

ZDZISŁAW MAJEWSKI
Zakład Elektroniki
IPPT PAN

ROZWÓJ ELEKTRONIKI PÓŁPRZEWODNIKÓW

Praca dotyczy postępu, jaki miał miejsce w ostatnim dziesięcioleciu w dziedzinie techniki półprzewodników. Na wstępie przeanalizowano czynniki wpływające na rozwój elektroniki półprzewodników, a następnie omówiono rozwój najważniejszych elementów półprzewodnikowych: elementów prostowniczych, tranzystorów i półprzewodników przetworników energii. Wymienione trzy zagadnienia stanowią podstawę do podziału artykułu na trzy odrębne części¹⁾.

CZĘŚĆ PIERWSZA DIODY PÓŁPRZEWODNIKOWE

1. CZYNNIKI POSTĘPU W ELEKTRONICE PÓŁPRZEWODNIKÓW

Powstanie elektroniki półprzewodników jako odrębnej gałęzi techniki jest wynikiem wykorzystania nowopoznanych zjawisk fizycznych w ciałach stałych do tych zastosowań technicznych, które od lat czterdziestych były prawie wyłącznie domeną elektroniki próżniowej. Jako datę powstania elektroniki ciała stałego można uważać wykrycie w 1946 roku zjawiska tranzystorowego, jako datę zaś dość wyraźnego skryształizowania się charakteru i zakresu stosowania tej techniki można przyjąć rok 1956, w którym trzej czołowi badacze zjawisk w ciałach stałych, Shockley, Bardeen i Brattain, otrzymali Nagrodę Nobla.

W ciągu minionych dziesięciu lat:

- a) zastąpiono tranzytory ostrzowe o niestabilnej i nietrwałej konstrukcji wyłącznie tranzystorami warstwowymi;
- b) opracowano tranzystory, wśród których istnieją typy o mocy użytecznej do kilkudziesięciu watów, częstotliwości granicznej do kilkuset megaherców, maksymalnej temperaturze pracy do 150 °C i współczynniku szumów współmiernym z szumami lamp elektronowych;
- c) opracowano diody półprzewodnikowe, wśród których istnieją typy o mocy wyprostowanej do 20 kW, częstotliwości granicznej do 3000

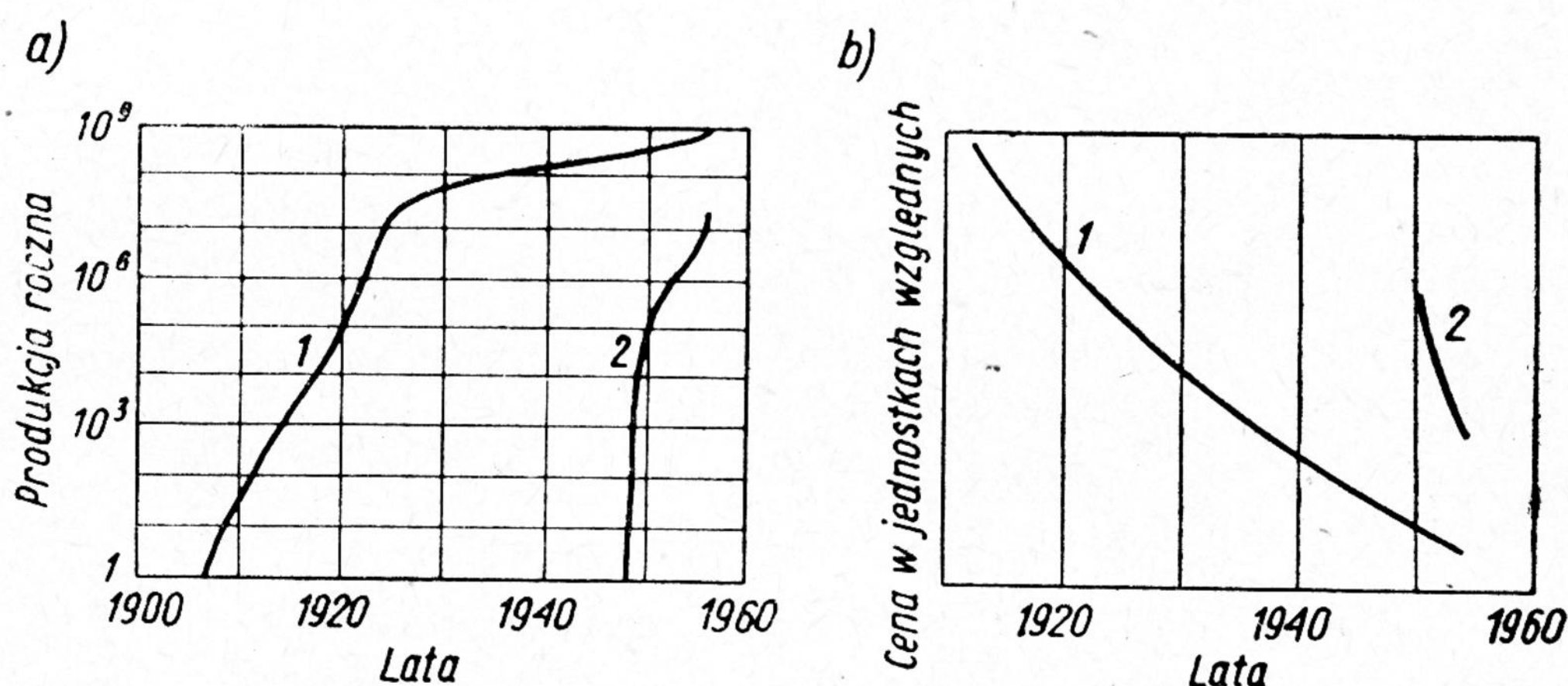
¹⁾ Patrz następne numery „Elektroniki”.

MHz, maksymalnej temperaturze pracy 200°C oraz czasie przełączania $0,1\ \mu\text{s}$;

d) opracowano szereg innych przyrządów półprzewodnikowych o oddziaływaniu cieplnym, fotoelektrycznym i magnetycznym;

e) zwrócono uwagę na możliwości wykorzystania takich zjawisk elektronowych w ciałach stałych, jak absorpcja promieniowania przez swobodne nośniki elektryczności, oddziaływanie pola elektrycznego na przewodność powierzchniową, zjawisko cyklotronowe, zjawisko magnetooporowe lub wreszcie połączenie zjawisk przewodności fotoelektrycznej i elektroluminescencji.

Produkcja tranzystorów osiągnęła w 1955 roku parę milionów sztuk, co odpowiada produkcji rocznej lamp elektronowych w 1920 roku, przy większej jednak szybkości wzrostu krzywej produkcji nie mówiąc już o znacznie większej szybkości wzrostu w stosunku do odpowiedniej wielkości dla lamp w 1956 roku (rys. 1).



Rys. 1. Wzrost produkcji rocznej lamp elektronowych (krzywa 1) i tranzystorów (krzywa 2)

Należy zauważyć, że zjawiska jednokierunkowego przewodzenia prądu w ciałach stałych były znane i wykorzystywane w technice znacznie wcześniej, przed odkryciem zjawiska tranzystorowego. W latach dwudziestych stosowano detektory krystaliczne do detekcji fal radiowych, w latach 1920 do 1927 rozpoczęto masową produkcję prostowników miedziowych, a w latach 1940 do 1942 podjęto produkcję prostowników selenowych. Dopiero jednak stwierdzenie, że w ciałach stałych można uzyskać wzmocnienie mocy podobnie jak w lampach próżniowych wieloelektrodowych, stanowiło wyraźny skok na drodze postępu w tej dziedzinie.

To nieoczekiwane odkrycie skłoniło do rozszerzenia badań podstawowych w zakresie fizyki doświadczalnej ciała stałego oraz do zintensy-

fikowania usiłowań teoretycznego wyjaśnienia obserwowanych zjawisk. Koncepcja bariery potencjału w obszarach granicznych ciała stałego powstała już w związku z teorią prostowania, ale dopiero zaobserwowanie zjawiska tranzystorowego umożliwiło powstanie drugiej, niezmienne ważnej koncepcji — nośników elektryczności dwojakiego rodzaju, przy czym nośniki mniejszościowe podlegają dyfuzji cieplnej i unoszeniu w polu elektrycznym z prędkością odpowiadającą ich ruchliwości. Analiza wpływu barier potencjału w półprzewodnikach na ruch swobodnych nośników elektryczności przy uwzględnieniu oddziaływania pól zewnętrznych lub pochłanianych kwantów energii stworzyła podstawę do objęcia wspólną teorią znacznego zakresu zjawisk elektronowych w ciałach stałych. Szczególne znaczenie dla rozwoju wymienionych wyżej koncepcji należy przypisać doświadczeniu Haynesa-Shockleya umożliwiającemu bezpośrednie obserwowanie wprowadzania i wykonywania pomiaru ruchliwości nośników mniejszościowych we włókach półprzewodnikowych.

Niewątpliwie systematyczne prace badawcze nad półprzewodnikami zostały umożliwione dzięki postępom technologii próżniowej w ogóle, a metod technologicznych rozwiniętych w związku z opracowaniem diod krzemowych do celów techniki radarowej — w szczególności. Za podobnie kluczowe doświadczenie technologiczne, jak doświadczenie Haynesa-Shockleya w zakresie pomiarów właściwości materiału półprzewodnikowego, należy uważać zastosowanie metody wytopu strefowego do oczyszczania półprzewodników. Metoda ta pozwala uzyskać stosunek koncentracji atomów ciała macierzystego i koncentracji atomów domieszek rzędu 10^{10} . Shockley porównuje ją z odpompowaniem lampy. Uzyskiwalna koncentracja domieszek rzędu 10^{12} atomów na 1 cm^3 odpowiada koncentracji cząsteczek gazu w lampie występujących przy ciśnieniu 10^{-4} Tr .

Oczywiście, postępy w zakresie technologii próżniowej uzyskane w związku z rozwojem technologii lamp elektronowych wywarły również bardzo poważny wpływ na rozwój technologii półprzewodników.

W związku z powyższymi uwagami można wyróżnić trzy zasadnicze czynniki postępu w zakresie elektroniki ciała stałego:

- a) rozwój metod badania zjawisk elektronowych w ciałach stałych,
- b) rozwój technologii — przede wszystkim techniki próżni i metalurgii próżniowej metali,
- c) rozwój teorii ciała stałego.

Nie wydaje się rzeczą słuszną wyróżniać tu czynniki bardziej lub mniej decydujące. Niewątpliwie w postępie technicznym istnieje system wzajemnych oddziaływań, a niewątpliwą przyczyną wzrostu tych oddziaływań staje się perspektywa uzyskania korzyści technicznych bądź ekonomicznych z nowych zastosowań.

2. KLASYFIKACJA ZAGADNIEŃ ELEKTRONIKI PÓŁPRZEWODNIKÓW

Elektronikę półprzewodników można określić jako gałąź techniki obejmującą przyrządy, w których wykorzystuje się oddziaływanie energii zewnętrznej na swobodne nośniki elektryczności w ciałach stałych. Jak wynika z podanej definicji, w elektronice półprzewodników wykorzystuje się zjawiska związane z ruchem swobodnych nośników w ciele stałym, podobnie jak w elektronice próżniowej wykorzystuje się analogiczne w zasadzie przebiegi w próżni i w gazach rozrzedzonych. Obszary zastosowań obu dziedzin elektroniki w znacznej mierze pokrywają się, w związku z czym nie można rozpatrywać elektroniki półprzewodników w oderwaniu od elektroniki próżniowej, jeśli idzie o eksploatacyjną stronę zagadnienia, natomiast należy rozważać ją odrębnie w zakresie zagadnień technologiczno-konstrukcyjnych.

