

## DIODA TUNELOWA

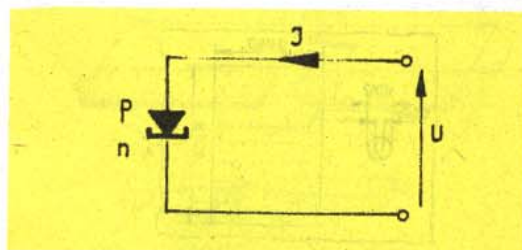
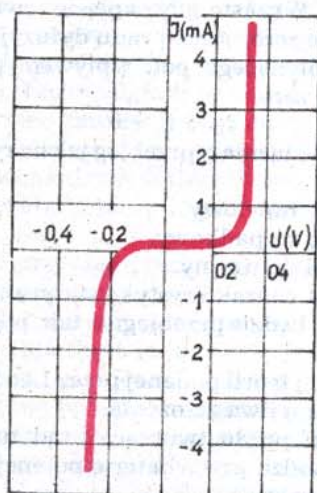
W tym roku minie 30 lat od skonstruowania przez Leo Esakiego diody tunelowej.

Ten japoński fizyk badał zjawiska zachodzące w bardzo wąskich złączach p-n. Esaki badał emisję pola wewnętrznego w złączu o bardzo dużej koncentracji domieszek. Wyniosła ona w strefie p =  $1,6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , a w strefie n =  $1,0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , przy grubości złącza około 150 Å. Natężenie pola w złączu wyniosło  $5 \times 10^5 \text{ V/cm}$ . Dioda taka ma lepsze warunki przewodzenia przy napięciach zaporowych aniżeli w kierunku przepustowym.

Esaki stwierdził, że przy koncentracji akceptorów około  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  można zaobserwować lepsze przewodnictwo diody dla napięć zaporowych niż dla przepustowych.

Przebieg odpowiedniej charakterystyki pokazuje rys. 1, a schematyczne oznaczenie diody tunelowej przedstawiono na rys. 2.

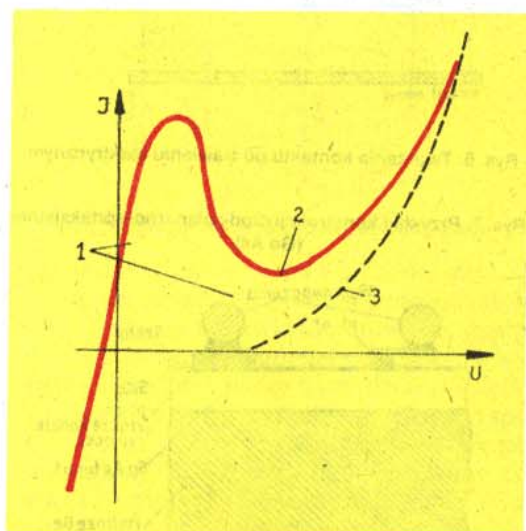
Rys. 1. Charakterystyka diody o wysokiej koncentracji domieszek

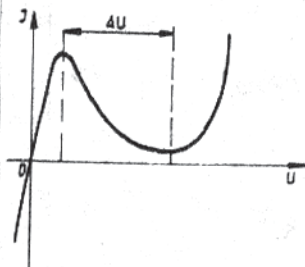


Rys. 2. Schematyczne oznaczenie diody tunelowej

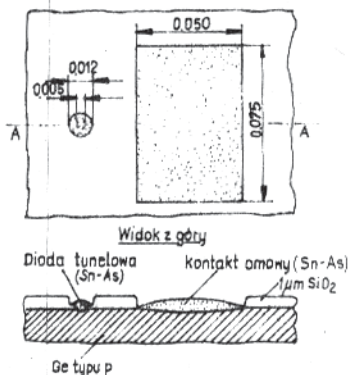
Dalsze zwiększenie koncentracji powoduje zmniejszanie się grubości złącza Zenera przy coraz to niższych napięciach wstecznych. Ponadto zaczynając od koncentracji akceptorów  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , występuje w zakresie przepustowym rezystancja ujemna, będąca cechą charakterystyczną diody tunelowej. Charakterystyka taka stanowi wynik współdziałania kilku składowych prądów.

