

ELEMENTY DYSKRETNE

W skład zarówno supernowoczesnych urządzeń, jak i bardzo prostych układów elektronicznych wchodzi między innymi półprzewodnikowe elementy dyskretne, czyli diody i tranzystory.

Czytelnicy działu „Na warsztacie” „MT” często mają do czynienia z praktycznymi zastosowaniami tych elementów (vide artykuł o migaczu w tym numerze), tym razem proponujemy więc nieco uzupełniającej teorii.

Jak pamiętamy w materiale półprzewodnikowym występują dwa rodzaje przewodnictwa elektrycznego: dziurowe i elektronowe (elektrony są to elementarne cząstki atomu, a dziury to po prostu puste miejsca po przesuwających się elektronach).

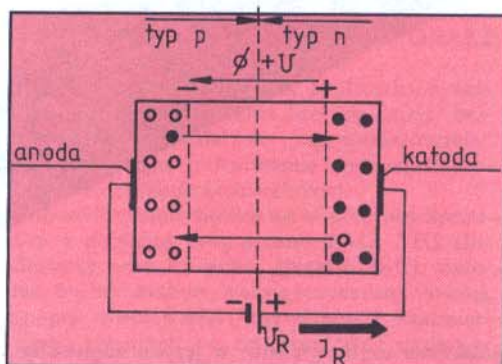
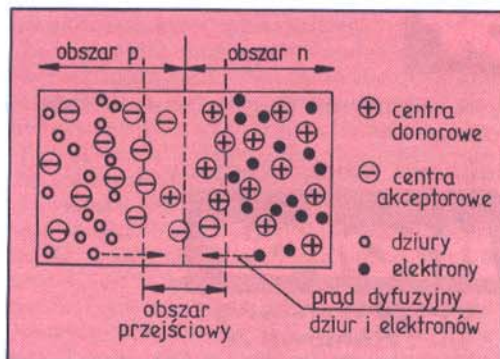
Podstawowym materiałem używanym obecnie w produkcji półprzewodników jest *krzem*, nie czysty, tylko domieszkowany w specjalnych procesach dyfuzyjnych pierwiastkami z grupy trzeciej (np. bor, aluminium) – tzw. typ *p* i z grupy piątej (np. fosfor, antymon, arsen) – typ *n*. Technologia dyfuzyjna polega na wykorzystaniu zjawiska dyfuzji (przenikania) domieszki do wnętrza płytki półprzewodnikowej w odpowiednio wysokiej temperaturze (700–1250°C) i przez określony ściśle czas.

DIODA

Z krzemu typu *p* i *n* możemy wykonać podstawowy element półprzewodnikowy – diodę. Zawiera ona tzw. *złącze p-n* i oczywiście tylko dwa wyprowadzenia.

Wyjaśnijmy sobie od razu, że złącze *p-n* nigdy nie powstaje na skutek zetknięcia, czy też sklejenia

Złącze typu *p-n*

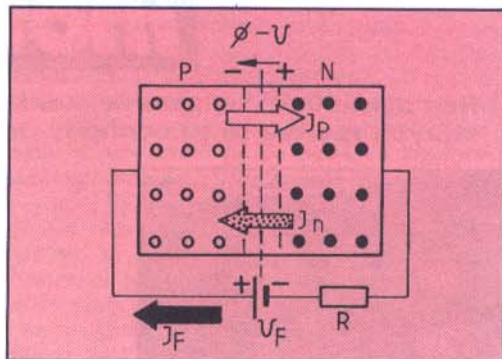


Dioda spolaryzowana zaporowo

krzemu typu *n* i *p*. Krzem musi stanowić ciągłą sieć krystaliczną, do której po stronie *n* wdyfundowane są atomy np. fosforu (donory), a po stronie *p* atomy np. boru (akceptory). Co się więc dzieje w tak utworzonym złączu?