W zależności od rodzaju zewnętrznej energii oddziałującej na ciało stałe można wykonać następującą próbę klasyfikacji przyrządów półprzewodnikowych:

- 1) elementy o oddziaływaniu elektrycznym:
 - a) tranzystory i fildystory,
 - b) diody półprzewodnikowe,
 - c) warystory;
- 2) elementy o oddziaływaniu cieplnym:
 - a) termistory (termooporniki),
 - b) termogeneratory (termoelementy);
- 3) elementy o oddziaływaniu fotonowym:
 - a) fotooporniki (fotoprzewodniki),
 - b) fotogeneratory (fotoogniwa);
- 4) elementy o oddziaływaniu magnetycznym:
 - a) magnetooporniki (elementy wykorzystujące zjawiska galwanomagnetyczne),
 - b) detektory pola i inne elementy wykorzystujące zjawisko Halla;
- 5) elektroluminofony i przetworniki obrazowe.

Zarówno z punktu widzenia rozwoju odpowiednich zagadnień w technice światowej, jak i potrzeb techniki krajowej i związanego z tym stanu zaawansowania prac nad poszczególnymi zagadnieniami wynika, że specjalną uwagę w tym artykule należy poświęcić półprzewodnikowym elementom wzmacniającym, tj. tranzystorom, i półprzewodnikowym elementom elementom prostującym, tj. diodom krystalicznym.

3. DIODY PÓŁPRZEWODNIKOWE

Zasadniczy podział diod półprzewodnikowych wydaje się najsluszniejszy, a mianowicie podział na diody ostrzowe i diody warstwowe. Diody ostrzowe są stosowane we wszelkiego rodzaju członach układów elektronicznych, gdzie chodzi o uzyskanie przewodzenia jednokierunkowego. Główne dane charakteryzujące diody są następujące: przebiegi oporności w obu kierunkach, wartości pojemności i częstotliwości granicznej, szumy oraz — w przypadku pracy impulsowej — dane o zniekształceniu impulsu przy zmianie kierunku napięcia. Podobnym wymaganiom muszą odpowiadać zazwyczaj diody warstwowe małej mocy, natomiast diody warstwowe średniej i dużej mocy jako typowe elementy techniki zasilającej powinny spełniać wymagania dotyczące odpowiednich wartości mocy prostowniczej, spadku napięcia na elemencie i sprawności, a także wymagania związane z możliwością łączenia ich w zespoły. Zagadnienie maksymalnej temperatury pracy jest ważne zarówno w przypadku diod ostrzowych, jak i diod warstwowych.

3.1. Diody ostrzowe

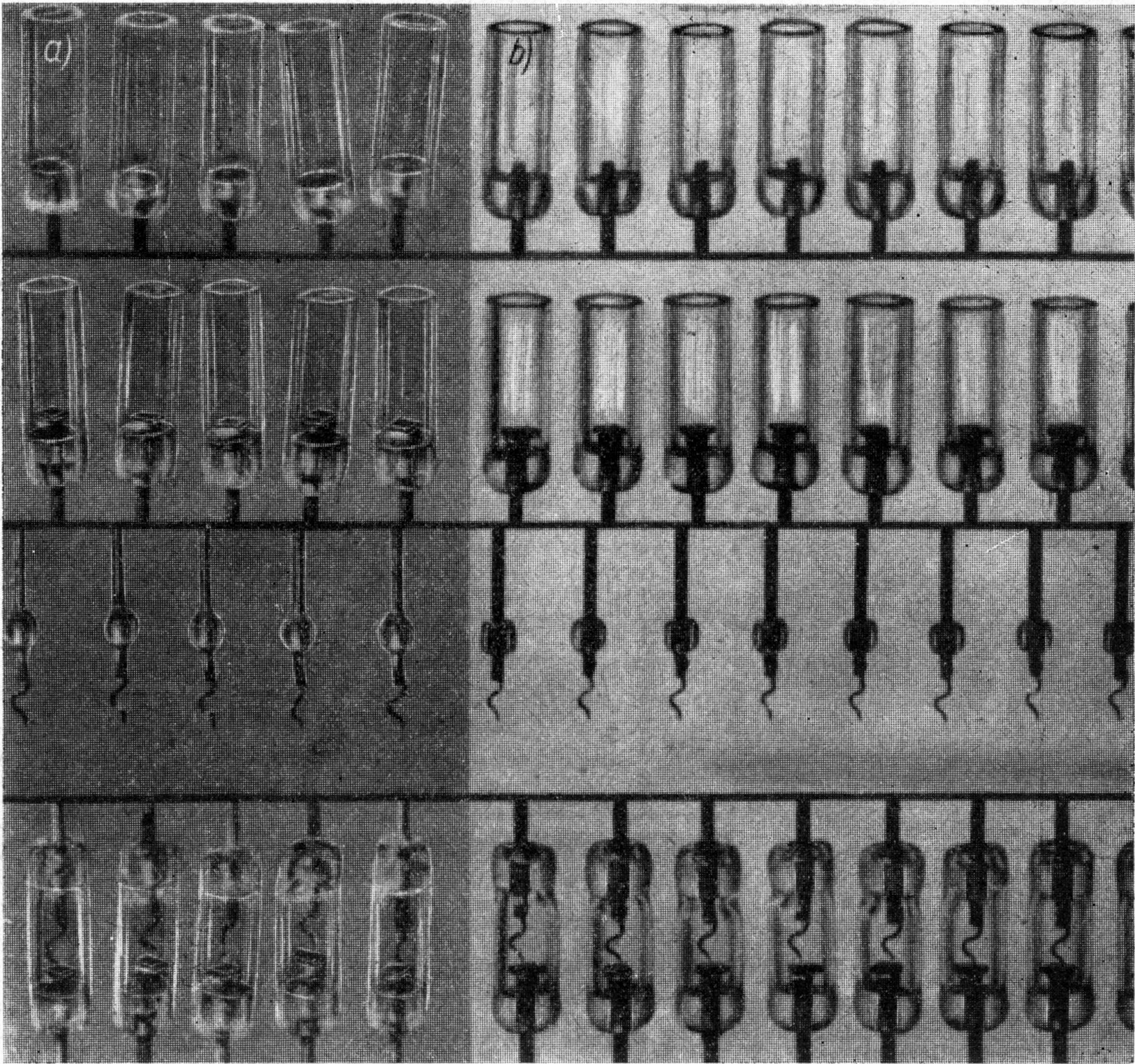
Asymetrię charakterystyki w diodach ostrzowych osiąga się przez zastosowanie styku płytki półprzewodnikowej — najczęściej germanowej lub krzemowej — z ostrzem metalowym. Znane są również doświadczalne diody, w których materiałami półprzewodnikowymi są związki międzymetaliczne typu $A_{III}B_V$.

Pod względem konstrukcji wyróżnia się diody w obudowie ceramicznej lub plastikowej, w obudowie opartej na przejściach próżnioszczelnych szkło-kowar oraz w obudowie całoszklanej. Jeśli diody są używane w zakresie częstotliwości, w którym stosowana jest technika zwykłych przewodów, stosuje się konstrukcje o dwu wyprowadzeniach w postaci drutów do wlutowania, w przypadku zaś stosowania techniki mikrofalowej używa się diod o konstrukcji nadającej się do bezpośredniego umieszczenia w linii koncentrycznej lub falowodzie.

Długość przeciętnej diody ostrzowej wynosi zazwyczaj kilkanaście milimetrów, średnica 5÷7 mm, a długość wraz z końcówkami jest rzędu 80 mm. Konstrukcja całoszklana pozwala wykonać najdalej idącą miniaturyzację, jest w pełni szczelna, a więc zapewnia najlepszą trwałość i stabilność diody oraz nadaje się najlepiej do automatyzacji produkcji (rys. 2).

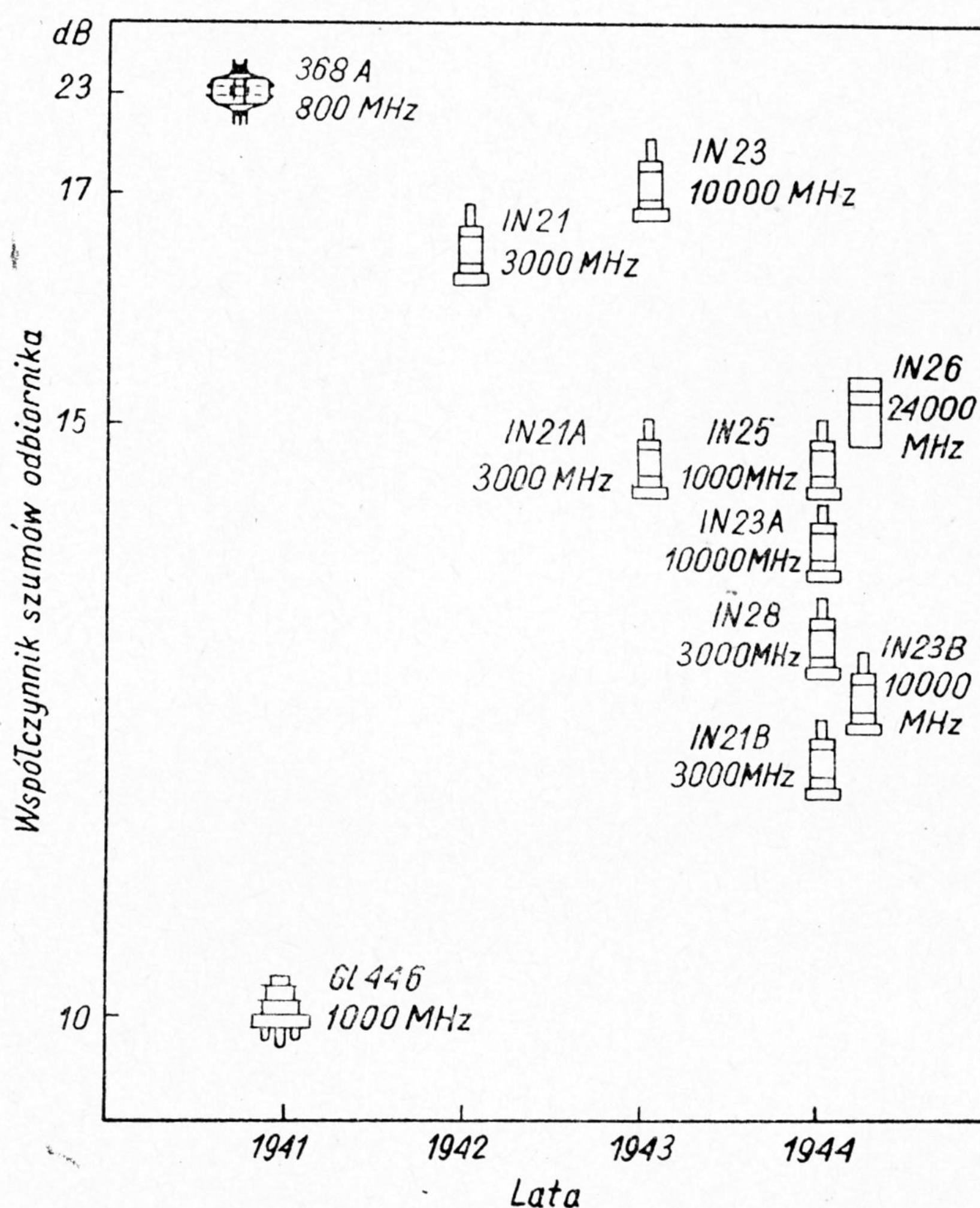
Można wyróżnić cztery zasadnicze rodzaje diod ostrzowych: diody do celów ogólnych, diody o dużym napięciu wstecznym, diody o dużej oporności i diody detekcyjne o małej oporności. Przeciętne dane charakterystyczne poszczególnych rodzajów diod podane są poniżej.

