanie krótkimi impulsami styku kolektor-emiter; d — formowanie długimi impulsami między kolektorem a emiterem

tliwości graniczne są dwukrotnie większe. Częstotliwość graniczna ze względu na współczynnik α zależy w dużym stopniu od przebiegu procesu formowania. Najlepsze wyniki uzyskuje się przy formowaniu międzyostrzowym (kolektor-emiter) za pomocą krótkich impulsów prądowych (trwających mniej niż 10 ms). Wpływ sposobu formowania na częstotliwość graniczną pokazano na rys. 6.

Przy użyciu tranzystora w układzie wzmacniającym występuje dalsze ograniczenie szerokości wzmacnianego pasma, zależne od sposobu połączenia tranzystora. Na ograniczenie to wpływa zarówno wartość współczynnika α , jak i wartości innych parametrów tranzystora. Aby uzyskać możliwie dużą wartość częstotliwości granicznej f_{gu} uwzględniającej wpływ układu, należy utrzymać możliwie małe wartości oporności r_b , a w szczególności możliwie małą wartość stosunku r_b/r_e .

S z u m y w y s t ę p u j ą c e w t r a n z y s t o r a c h o s t r z o w y c h

Szумы występujące w tranzystorach ostrzowych wynikają: 1) z natury zjawisk zachodzących w półprzewodnikach i 2) z niedoskonałości styku metal-półprzewodnik (powodującej ustawiczną zmianę gęstości prądu w poszczególnych obszarach styku). W pierwszym przypadku szумы zmniejsza się przez stosowanie możliwie małego prądu i napięcia, a więc przez odpowiedni dobór punktu pracy. Wymaga to takiego projektowania tranzystorów, które zapewniałoby małe wartości prądu kolektora i liniową pracę w zakresie niskich napięć (3 ÷ 6 V) kolektora. Warunki te można spełnić stosując german o dużej czystości ($\sigma > 5 \Omega \text{ cm}$) oraz o monokrystalicznej strukturze i dobierając bardzo starannie warunki formowania (zwykle są one niedostatecznie formowane).

Proces formowania dzięki przypawaniu formowanego styku zmniejsza jednocześnie bardzo szумы styku metal-półprzewodnik i zwiększa trwałość tranzystora.

PROCESY TECHNOLOGICZNE STOSOWANE PRZY PRODUKCJI TRANZYSTORÓW

K o n s t r u k c j e t r a n z y s t o r ó w

Przy wyborze konstrukcji tranzystora należy się kierować następującymi względami:

- a) przydatnością tranzystora dla układów małej mocy,
- b) wymaganą mocą admisyjną,
- c) trwałością tranzystora.

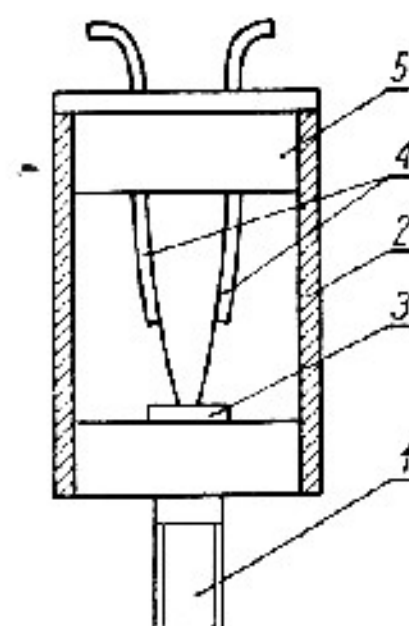
Z dwóch konstrukcji pokazanych na rys. 2 i 3 tranzystor pokazany na rys. 2 zapewnia mniejszą wartość oporności bazy r_b , bardziej powtarzalny proces formowania oraz większą częstotliwość graniczną f_{ga} ; jest on szczególnie przydatny w układach wielkiej częstotliwości. Ten typ tranzystora nie pozwala na stosowanie dużych prądów emitera, które wywołują zwarcie elektrod emiter-kolektor, zwłaszcza przy odstępach między elektrodami nie przekraczających 50μ . W przypadku tranzystorów mocy odstęp między elektrodami powinny wynosić $70 \div 90 \mu$.

Konstrukcja tranzystora pokazanego na rys. 3 jest szczególnie korzystna przy częstotliwościach granicznych mniejszych niż $0,25 \text{ MHz}$ i dużych mocach ze względu na mniejsze prawdopodobieństwo zwarcia elektrod kolektor-emiter przy dużych prądach emitera.

Również ze względu na trwałość tranzystora i stałość jego parametrów lepsze jest rozwiązanie konstrukcyjne pokazane na rys. 3, zapewnia ono bowiem stałą odległość styków. Przy dużych mocach admissyjnych, które w przypadku tranzystorów ostrzowych nie powinny przekraczać 200 mW , ze względu na nadmierne nagrzewanie się punktu styku płytka półprzewodnikowa powinna być przylutowana do płytki metalowej, najlepiej miedzianej (ze względu na przewodność cieplną) o możliwie dużej masie, przykręcanej do metalowej płyty montażowej (rys. 7).