Swobodne nośniki ładunków (dziury i elektrony) pochodzące od zjonizowanych atomów domieszek donorowych i akceptorowych, poruszają się w sposób bezwładny w obszarach *p* i *n* półprzewodnika wskutek dyfuzji cieplnej. Te dziury, które znajdują się chwilowo w obszarze przejściowym, przejdą z obszaru *p* do *n* rekombinując tam z elektronami. Natomiast wiele elektronów przedyfunduje z obszaru *n* do obszaru typu

Dioda przewodząca. Rezystor w obwodzie jest tylko po to, aby ograniczyć prąd płynący przez diodę i uchronić ją przed zniszczeniem



J_p =prąd dziurowy J_n =prąd elektronowy

p i rekombinuje z będącymi tam w dużej liczbie dziurami.

Na skutek tych procesów w prawej części naszej diody w pobliżu przejścia p-n, wystąpi brak elektronów i nadmiar nie zrównoważonych elektrycznie donorów, czyli powstanie tam dodatni ładunek przestrzenny. Analogicznie powstanie ujemny ładunek przestrzenny w lewej części złącza. Po pewnym czasie ładunki przestrzenne i związana z tym różnica potencjałów będzie tak duża, że dalszy przepływ nośników ustanie i nastąpi stan równowagi elektrycznej dla określonych warunków zewnętrznych.

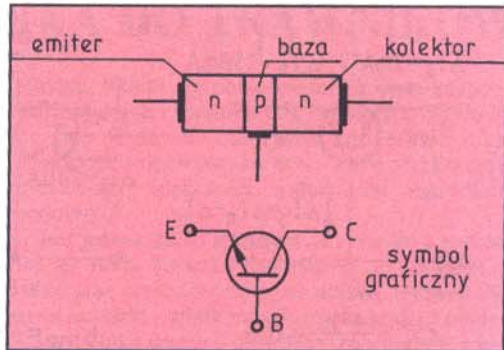
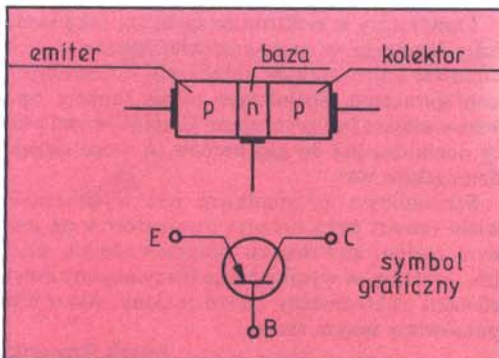
Jeśli do tak utworzonej diody przyłożymy z zewnątrz napięcie zgodne z wewnętrzną różnicą potencjałów (tzn. plus do katody a minus do anody) to wewnętrzna bariera potencjału Φ zwiększy się o wartość napięcia zewnętrznego U . Warstwa zaporowa stanie się szersza, a prąd dyfuzyjny zmaleje praktycznie do zera. Dioda nie przewodzi, bo jest spolaryzowana zaporowo i płynie bardzo mały prąd (J_R) tzw. *prąd wsteczny*.

Po odwróceniu napięcia zewnętrznego nastąpi obniżenie wewnętrznej bariery potencjału i przepływ prądu jest możliwy. Dioda w ten sposób przewodzi (prąd J_F), bo jest spolaryzowana w kierunku przewodzenia. Rezystor w obwodzie diody jest tylko po to, aby ograniczyć prąd płynący przez diodę (uchronić ją przed zniszczeniem). Diody stosuje się głównie do prostowania napięć zmiennych.

TRANZYSTOR

Wynalezienie tranzystora w 1948 r. zapoczątkowało gwałtowny rozwój elektroniki. Już w latach 60. tranzystory i diody zaczynają wypierać wszechwładne lampy elektronowe. Parametry elektryczne elementów półprzewodnikowych są coraz lepsze, a ich wymiary maleją. Materiały i technologia wytwarzania tranzystorów są w zasadzie podobne jak w przypadku diody, ale zasada działania tranzystora jest nieco inna. Tranzystor jest elementem wzmacniającym prąd, a dioda prostującym.