Wielkość	Jednostki	Rodzaj diody			
		do celów ogólnych	o dużym napięciu wstecznym	o dużej oporności	mieszająca
Napięcie wsteczne	V	50 ÷ 100	100 ÷ 200	ok. 100	< 20
Prąd przewodzenia	mA	> 5	4	2	20
Prąd wsteczny (10 V)	μA	20	10	5	100
Częstotliwość graniczna	MHz	50	50	50	1000



Rys. 2. Poprawa budowy diod całoszklanych uzyskana przy zastosowaniu automatyzacji produkcji: a) produkcja ręczna; b) produkcja maszynowa

W diodach do celów ogólnych żadna z wymienionych właściwości nie jest specjalnie wyróżniona. Diody drugiego rodzaju odznaczają się dużym napięciem wstecznym ($100 \div 200$ V) przy stosunkowo znacznej jednak oporności przewodzenia ($500 \div 250 \Omega$ przy napięciu 1 V). W diodach o dużej oporności wstecznej prąd przewodzenia jest również niewielki. Wreszcie diody detekcyjne odznaczają się dużą częstotliwością graniczną przy szczególnie małej oporności w kierunku przewodzenia ($30 \div 50 \Omega$ przy napięciu 1 V) i przy niewielkim napięciu wstecznym.



Rys. 3. Współczynniki szumów odbiorników mikrofalowych przy zastosowaniu diod krzemowych różnych typów oraz porównanie ich ze współczynnikami szumów, jakie uzyskuje się przy zastosowaniu lamp

Napięcie wsteczne w typowych germanowych diodach ostrzowych rzadko przekracza 100 V, a oporność przewodzenia przy napięciu 1 V zawiera się najczęściej w granicach $400 \div 100 \Omega$. Pojemność diod ostrzowych wynosi $0,5 \div 1$ pF. Maksymalna temperatura pracy wynosi przeciętnie 70°C , przy czym prąd wsteczny przy tej temperaturze wzrasta $2 \div 4$ -krotnie, a prąd przewodzenia wzrasta o $10 \div 20\%$. Wrażliwość tem-

peraturowa diod półprzewodnikowych jest jedną z ważniejszych ich cech ujemnych.

Do częstotliwości 100 MHz stosuje się zwykle diody ostrzowe germanowe o typowej technologii, z którą związane jest formowanie elektrycznego styku; powyżej tej częstotliwości stosuje się jeszcze niekiedy diody germanowe o specjalnej technologii, typowymi jednak diodami mikrofalowymi są diody ostrzowe krzemowe.

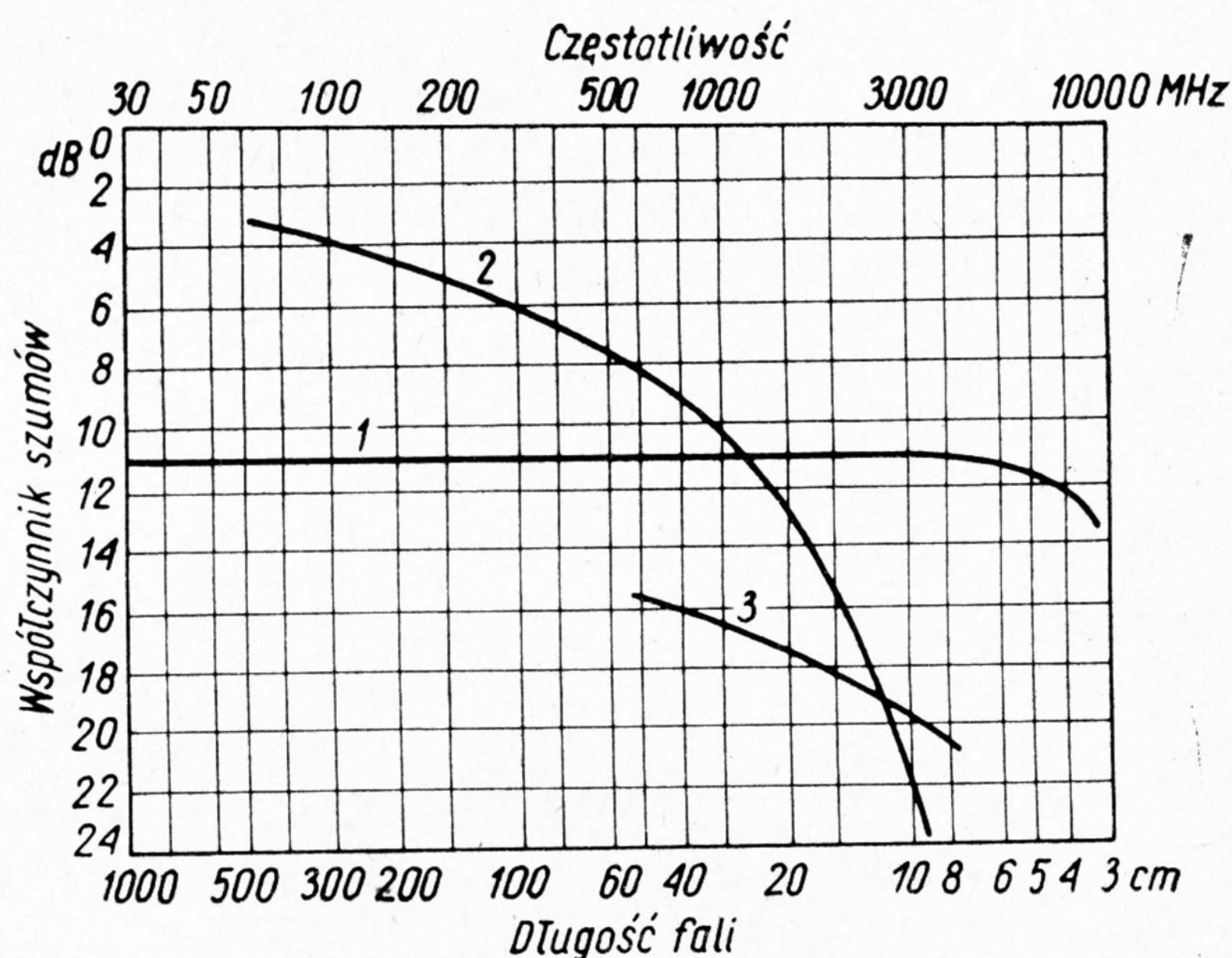
Opracowanie tych diod do celów przemiany częstotliwości w urządzeniach radarowych podczas ubiegłej wojny zapoczątkowało — jak wiadomo — burzliwy rozwój techniki półprzewodników.

Diody te są wykonywane na krzemie grubokryształicznym o niewielkiej czystości (oporność wynosi ok. $1 \Omega\text{cm}$), zanieczyszczonym borem lub glinem. Stosowane są w zakresie częstotliwości od 1000 do 30000 MHz. Charakteryzują je następujące wielkości: straty przemiany, stosunek temperatur szumów i energia admisyjna. Najlepsze z tego typu diod mają straty przemiany 5,0 dB, stosunek temperatury szumów ok. 1,5 oraz energię admisyjną do 5 ergów.

Współczynnik szumów odbiornika mikrofalowego przy założeniu, że współczynnik szumów wzmocnienia pośredniej częstotliwości wynosi 5 dB, może dochodzić w przypadku diody 1N21B przy częstotliwości 3000 MHz do ok. 12 dB, w przypadku diody 1N23B przy częstotliwości 10000 MHz do ok. 13 dB, a w przypadku diody 1N26 przy częstotliwości 24000 MHz do ok. 15 dB (rys. 3).

Na rys. 4 zestawiono charakterystyki częstotliwościowe współczynników szumów uzyskiwane przy zastosowaniu mieszacza krystalicznego oraz mieszaczy z lampami elektronowymi.

Diody krzemowe stosowane do celów detekcji mikrofalowej charakteryzuje tzw. współczynnik dobroci diody, który jest funkcją czułości prądowej diody oraz jej oporności dynamicznej. Wartość tego współczynnika nie przekracza zazwyczaj 100.



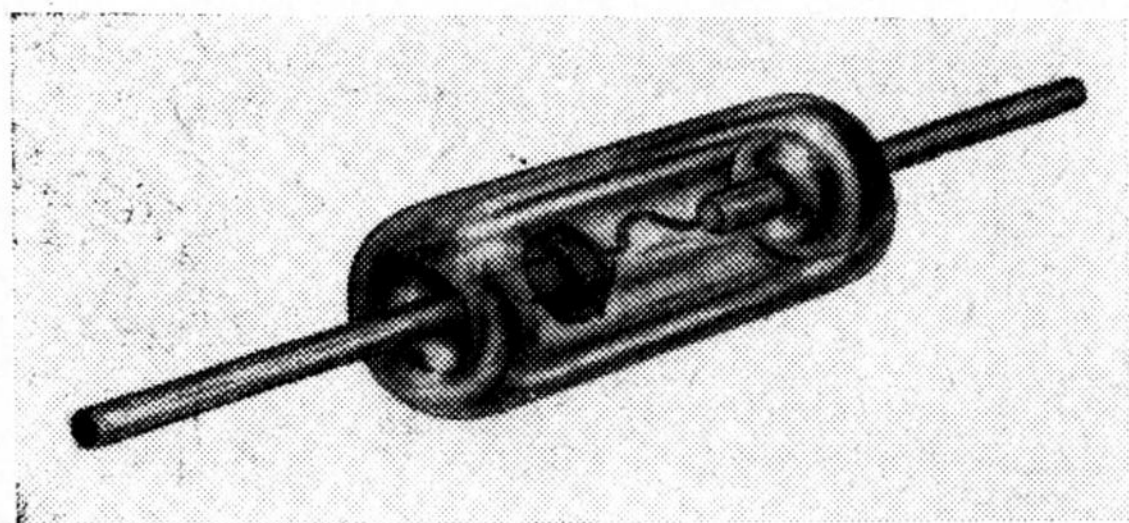
Rys. 4. Zależność współczynnika szumów odbiornika od częstotliwości
1 — odbiornik z mieszaczem krystalicznym; 2 — wzmacniacz z lampą GL2C40; 3 — mieszacz z lampą GL2C40

W zakresie diod ostrzowych zarówno krzemowych, jak i germanowych nie należy oczekiwać zasadniczego postępu, jeśli idzie o uzyskiwane właściwości, są one bowiem związane przede wszystkim z właściwościami stosowanych materiałów, a te — jak się wydaje — są w chwili obecnej w pełni wyzyskane. Postęp daje się natomiast zauważyć w dziedzinie miniaturyzacji elementów i automatyzacji ich produkcji. Zastosowanie monokryształów oraz ujednolicenie technologii, szczególnie w dziedzinie materiałów pomocniczych, zmierza ku zmniejszeniu rozrzutu właściwości oraz zwiększeniu stabilności działania diod. Trwałość w przypadku diod ostrzowych jest — jak się wydaje — w pełni zadowalająca, wyczerpujących jednak danych liczbowych w tej sprawie w chwili obecnej jeszcze brak.