Tranzystory o ostrzach umieszczonych po jednej stronie płytki mogą mieć konstrukcję dwójakiego rodzaju.

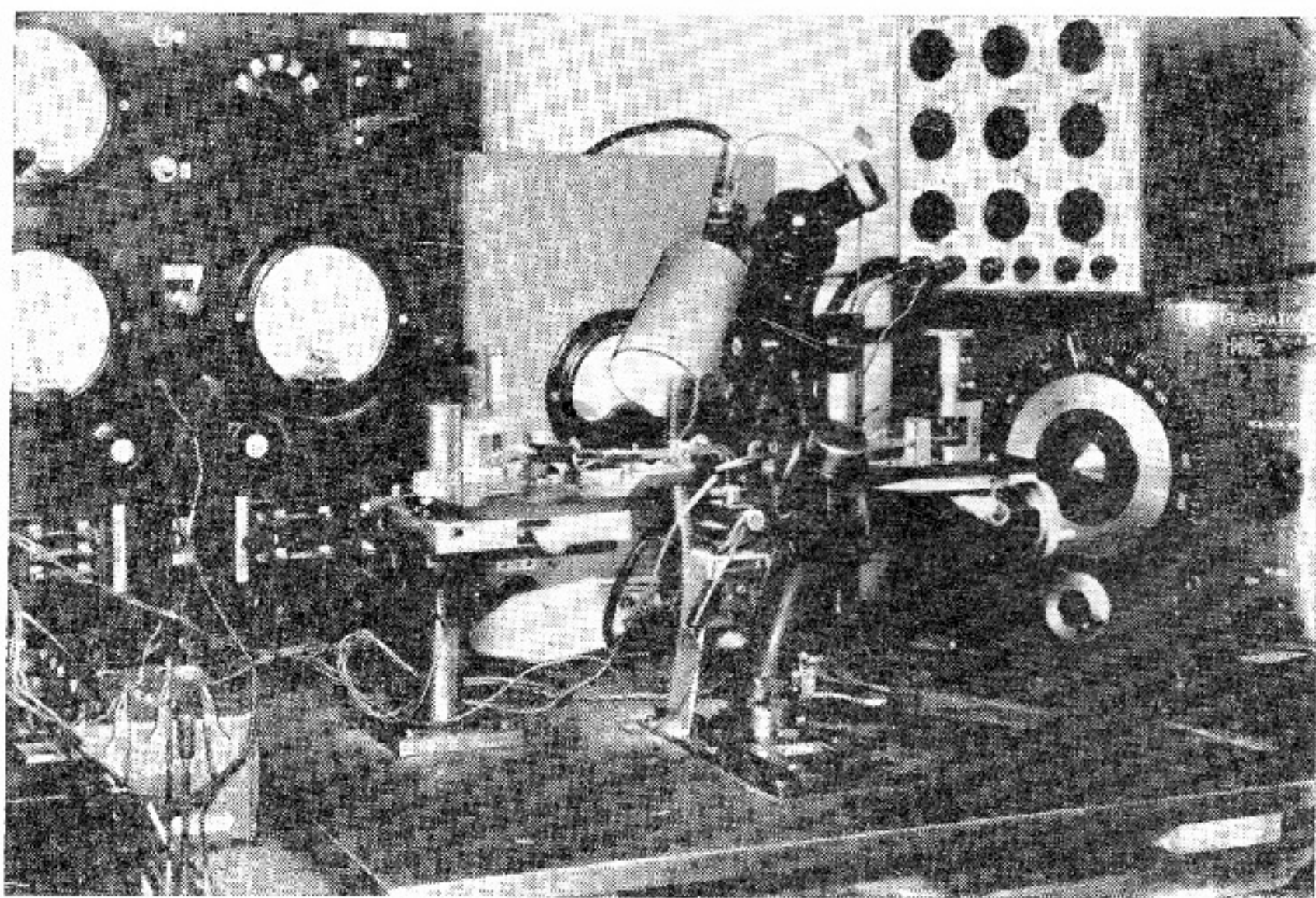
W konstrukcji pierwszego rodzaju ostrza emitera i kolektora ustawia się za pomocą mikromanipulatora składającego się z dwu stolików (rys. 8), z których każdy jest zaopatrzony w dwa precyzyjne posuwy mikrometryczne w płaszczyźnie poziomej i trzeci w płaszczyźnie pionowej. Umożliwia to ustawianie ostrzy w dowolnej względem siebie odległości i w dowolnym punkcie płytki. Płytke przylutowuje się do stopki niklowej przypawanej do środkowego próżnoszczelnego przepustu, umieszczonego w podstawie ceramicznej. Dwa zewnętrzne przepusty służą jako wsporniki sprężynek emitera i kolektora. Do wsporników tych przylutowuje się sprężynki po uprzednim ustawieniu ich za pomocą mikromanipulatora. Ustawianie i lutowanie ostrzy odbywa się pod mikroskopem przy jednoczesnej obserwacji wzmocnienia, które dostarcza tranzystor włączony w czasie ustawiania w układ wzmacniacza. Odleg-



Rys. 7. Konstrukcja tranzystora mocy
1 — śruba do przykręcania do płyty montażowej; 2 — obudowa metalowa; 3 — płytka półprzewodnikowa; 4 — ostrza; 5 — płytka ceramiczna do montażu ostrzy

łość między ostrzami wynosi $30 \div 70 \mu$, w zależności od założeń projektowych.