Rys. 3. Przebieg prądów składowych i prądów wypadkowych w diodzie tunelowej

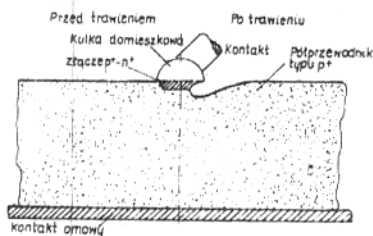




Rys. 4. Charakterystyka statyczna diody tunelowej

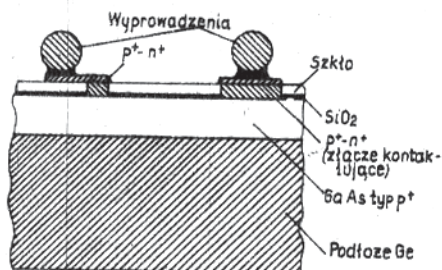


Rys. 5. Schematyczne przedstawienie diody tunelowej wykonanej techniką stopową



Rys. 6. Tworzenie kontaktu po trawieniu elektrycznym

Rys. 7. Przykład konstrukcji diody planarno-epitaksjalnej (Ge As)



Rozważmy wszystkie te prądy szczegółowiej. Należałoby tu wrócić do normalnej diody półprzewodnikowej o małej koncentracji domieszek w warstwach p i n.

W złączu p-n poziomy Fermiego wyrównują się, gdy na dane warstwy nie działa żadne napięcie zewnętrzne. Przejście nośników prądu odbywa się na różnych poziomach energetycznych – wzdłuż linii poziomych.

W przypadku różnych koncentracji elektronów, po obu stronach złącza na tym samym poziomie, popłynie prąd dyfuzyjny proporcjonalny do tej różnicy koncentracji. Po utworzeniu złącza z warstw p i n w pierwszej chwili następuje przepływ nadmiaru elektronów ze strefy n do p oraz nadmiaru dziur ze strefy p do n.

Wobec braku dostarczenia elektronów z zewnątrz, wywołuje to powstanie napięcia dyfuzyjnego ze znakiem plus po stronie n. Powoduje to, że średnia energia ujemnych elektronów w strefie n zmniejsza się w porównaniu do średniej energii w strefie p, a pasma energetyczne tej strefy przesuwają się w dół, podobnie jak przy doprowadzeniu ujemnego napięcia zewnętrznego do diody.

Po tym przesunięciu oba poziomy Fermiego zostaną wyrównane. Napięcie dyfuzyjne ze znakiem plus po stronie n pozostaje na brzegu złącza.

Dzięki napięciu dyfuzyjnemu następuje przepływ prądu w kierunku odwrotnym do kierunku prądu utworzonego przez nośniki większościowe. Kierunek ten nazwalibyśmy ujemnym. W czasie, gdy napięcie zewnętrzne jest równe zero, suma prądu dyfuzyjnego  $I_D$  i prądu płynącego pod wpływem pola  $I_p$ , równa się zero.

$$I_D + I_p = 0$$

Prądy te będą miały przebieg jak na rys. 3, na którym:

- 1 – prąd tunelowy,
- 2 – prąd wypadkowy,
- 3 – prąd dyfuzyjny.

Natomiast charakterystyka statyczna diody tunelowej będzie przebiegała tak, jak na rys. 4.

Z prostej teorii podanej przez Leo Esakiego wynikają dwa założenia:

- 1) nośniki prądu tworzące prąd tunelowy przechodzą przez baterię potencjału bez straty energii,

2) tunelowe przejście nośników prądu możliwe jest tylko wówczas, gdy istnieje po przeciwnej stronie złącza identyczny wolny stan energetyczny.

Prąd tunelowy i prąd Zenera teoretycznie istnieje w każdej diodzie, jednak wartości ich są tak małe w porównaniu do wartości prądu dyfuzyjnego i prądu pola, że w praktyce nie odgrywają one żadnej roli. Warunki zmieniają się dopiero przez zwiększenie stopnia koncentracji domieszek w obu wartościach p i n.

Diody tunelowe są wytwarzane w postaci złącza  $p^+ - n^+$  następującymi metodami: stopową, stopowo-ostrzową i apitaksjalną.