Jeśli idzie o poprawienie właściwości elektrycznych, to następny etap rozwoju diod ostrzowych stanowią tzw. diody o styku złotym.

3.2. Diody o styku złotym

W diodach o styku złotym prostowanie prądu uzyskuje się przez przystopienie specjalnie zanieczyszczonego drutu złotego do powierzchni germanu. Odpowiedni proces cieplny może być połączony z procesem zata-
piania podzespołów w obudowie całoszklanej (rys. 5). W stosunku do



Rys. 5. Dioda o styku złotym

przeciętnych diod ostrzowych diody o styku złotym mają około 5-krotnie większą oporność wsteczną oraz ponad 30-krotnie mniejszą oporność przewodzenia. Oporność przewodzenia diody OA180 produkcji firmy Telefunken wynosi $2 \div 3 \Omega$ przy prądzie 100 mA, a diody amerykańskiej 1N455 produkcji firmy Sylvania wynosi 3Ω przy na-

pięciu 1 V. Pojemność diod o styku złotym jest nieco większa niż zwykłych diod ostrzowych i wynosi ok. 4 pF, co ogranicza ich częstotliwość graniczną do 30 MHz. Napięcie wsteczne diody OA180 wynosi 20 V, a diod amerykańskich DR385 produkcji firmy RRC i diod CTP-301 produkcji firmy Clevite — 50 V, przy czym oporność diody CTP-301 przy maksymalnym napięciu wstecznym wynosi 2 M Ω .

Podczas gdy średni prąd wyprostowany zwykłych diod ostrzowych nie przekracza 50 mA, odpowiedni prąd diody OA180 wynosi 12 mA; wartość szczytowa wynosi 400 mA, a przeciążalność jednosekundowa — 1 A. Dopuszczalne straty mocy w diodzie OA180 wynoszą 100 mW, a w diodzie DR385 — 80 mW. Temperaturowy współczynnik redukcji mocy w przypadku diody pierwszej wynosi 0,3 °C/mW powyżej temperatu-

ry 45 °C, a w przypadku drugiej — 1 °C/mW powyżej temperatury 25 °C.

W diodach półprzewodnikowych występuje szkodliwe zjawisko związane z gromadzeniem się nośników mniejszościowych w obszarze styku lub złącza. Po zmianie kierunku napięcia na odpowiadający działaniu zaporowemu diody płynie jeszcze przez pewien czas znaczny prąd, zanim nagromadzone nośniki nie zostaną usunięte z sąsiedztwa bariery potencjału. Czas po zmianie kierunku napięcia, po którym prąd diody osiąga wartość odpowiadającą ustalonym warunkom pracy w kierunku wstecznym, nazywa się czasem przełączenia (*recovery time*). Może on być zmniejszony w diodach o styku złotym do zaledwie 0,3 μs, co predestynuje te diody do zastosowań w układach impulsowych, a szczególnie w układach liczących.

Diody o styku złotym nie wykazują szumów związanych ze stykiem oraz przewyższają zwykłe diody pod względem rozrzutu charakterystyk. W przypadku diody DR385 gwarantuje się, że spadek napięcia przy prądzie 10 mA zawiera się w granicach od 0,34 do 0,37 V.

Biorąc pod uwagę wymienione cechy oraz stosunkowo prostą technologię produkcji należy przypuszczać, że diody o styku złotym wyprą w znacznej mierze zwykłe diody ostrzowe z wyjątkiem tych zastosowań, w których wymagane są wysokie napięcia wsteczne bądź częstotliwości graniczne przekraczające 30 MHz. Należy zwrócić uwagę, że diody o styku złotym są wrażliwe na światło.

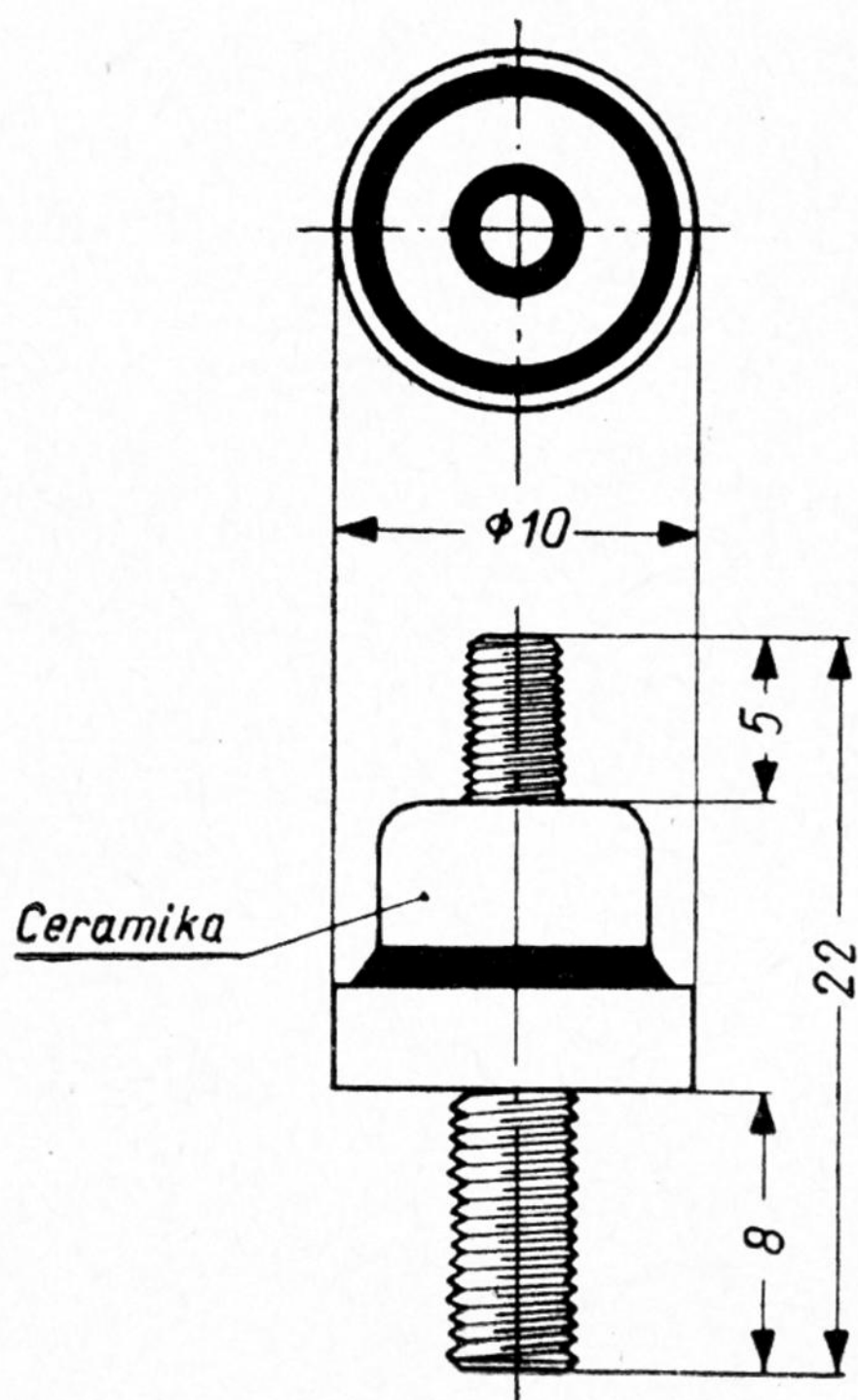
3. 3. Diody warstwowe

Dioda warstwowa jest elementem, w którym jednokierunkowe przewodzenie prądu uzyskuje się dzięki wytworzeniu przejścia *p-n* w płycie półprzewodnikowej. Warstwę tę wytwarza się najczęściej w drodze procesu stopowego, polegającego bądź na stopieniu pierwiastka akceptorowego na powierzchni półprzewodnika typu *n*, bądź na stopieniu pierwiastka donorowego na powierzchni półprzewodnika typu *p*. W wyniku procesu cieplnego o określonym przebiegu temperatury w funkcji czasu tworzy się na powierzchni półprzewodnika macierzystego stop z pierwiastkiem domieszkowym, po czym w wyniku chłodzenia rekrytalizuje się zeń półprzewodnik o odmiennym typie przewodzenia niż półprzewodnik macierzysty. Na granicy między półprzewodnikami obu typów powstaje przejście *p-n*.

Obok procesu stopowego stosuje się również proces dyfuzyjny wytwarzania przejścia *p-n*, szczególnie w przypadku krzemu, a także proces polegający na zmianie szybkości wyciągania. Proces technologiczny diody warstwowej obejmuje ponadto wykonanie małooporowej bazy oraz wykonanie doprowadzeń. Podzespół płytki półprzewodnikowej z dopro-

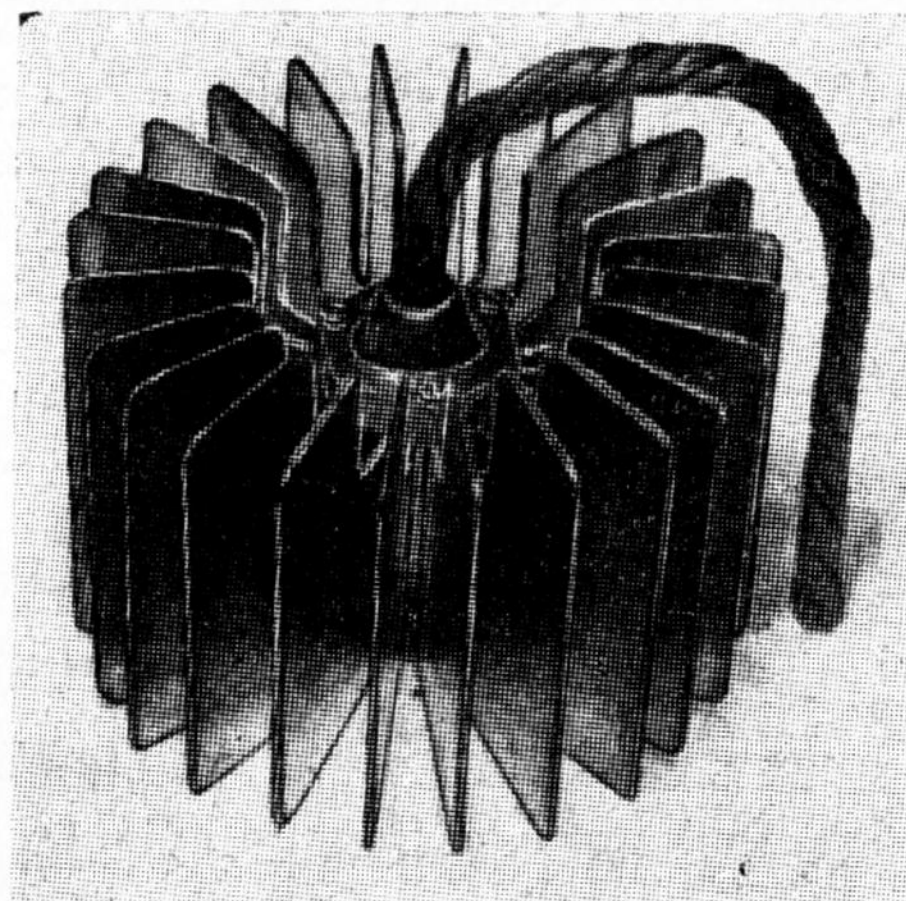
wadzeniami umieszcza się w szczelnej obudowie metalowej, której kształt i rozmiary powinny odpowiadać warunkom chłodzenia. Zagadnienie chłodzenia złącza w przypadku diod warstwowych, gdzie gęstości prądu mogą osiągnąć wartości kilkuset amperów na 1 cm^2 , jest zagadnieniem pierwszorzędnej wagi.