Po przylutowaniu sprężynek styki pokrywa się cienką warstwą polistyrenu, a następnie poddaje suszeniu za pomocą promieni podczerwonych. Suszenie powinno odbywać się w szklanym naczyniu pod ciśnieniem kilku torów, w obecności czynnika pochłaniającego parę wodną, np. pięciotlenku fosforu lub żel kwasu krzemowego. Po kilkudniowym ($3 \div 5$ dni) okresie suszenia tranzystor poddaje się procesowi elektrycznego for-

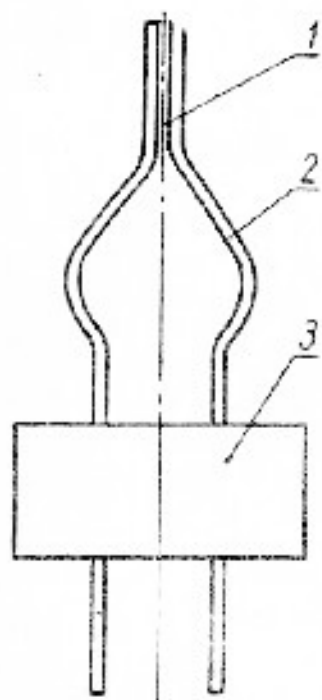


Rys. 8. Mikromanipulator

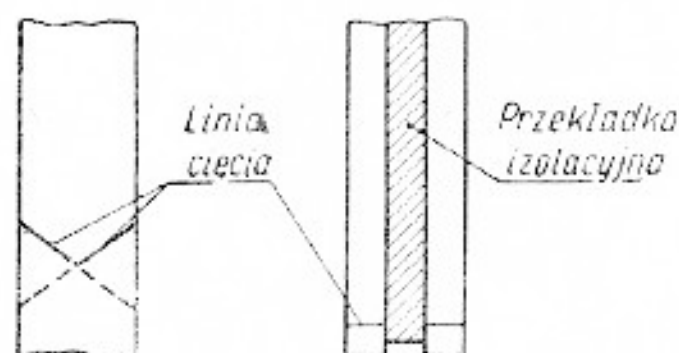
mowania w celu uzyskania wymaganych właściwości elektrycznych. Po sprawdzeniu parametrów zamyka się go hermetycznie za pomocą metalowego kubka przylutowanego do ceramicznej podstawki.

Drugi rodzaj konstrukcji różni się od pierwszego sposobem wykonania ostrzy. Ostrza wykonuje się z dwóch wstążeczek z brązu fosforowego grubości np. 50μ i szerokości 500μ , sklejonych ze sobą za pomocą jednego z polimeryzujących klejów o dobrej przyczepności do metalu. Wstążeczki muszą być uprzednio odłuszczone. Dla lepszej przyczepności powinny mieć powierzchnię chropowatą. Wymagany odstęp między wstążeczkami (ok. $30 \div 60 \mu$) uzyskuje się za pomocą odpowiednich precyzyjnie wykonanych szczęk, usuwających nadmiar kleju po ściśnięciu nimi klejonych

sprężynek. Sprężynki po sklejeniu są poddawane długiemu okresowi suszenia, trwającemu przeszło dwa tygodnie. Eliminuje to zmiany odstępów między sprężynkami po zmontowaniu tranzystora. Po wyschnięciu sprężynki wkleja się w bakelitowy korek (rys. 9) kontrolując prostopadłe położenie płaszczyzny sprężynek do powierzchni korka. Po wysuszeniu ostrza przycina się, w sposób przedstawiony na rys. 10, za pomocą gilotynki, która powinna być tak zbudowana, aby ostrza były identyczne co do długości i kształtu, prostopadłe do płaszczyzny sprężynek i aby nie było tworzenia się zadziorów przy przycinaniu ostrza.



Rys. 9 Konstrukcja ostrzy klejonych
1 — przekładka kleju; 2 — taśmy z brązu fosforowego; 3 — korek bakelitowy



Rys. 10. Przycinanie ostrzy

Taki sposób wykonania ostrzy zapewnia identyczny nacisk obu ostrzy na powierzchnię płytki, co ma duże znaczenie dla trwałości tranzystora.

Po ustaleniu siły nacisku ostrzy na płytkę miejsce styku zabezpiecza się za pomocą np. kropli żywicy epoksydowej lub polistyrenu i po wysuszeniu poddaje się formowaniu elektrycznemu, a następnie hermetycznie zamyka.

W przypadku tranzystora osiowego stosuje się te same procesy technologiczne, inna jest jednak konstrukcja oprawki. Sprężynki stykowe w tym przypadku powinny być odpowiednio prowadzone, aby zapewnić ich współosiowość. W płytce można również wykonać wgłębienia (głębokości $30+50\ \mu$) stabilizujące wzajemnie położenie ostrzy.