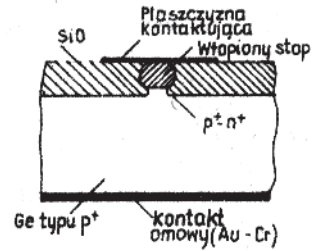
Pierwsze egzemplarze diod tunelowych wykonywane były klasyczną metodą stopową. W metodzie tej złącze formuje się wtapiając kulkę silnie domieszkowanego metalu w zdegenerowany półprzewodnik o przeciwnym rodzaju domieszek (np. wtapiając cynę z domieszką arsenu w zdegenerowany german typu  $n^+$  - rys. 5).

Następnie wykonuje się połączenia elektryczne kulki i za pomocą trawienia elektrolitycznego usuwa się część materiału półprzewodnikowego w celu zmniejszenia średnicy złącza do wymaganej wartości prądu. W wyniku trawienia w okolicy złącza tworzy się tzw. stożek, którego średnica ma istotny wpływ na parametry diody: prąd szczytowy, pojemność złącza, rezystancję szeregową, a nawet na indukcyjność diody. Ponadto średnica stożka określa wytrzymałość mechaniczną oraz niezawodność elementu (rys. 6).

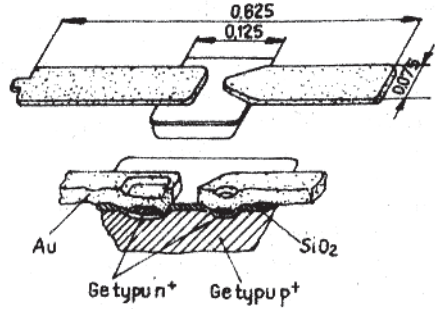
Na szczególną uwagę zasługuje konstrukcja planowana diod tunelowych opracowana przez firmy amerykańskie i firmy japońskie (Sony). Technologia tego typu pozwala zdecydowanie zmniejszyć rozmiary diod, zwiększyć niezawodność, polepszyć wytrzymałość mechaniczną i klimatyczną odporność, a także znacznie zmniejszyć koszty wytwarzania diod.

Inne przykłady techniki wykonania diod przedstawiają rysunki 7 - 9.

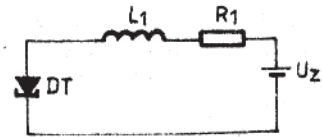
Planarne diody germanowe, opracowane w Sylvania Electric Inc. były wykonane następująco: wyjściową płytkę germanową podłożową pokrywano z jednej strony warstwą złota z pokładem chromowym, uzyskując pewny kontakt omowy. Na przeciwległą stronę płytki, po wypolerowaniu powierzch-



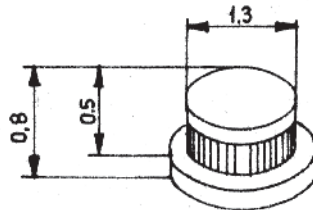
Rys. 8. Przykład diody planarno-germanowej



Rys. 9. Przykłady diody planarnej - o belkowych doprowadzeniach BTL



Rys. 10. Prosty układ z diodą tunelową



Rys. 11. Widok diody tunelowej, wymiary w mm

ni, naporowywano z dwóch źródeł stop cynowo-arsenowy. Za pomocą procesu fotolitograficznego i trawienia usuwano zbędne części tego stopu, pozostawiając jedynie wysepki o średnicy około  $5 \mu\text{m}$ . Po wytopieniu wysepki i trawieniu otrzymanych w ten sposób złączy  $p^+ - n^+$ , nakładano warstwę powierzchni,  $\text{SiO}_2$ . Następnie wygładzono powierzchnię płytki za pomocą szlifowania, aż do momentu wyłonienia się spod warstwy  $\text{SiO}_2$

„odkrytych” części wysepek. Na te wyseпки, po starannym wypolerowaniu całej powierzchni, naparowywano warstwę złota, stanowiącą płaszczyznę trwałego mechanicznie kontaktu. Opracowany w Sony Corp. (Japonia) proces wytwarzania planarnych diod tunelowych nazwany został „techniką mostkową”. W metodzie tej na powierzchni płytki germanowej, chronionej warstwą dwutlenku krzemu, wykonuje się okna w kształcie pasków szerokości około 20  $\mu\text{m}$ . Następnie przez odpowiednie maski naparowuje się stop o przewodnictwie typu n. Maski tak wykonane i ustawione, że naparowywany stop tworzy pasek szerokości około 10  $\mu\text{m}$  usytuowany w poprzek wspomnianych okien. Na końcu tego paska naparowywane są kontakty o rozmiarach 50  $\times$  500  $\mu\text{m}^2$ . Środkowa część paska przylega bezpośrednio do germanu i po wtopieniu formuje złącze  $p^+ - n^+$ , które następnie jest podtrawiane w celu uzyskania odpowiedniej wartości prądu  $J_p$ .