Diody warstwowe można podzielić na trzy grupy różniące się powierzchnią złącza i budową. Do pierwszej grupy należą diody małej mocy o prądzie wyprostowanym mniejszym niż $0,5 \text{ A}$, o zastosowaniach we wszelkich układach elektronicznych podobnych do zastosowań diod ostrzowych przy uwzględnieniu, że ma się tu do czynienia na ogół z większy-



Rys. 6. Dioda germanowa średniej mocy

Rys. 7. Dioda germanowa dużej mocy (opracowana w Zakładzie Elektroniki IPPT PAN)



mi prądami i wyższymi napięciami, lecz jednocześnie z większą pojemnością. Diody małej mocy są zaopatrzone zwykle w końcówki w postaci drutów do wlutowania. Druga i trzecia grupa to diody o zastosowaniach w układach zasilających. Do diod średniej mocy należy zaliczyć diody o prądzie wyprostowanym nie przekraczającym 10 A . Są one zaopatrzone zwykle w płaski radiator o powierzchni kilku lub kilkunastu centymetrów kwadratowych bądź też są wykonane w postaci śruby przykręconej do podstawy układu lub innej powierzchni metalowej mogącej odegrać rolę czynnika chłodzącego (rys. 6). Diody dużej mocy mają zwykle konstrukcję zaopatrzoną w radiator wielopowierzchniowy umożliwiający zastosowanie sztucznego chłodzenia powietrznego, częściej jednak są one chłodzone wodą. Przykładem niewielkiej diody o sztucznym chłodzeniu powietrznym jest dioda o prądzie wyprostowanym 20 A opracowana w Zakładzie Elektroniki IPPT (rys. 7).

Ze względu na szereg odmiennych właściwości oraz różny stan zaawansowania technicznego diody warstwowe germanowe i krzemowe będą rozpatrzone kolejno.

3.3.1. Diody germanowe małej i średniej mocy

Typowym przykładem diody germanowej małej mocy jest dioda IN93 produkcji firmy General Electric Co. Jest to dioda o napięciu wstecznym 300 V, prądzie wyprostowanym 75 mA i spadku napięcia przy pełnym obciążeniu 0,5 V. Analogiczna dioda jest zaopatrzona w radiator chłodzący o powierzchni kilku centymetrów kwadratowych (oznaczona jako IN153) może prostować prąd 0,5 mA przy spadku napięcia 0,7 V. Wydaje się, że w przypadku germanowych diod warstwowych trudno spodziewać się przekroczenia napięcia wstecznego 400 V. Minimalny spadek napięcia 0,5 V jest również zdeterminowany przez szerokość pasma zabronionego germanu. Natomiast pewien postęp został ostatnio osiągnięty, jeśli idzie o maksymalną temperaturę pracy diod germanowych, która w normalnych przypadkach nie przekracza 55 °C.

Firma General Electric Co. wyprodukowała diodę IN315 o prądzie wyprostowanym 100 mA i takiej samej budowie zewnętrznej jak dioda IN93, mogąca pracować do temperatury 85 °C. Należy jednak zwrócić uwagę, że napięcie wsteczne tej diody w temperaturze 55 °C wynosi 300 V, a w temperaturze 85 °C tylko 100 V. Z diod typu IN93 produkowane są zespoły z radiatorami stanowiące niewielkie prostowniki, których elementy mogą być łączone w różny sposób. I tak zespół 4JA211 dwunastu diod połączonych w układzie jednofazowym mostkowym stanowi prostownik o prądzie 3 A i napięciu 185 V.

Typową diodą germanową średniej mocy jest dioda EW54 produkcji firmy General Electric Co. Jest ona wykonana w postaci śruby wkręcanej do podstawy układu. Wymiary diody są następujące: długość 35 mm, średnica 15 mm; oporność jej przy napięciu 0,5 V wynosi $1/16 \Omega$, a przy napięciu wstecznym 100 V — $16 \text{ k}\Omega$. Wartości te są podane dla temperatury 20 °C. Prąd wyprostowany diody wynosi kilka amperów. Szczegółowe dane zależą od warunków chłodzenia. Diody tego typu mogą być łączone w zespoły. Na przykład zespół 4JA3011 złożony z ośmiu diod połączonych w jednopółówkowym układzie mostkowym prostuje prąd 24 A przy napięciu 125 V.

3.3.2. Diody germanowe dużej mocy

Zagadnienie rozwoju diod germanowych dużej mocy jest ściśle związane z potrzebami w zakresie odpowiednich urządzeń prostowniczych. Już w 1954 roku skonstruowano w Ameryce diodę doświadczalną chłó-

dzoną wodą o średnim prądzie wyprostowanym 200 A i napięciu wstecznym 110 V. Dopuszczalna wartość szczytowa prądu wynosiła 600 A, a spadek napięcia przy pełnym obciążeniu — 0,8 V. Złącze było wykonane na płytce germanowej o średnicy 22 mm i grubości 0,4. Cała dioda mieści się w dłoni. Jednak w pierwszych germanowych prostownikach dużej mocy, które skonstruowano w 1955 roku w Anglii i w Ameryce nie zastosowano tak dużych diod. Na podstawie dość niekompletnych danych, jakimi rozporządzamy w danej chwili, można przypuszczać, że moc pojedynczych elementów stosowanych w germanowych urządzeniach prostowniczych dużej mocy nie przekracza 5 kW. Na przykład w pierwszym skonstruowanym w Europie prostowniku germanowym o mocy 300 kW zastosowano diody 50-amperowe.

W celu bardziej szczegółowego zorientowania się o możliwościach zastosowania diod germanowych do prostowników, należy porównać prostowniki germanowe z innymi urządzeniami prostowniczymi stosowanymi już od szeregu lat.

3.3.3. Porównanie urządzeń prostowniczych

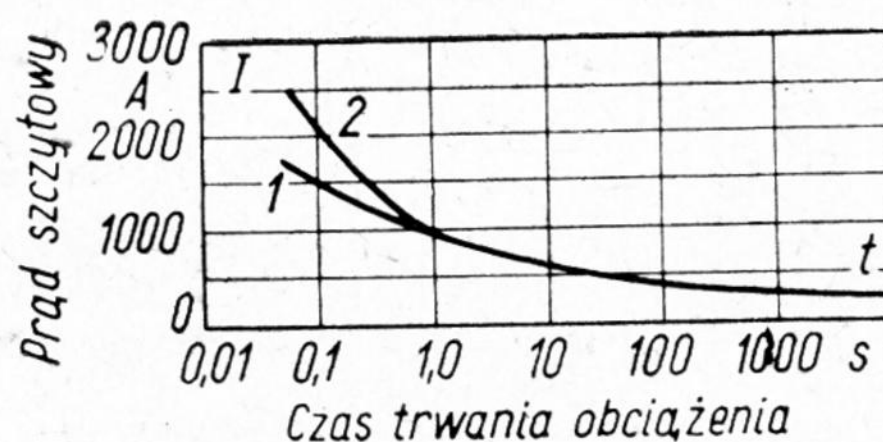
W chwili obecnej trudno jest wykonać takie porównanie w sposób kompletny. O wyborze do produkcji takiego czy innego typu prostownika decydują czynniki ekonomiczne. Składają się na nie przede wszystkim koszty inwestycyjne i koszty eksploatacji. Pierwsze z nich nie są łatwe do uchwycenia, jeżeli wziąć pod uwagę, że wykonane dziś prostowniki germanowe są właściwie modelami doświadczalnymi, a okres ich amortyzacji nie jest też chyba w pełni znany. Natomiast koszty eksploatacji prostownika wielkiej mocy są ściśle związane z jego sprawnością i dają się łatwo obliczyć przy założeniu liczby godzin rocznej pracy prostownika. Można sądzić, że to właśnie zagadnienie zadecydowało o stopniowym wprowadzeniu do eksploatacji prostowników germanowych. Obliczono na przykład, że doświadczalny prostownik germanowy o mocy 300 kW zastosowany w Anglii do elektrolitycznego otrzymywania wodoru pozwolił uzyskać roczną oszczędność energii wyrażającą się kwotą 700 funtów angielskich dzięki zwiększeniu sprawności o 6% w stosunku do dawniej tam pracującego prostownika rtęciowego. Należy dodać, że wymieniony prostownik germanowy zajmował tylko 1/6 przestrzeni zajmowanej przez prostownik rtęciowy. Był to pierwszy na świecie prostownik germanowy tej mocy. Do czasu ukazania się publikacji B.T.H. przepracował on 11000 godzin.

Drugi prostownik germanowy o mocy 300 kW wykonany przez tę samą firmę zajmował tylko 1/2 tej objętości co pierwszy. W celu bardziej szczegółowego porównania prostowników różnego rodzaju należy roz-

ważyć następujące czynniki: dopuszczalną gęstość prądu, spadek napięcia na elemencie oraz krzywe sprawności.

Dopuszczalna gęstość prądu w przypadku germanu może przekraczać 100 A/cm^2 , podczas gdy w przypadku tlenku miedziawego wynosi $0,1 \text{ A/cm}^2$, a w przypadku selenu — $0,025\div 0,05 \text{ A/cm}^2$. Wszystkie te wartości odnoszą się do napięcia $0,6 \text{ V}$. Jeżeli zastosować naturalne chłodzenie powietrzne i przyjąć, że element germanowy pracuje przy takiej samej gęstości prądu jak selenowy, to straty przewodzenia wynoszą $1\div 10\%$ strat w przypadku selenu, a więc w tym samym stosunku zmniejsza się powierzchnia chłodzenia (średnio 40-krotnie). Oczywiście, w przypadku naturalnego chłodzenia powietrznego ta właśnie powierzchnia decyduje o rozmiarach prostownika. W praktyce stosuje się mniejszą liczbę elementów zyskując zarówno na rozmiarach, jak i na sprawności. W przypadku chłodzenia wodnego rozmiary prostownika są określone przez sam element i wypadają około 100 razy mniejsze niż w przypadku selenu. Małe rozmiary prostowników germanowych pociągają za sobą ich małą pojemność cieplną. Toteż znaczną ich wadą jest mała odporność na przeciążenia (rys. 8).

Rys. 8. Odporność prostowników germanowych na przeciążenie
1 — normalne warunki odprowadzania ciepła; 2 — specjalne warunki odprowadzania ciepła



W przypadku prostowników o napięciu wyprostowanym nie przekraczającym 30 V , co ma miejsce najczęściej przy wszelkiego rodzaju zastosowaniach do zasilania urządzeń elektrochemicznych, szeregowe łączenie elementów jest niepotrzebne. W tym przypadku prostowniki germanowe są bardziej sprawne i mniejsze niż wszelkie inne. Przy równoległym jednak łączeniu elementów germanowych muszą być one dobierane pod względem oporności przewodzenia, a przy eksploatacji — starannie zabezpieczone od nierównomiernego rozplywu prądów.

W przypadku prostowników o wyższym napięciu zachodzi konieczność szeregowego łączenia elementów, a co za tym idzie — wzięcia pod uwagę wartości spadku napięcia przypadającego na element. Dogodnie jest wykreślić krzywe zależności spadku napięcia od napięcia wyprostowanego przy założeniu napięcia wstecznego poszczególnego elementu (rys. 9).

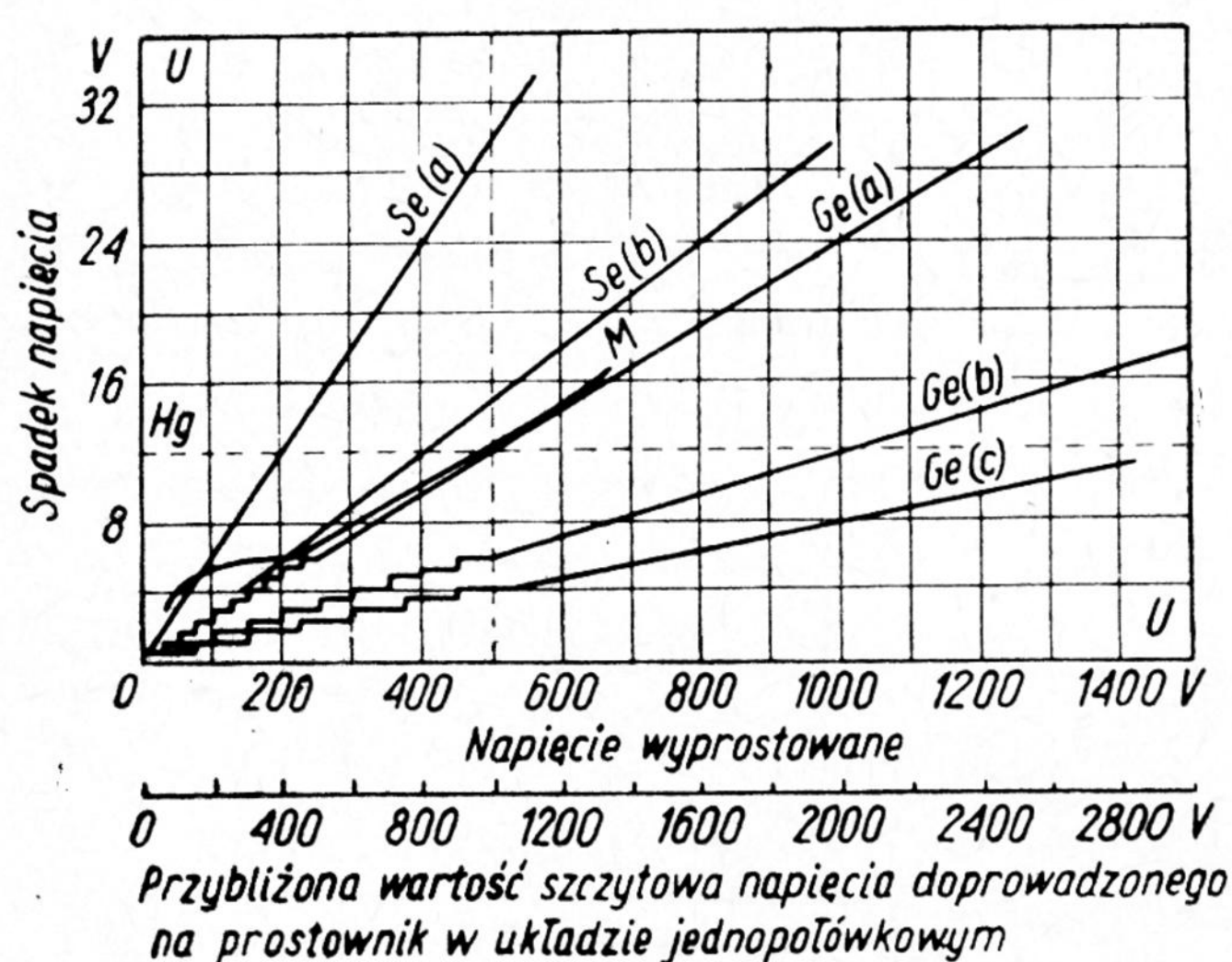
W przypadku prostownika selenowego złożonego z elementów o napięciu wstecznym 20 V przypada 6 V spadku napięcia na 100 V napięcia wyprostowanego, w przypadku elementów selenowych o napięciu wstecz-

nym 40 V — 3 V na 100 V, w przypadku elementów germanowych o napięciu wstecznym 60 V — 2,4 V na 100 V, a w przypadku elementów 100-woltowych tylko 1,2 V na 100 V.

Przebieg spadku napięcia w prostowniku o stykach mechanicznych jest podobny do przebiegu spadku napięcia w prostowniku o elementach germanowych 50-woltowych z tym jednak, że przy napięciach wyprostowanych poniżej 200 V spadek napięcia w prostowniku mecha-

nicznym jest w przybliżeniu stały. Spadek napięcia w prostowniku rtęciowym nie zależy od napięcia prostowanego.

Z porównania krzywych spadku napięcia wynika, że do napięcia 200 V prostowniki złożone z elementów selenowych 40-woltowych i prostowniki złożone z germanowych elementów 50-woltowych są porównywalne. Powyżej 200 V z prostownikiem germanowym złożonym z elementów 50-woltowych może konkurować prostownik o stykach mechanicznych. Prostownik złożony z elementów o napięciu wstecznym 100 V jest bezkonkurencyjny pod względem spadku napięcia do wartości napięcia wyprostowanego 1,5 kV. Powyżej tej wartości osiąga przewagę prostownik rtęciowy. Należy jednak brać pod uwagę, że istnieje z jednej



Rys. 9. Porównanie spadku napięcia w przypadku różnych prostowników

Hg — prostownik rtęciowy; M — prostownik mechaniczny; Se — prostownik selenowy; Ge — prostownik germanowy

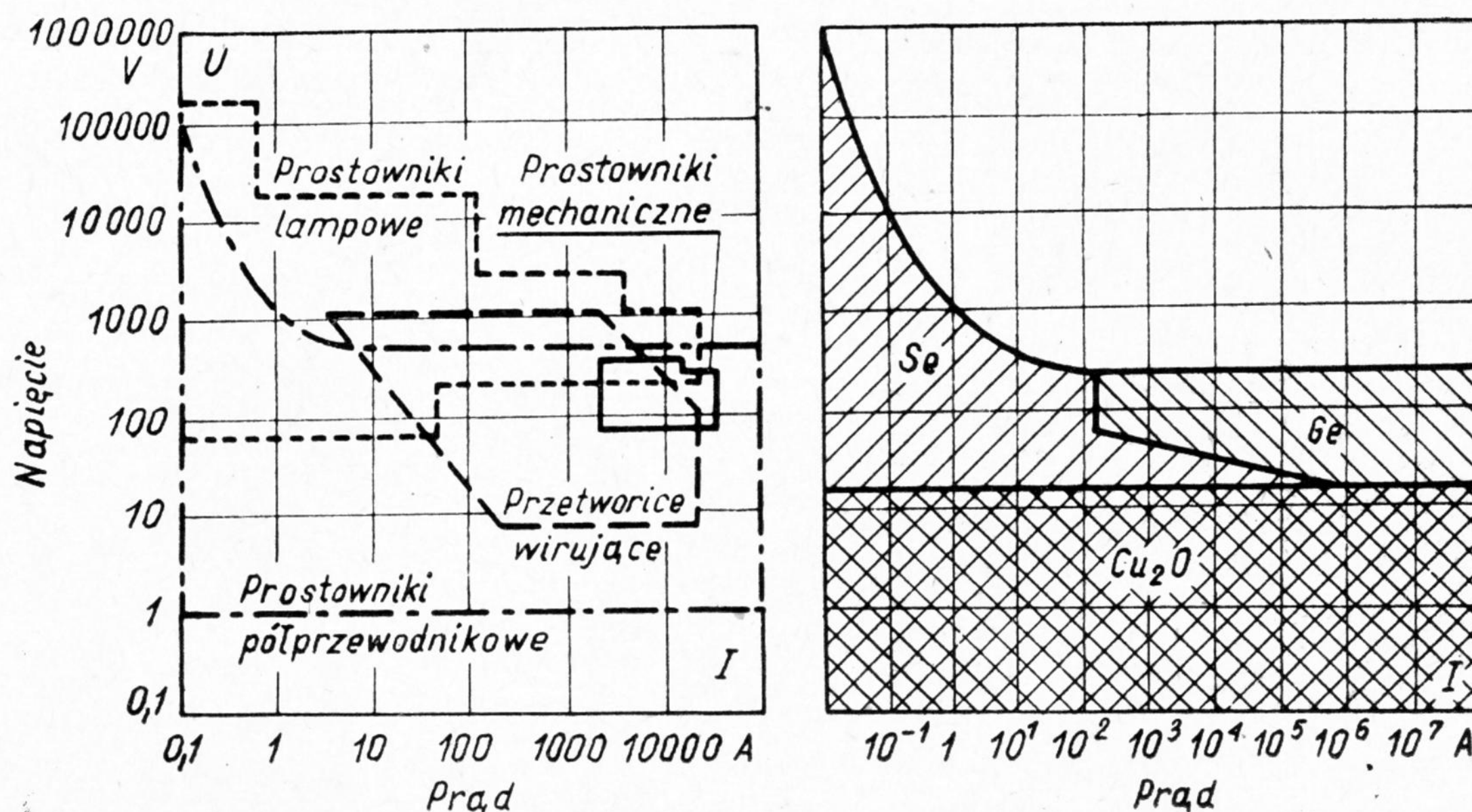
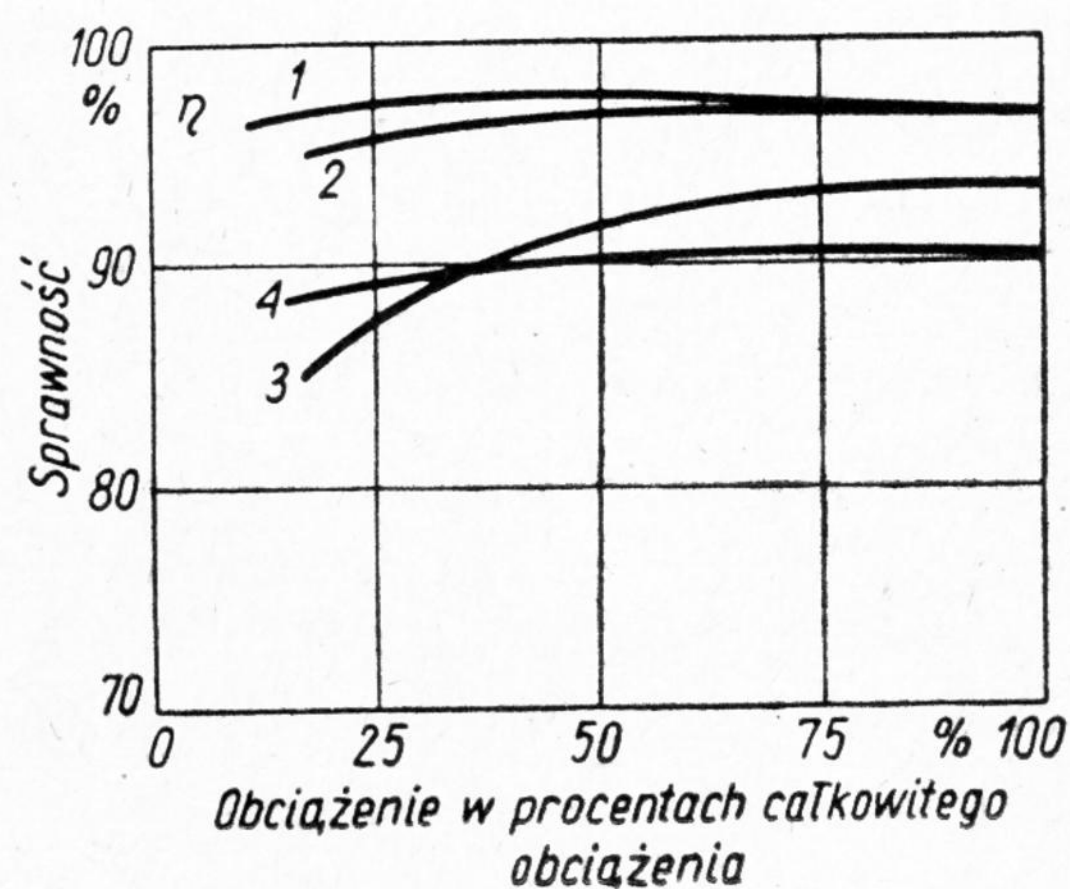
Prostownik	Spadek napięcia na elemencie	Napięcie wsteczne
Se (a)	0,6 V	20 V
Se (b)	0,6 V	40 V
Ge (a)	0,6 V	50 V
Ge (b)	0,6 V	100 V
Ge (c)	0,6 V	150 V