Technologia belkowa doprowadzeń została opracowana w Bell Telephona Labs, tam też zostały wykonane pierwsze egzemplarze diod tunelowych z tego typu doprowadzeniami. Materiałem wyjściowym jest w tym przypadku płytka germanowa pokryta z jednej strony warstwą ochronną  $\text{SiO}_2$ , na której naparowuje się stop Sn - As, wytapiany później do germanu typu  $p^+$ . Omowy kontakt z podłożem uzyskuje się - podobnie jak w omawianej poprzednio konstrukcji - tworząc dodatkowe złącze tunelowe o dużej powierzchni.

Belkowe doprowadzenia wykonuje się przez naparowanie cienkiej warstwy złota z podkładem chromowym. Złoto jest następnie pogrubiane galwanicznie do około 15  $\mu\text{m}$ , a zbędne części materiału podłożowego usuwane są spod kontaktów za pomocą trawienia. Otrzymane w ten sposób konstrukcje odznaczają się doskonałą wytrzymałością mechaniczną i bardzo dobrymi parametrami elektrycznymi.

Najważniejszym wnioskiem teorii Esakiego jest stwierdzenie, że prąd tunelowy nie ma charakteru prądu dyfuzyjnego, lecz prądu przewodzenia: szybkość jego przepływu zbliża się do szybkości światła, co ma zasadnicze znaczenie w przypadku wykorzystania diody tunelowej przy bardzo wielkich częstotliwościach.

Współczesna technika dąży do uzyskania coraz to większych czułości odbiorników mikrofalowych. W ciągu ostatnich kilkunastu lat uzyskano bardzo dobre parametry wzmacniaczy mikrofalowych wykorzystujących diody tunelowe. Wzmacniacze te pod względem właściwości charakteryzują się wieloma cennymi zaletami, z których jako główne można wymienić następujące:

- dobre parametry szumowe,
- małe rozmiary (rzędu 10  $\div$  15  $\text{cm}^3$ ),
- duża szerokopasmowość, rzędu jednej oktawy,
- niewielki ciężar,
- niewielki pobór mocy, około 10 mW,
- mała wrażliwość na promieniowanie kosmiczne,
- minimalna nierównomierność częstotliwościowej charakterystyki wzmocnienia rzędu 0,02 dB/MHz.

Powyższe parametry wpłynęły na szerokie zastosowanie wzmacniaczy tunelowych w mikrofalowym sprzęcie przenośnym, w odbiornikach wmontowanych bezpośrednio w anteny, sprzęcie lotniczym i kosmicznym oraz w urządzeniach radiolokacyjnych z fazonowaną siecią antenową.

Wzmacniacze z diody tunelowej są do 10 razy tańsze od wzmacniaczy z lampą o fali bieżącej (WFB).

Trzeba dodać, że istnieje pewna konkurencja dla wzmacniaczy z diodą tunelową, chodzi tu o wzmacniacze tranzystorowe (WT).

Lecz w tym porównaniu wzmacniacze z diodą tunelową charakteryzują się następującymi korzystnymi cechami:

- lepszymi parametrami szumowymi,
- większą górną granicą częstotliwości pracy,
- większą szerokopasmowością,
- mniejszym poborem mocy zasilania.

Wzmacniacze z (DT) na pasma S i C mają większy iloczyn wzmocnienia i pasma przepuszczenia aniżeli (WT). Należy dodać, że (WT) są układami, które doskonale nadają się do scalenia i mogą wykazywać lepsze parametry elektryczne od parametrów konwencjonalnych odpowiedników. Scalenie (WT) pozwala na zastosowanie ich w mikrofalowych urządzeniach odbiorczych.

**Tadeusz Rosik**