strony możliwość podwyższenia napięć wstecznych elementów selenowych, z drugiej zaś strony zmniejszenia spadku napięcia prostownika rtęciowego. Wtedy zakres przewagi prostownika germanowego mógłby ulec zmniejszeniu do około 700 V. Koszt produkcji prostownika rtęciowego o mocy 1 kW spada znacznie przy zwiększeniu mocy prostowanej, natomiast koszt prostownika germanowego o mocy 1 kW jest w przybliżeniu stały.

Z porównania krzywych sprawności różnych prostowników (rys. 10) wynika, że prostownik germanowy ma wyraźną przewagę, szczególnie w zakresie małych obciążeń.

Powyższe rozważania mogły być z konieczności przedstawione tylko szkicowo. Jest to spowodowane zarówno krótkim czasem użytkowania prostowników germanowych, jak i tym, że wszystkie przesłanki mogące być podstawą do porównania różnego rodzaju urządzeń prostowniczych są dostępne jedynie wielkim zakładom produkcyjnym, gdzie są zresztą przedmiotem gruntownych badań.

Rys. 10. Porównanie sprawności różnych prostowników
1 — prostownik germanowy; 2 — prostownik mechaniczny; 3 — przetwornica wirująca; 4 — prostownik rtęciowy



Rys. 11. Porównanie zakresów stosowalności różnych prostowników

Na rys. 11 przedstawiono krzywe obrazujące zakresy zastosowań poszczególnych prostowników według danych firmy General Electric Co. Zwraca uwagę fakt, że nie uwzględniono tu jeszcze prostowników krzemowych.

3.3.4. Diody warstwowe krzemowe

Zastosowanie krzemu do diod warstwowych nastąpiło — jeżeli idzie o produkcję masową — dopiero w latach 1955—1956 ze względu na znacznie trudniejszą technologię oczyszczania i monokryształizacji krzemu niż germanu. Diody krzemowe mają niewątpliwą wyższość nad germanowymi, jeżeli chodzi o maksymalną temperaturę pracy (do 200 °C) oraz oporność wsteczną (do kilkuset megaomów). Spadek napięcia na diodzie przy maksymalnym obciążeniu wynosi ok. 1 V, tzn. jest około dwukrotnie większy niż w przypadku germanu. Wartość na pierwszy rzut oka wskazuje, że diody germanowe powinny wykazywać lepsze właściwości w przypadku zastosowań do prostowników dużej mocy aniżeli diody krzemowe. Należy tu jednak wziąć pod uwagę, że spadek napięcia zmniejsza się ze wzrostem temperatury, a możliwość dopuszczalnie wyższej temperatury w przypadku krzemu znacznie upraszcza zagadnienie chłodzenia.

W każdym razie nie są znane obecnie prostowniki krzemowe o takiej mocy jak prostowniki germanowe, o których była mowa uprzednio.

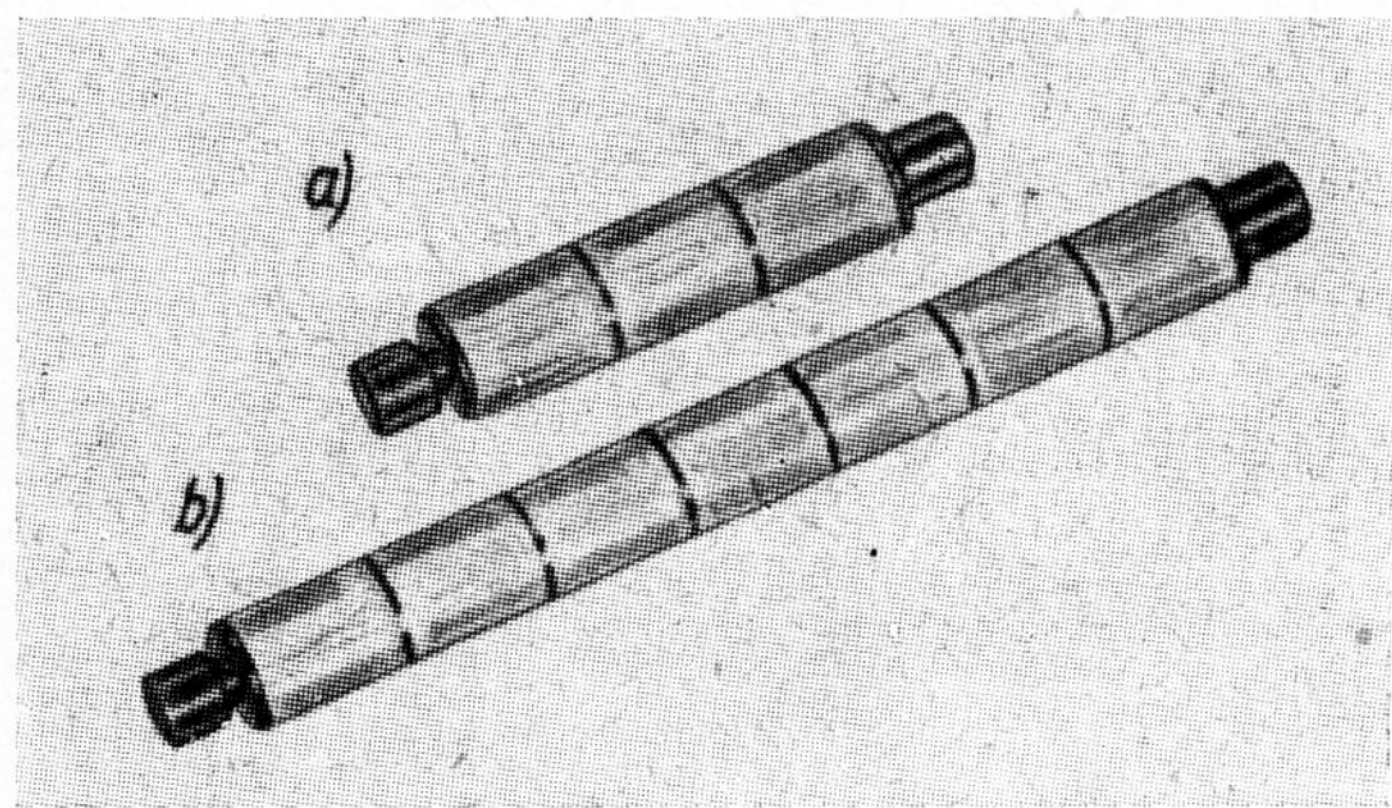
W małych diodach krzemowych osiąga się oporności wsteczne dochodzące do 500 MΩ przy napięciu 175 V. Dane te dotyczą diody IN459 produkowanej przez firmę Transitron. Napięcie wsteczne diod krzemowych stopowych może dochodzić do 1000 V.

Napięcie wsteczne diody 1-amperowej typu CK851 o konstrukcji wkręcanej do podstawy wynosi 600 V, a oporność wsteczna przy tym napię-

ciu wynosi 300 MΩ. Napięcie wsteczne diody 35-amperowej o chłodzeniu naturalnym produkowanej przez firmę Transitron wynosi 400 V, a oporność wsteczna — 80 kΩ.

W związku z wysokim napięciem wstecznym i dużą opornością wsteczną diody krzemowe dobrze nadają się do łączenia szeregowego.

Opracowano prostownik 280SM (lub IN1113) złożony



Rys. 12. Prostowniki krzemowe o wysokim napięciu wstecznym: a) 1200 V, 425 mA; b) 2800 V, 325 mA

z szeregowo połączonych elementów krzemowych, którego napięcie wsteczne wynosi 2800 V, a prąd wyprostowany 325 mA przy temperaturze 100 °C i 162 mA przy temperaturze 150 °C. Długość całego prostownika wynosi ok. 10 cm, średnica zaś 1 cm (rys. 12). Prostownik ten wytrzymuje przeciążenie 10 A w ciągu 4 ms. Jest to jeszcze jedna z po-

ważnych zalet diod krzemowych, że mogą one znosić znacznie większe krótkotrwałe przeciążenia aniżeli diody germanowe.

Warto tu wspomnieć o prostowniku krzemowym HFWR-1 wykonanym w obudowie podobnej do obudowy lamp metalowych, który zastępuje lampę prostowniczą 5R4-GY o napięciu wstecznym 2100 V, przy czym jego wymiary liniowe są około 4 razy mniejsze, sprawność prostowania w typowych warunkach pracy (wartość szczytowa napięcia 1414 V, oporność obciążenia 1650 Ω) wynosi 98,3% w porównaniu ze sprawnością 79,5% lampy, a maksymalna wartość prądu wyprostowanego wynosi 400 mA w porównaniu z 250 mA lampy.

Pojemność małych diod krzemowych wynosi zwykle kilka pikofarów i jest nieliniową funkcją napięcia. Na przykład dioda angielska ZS10 ma pojemność 2 pF przy napięciu wstecznym 9 V i 12 pF przy prądzie 1 μ A w kierunku przewodzenia. W związku z tym nasuwa się możliwość zastosowania złącz p-n w krzemie jako nieliniowych pojemności o bardzo małych stratach. Czas połączenia diody ZS10 wynosi 3 μ s, a jej częstotliwość graniczna 100 kHz. Amerykanie donoszą jednak o diodach krzemowych o czasie przełączenia 0,15 μ s i o napięciu wstecznym 30 V. Pozwalałoby to im na konkutowanie z diodami o styku złotym.

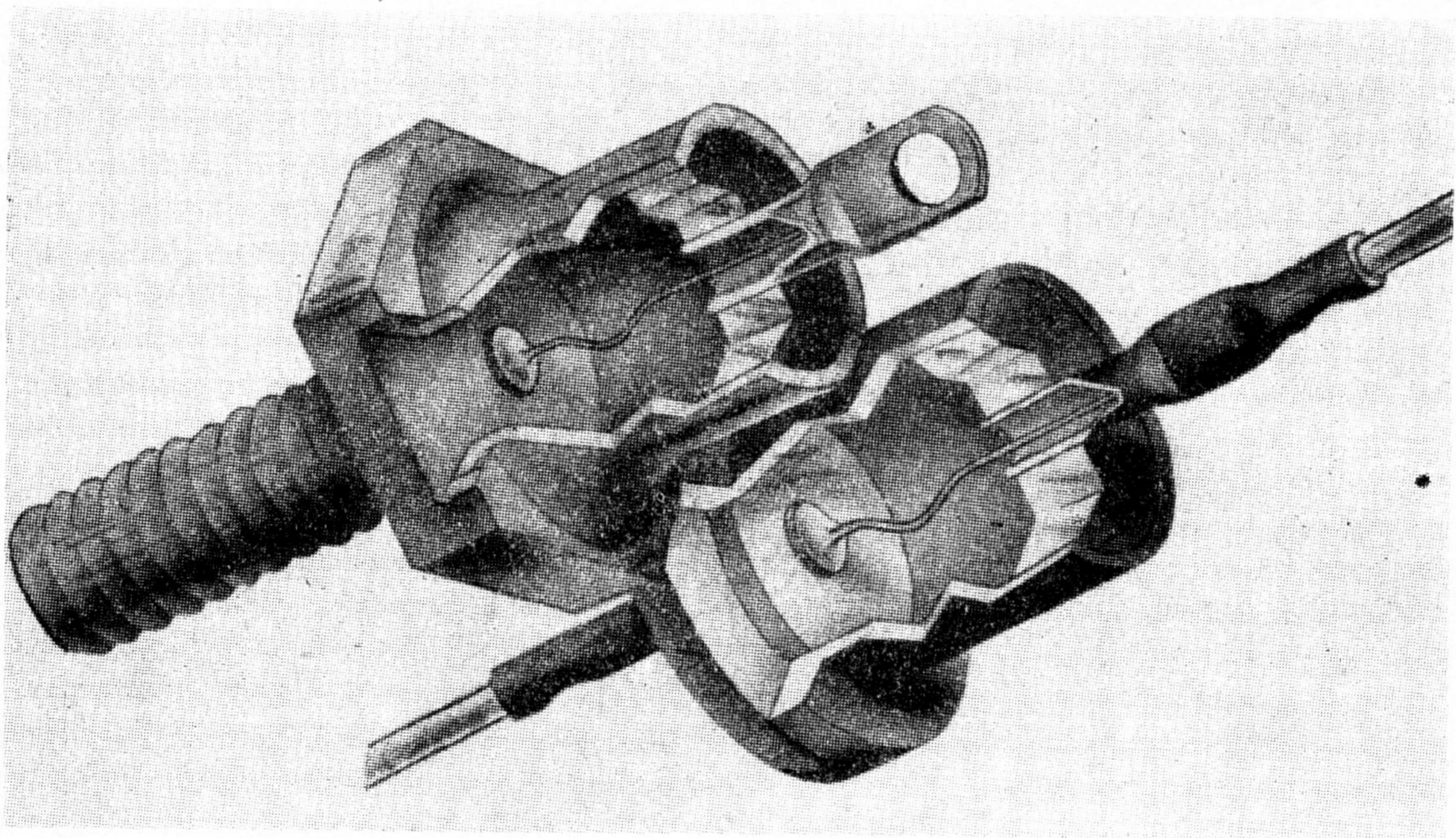
Zastosowanie diod krzemowych przynosi korzyści szczególnie w przypadku pracy w dużych temperaturach oraz w przypadku dużych wymagań co do oporności wstecznej i napięcia wstecznego. W związku z tym diody krzemowe nadają się szczególnie do tworzenia zwartych jednostek o dużym napięciu wstecznym oraz do zastosowania we wzmacniaczach magnetycznych, w których prąd wsteczny powinien być możliwie mały. Małe diody krzemowe mogą być stosowane w układach impulsowych o dużej szybkości połączenia. Zastosowanie diod krzemowych mocy pozwala uzyskać sprawność prostowania mniejszą (97%) niż w przypadku dużych prostowników germanowych. Tam jednak, gdzie niepożądane jest sztuczne chłodzenie powietrzne lub wodne, prostowniki krzemowe uzyskują zdecydowaną wyższość.

Do jednych z bardziej interesujących zastosowań diod krzemowych należy zastosowanie ich w elektrotechnice samochodowej jako przełączników.

Zastosowanie diod krzemowych będzie niewątpliwie rozszerzało się i dorówna na pewno zastosowaniu diod germanowych. O doborze german czy krzem będą decydowały zapewne niewielkie często różnice właściwości elektrycznych, a także zagadnienie ceny.

Technologia diod krzemowych, podobnie zresztą jak technologia innych diod warstwowych, składa się z dwóch zasadniczych etapów: wykonania monokryształu o żądanych właściwościach oraz wykonania złącza i doprowadzeń. Wykonanie monokryształu krzemu o odpowiedniej

czystości jest zadaniem trudnym, ze względu na stosunkowo wysoką temperaturę jego topnienia, wysoką prężność par w temperaturze topnienia oraz ogromne powinowactwo chemiczne w temperaturze topnienia do niemal wszystkich materiałów. Zastosowanie bardzo czystych materiałów pomocniczych, jak kwarc, grafit oraz tantal, a także szeregu specjalnych metod technologicznych, spośród których wymienić należy przede wszystkim metody beztyglowe, dało tu dobre rezultaty dopiero w ostatnich latach. Natomiast wykonanie złącza na odpowiednim materiale nie nastrocza, jak się wydaje, większych trudności niż w przypadku germanu. Zastosowanie drutu aluminiowego w metodzie stopowej rozwiązuje od razu zagadnienie doprowadzenia. Styk oporowy jest wykonany podobną techniką przy zastosowaniu złota zanieczyszczonego antymonem.



Rys. 13. Typowe diody krzemowe stopowe

Właściwe trawienie powierzchni po wykonaniu złącza oraz zabezpieczenie jej od wpływów mechanicznych jest zagadnieniem szczególnie ważnym.

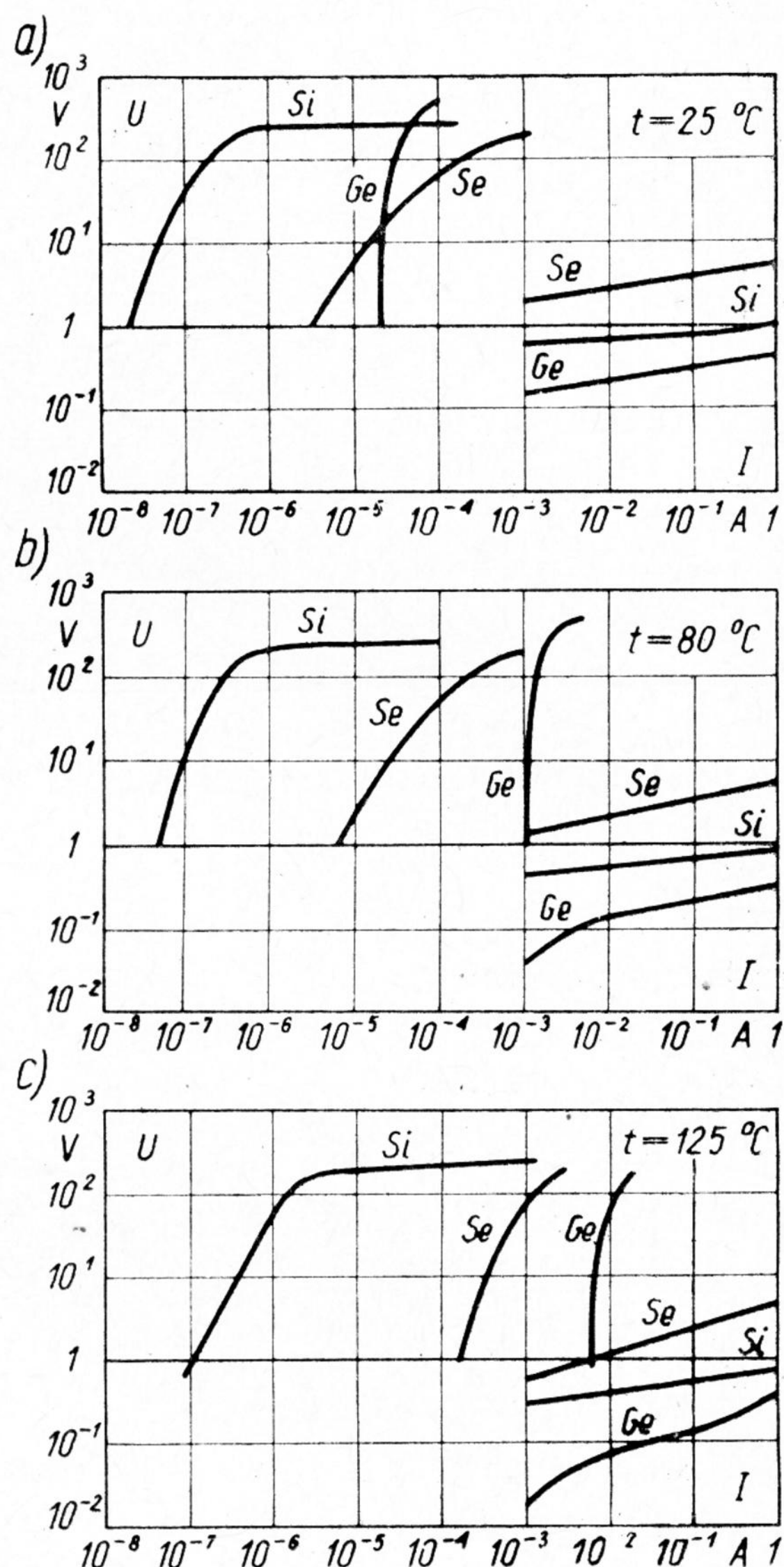
Na rys. 13 przedstawiono schematycznie budowę typowych krzemowych diod stopowych.

W przypadku złącz o większych powierzchniach stosuje się dyfuzję boru i fosforu na powierzchni krzemu. Metodą tą wykonano w laboratoriach Bella elementy o prądzie wyprostowanym do 100 A i napięciu wstecznym do 200 V. Na rys. 14 przedstawiono porównanie charakte-

rystyk temperaturowych tych diod oraz diod germanowych i selenowych.

Cechą charakterystyczną metody jest to, że pozwala w łatwiejszy sposób kontrolować zachodzące procesy, co umożliwia projektowanie diod o żądanych właściwościach elektrycznych i cieplnych. W związku z tym, że metoda dyfuzyjna jest również stosowana w technologii tranzystorów i fotoogniw, zyskuje ona stale na znaczeniu.

Rys. 14. Charakterystyki statyczne elementów prostowniczych krzemowych (Si), germanowych (Ge) i selenowych (Se) w różnych temperaturach



PRZEGLĄD CZASOPISM

Kineskopy o kącie odchylenia 110°. W. A. Dickinson, W. D. Schuster: TV Picture Tubes Employing 110-Degree Deflection. — *Sylvania Technol.* Vol. 10 Nr 4 October 1957.

W zakładach firmy „Sylvania” opracowano nową serię kineskopów o znacznie zmniejszonej długości.

Przemysł telewizyjny nieustannie dąży do zmniejszenia ciężaru i rozmiarów produkowanych odbiorników. Wielkością ograniczającą możliwość zmniejszenia długości odbiornika jest długość kineskopu (od ekranu do cokołu). Zmniejszenie długości kineskopu w stosunku do danych