Tranzystor typu p-n-p

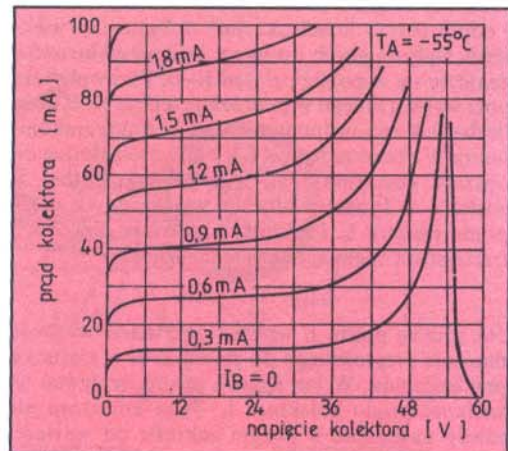


Tranzystor typu n-p-n

Jak więc działa tranzystor?

Tranzystor posiada dwa złącza p-n w odpowiedniej konfiguracji. Istnieją dwa warianty tej konfiguracji:

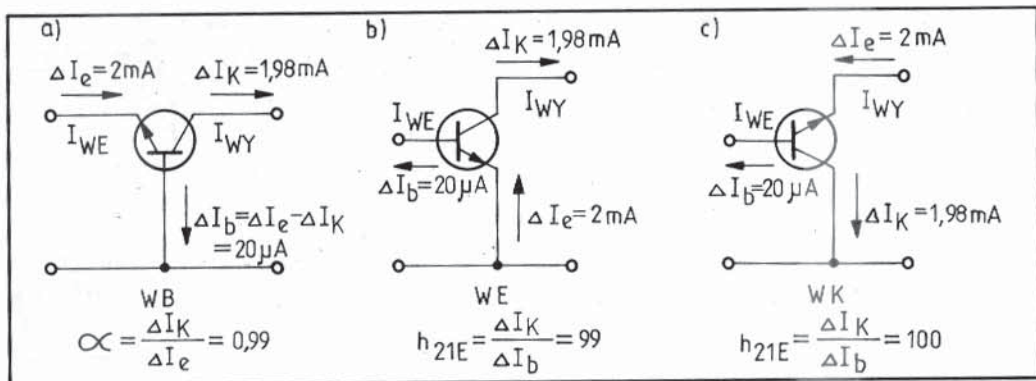
- dwa zewnętrzne obszary typu p i wewnętrzny wspólny obszar typu n, jest to tranzystor typu p-n-p
- dwa zewnętrzne obszary typu n i wewnętrzny wspólny typu p, jest to tranzystor typu n-p-n, bardzo popularny w układach elektronicznych.



Typowe charakterystyki kolektorowe dla krzemowego tranzystora planarnego

Działanie obu typów tranzystorów jest podobne. Wymagają one jedynie przeciwnego dołączenia biegunów polaryzacji zewnętrznej. Poza tym wszędzie tam, gdzie w tranzystorach n-p-n występują elektrony, w tranzystorach p-n-p są dziury. Wystarczy więc omówić tylko jeden typ, zajmiemy się więc najpopularniejszym tranzystorem w elektronice n-p-n. Każdy z widocznych na rysunku obszarów stanowi jedną elektrodę tranzystora. Obszar środkowy nazywa się *bazą*, a obszary zewnętrzne to *emiter* i *kolektor*. Widzimy więc, że baza jest zawsze przeciwnego typu niż emiter i kolektor.

Złącze emiter-baza (E-B) jest spolaryzowane w kierunku przewodzenia źródłem napięcia ze-



Układy pracy: a – ze wspólną bazą, b – ze wspólnym emiterem, c – ze wspólnym kolektorem. Na rysunkach podano przykładowe przyrosty prądowe

wewnętrzny w celu obniżenia wewnętrznej bariery potencjału. Natomiast złącze baza–kolektor (B–K) jest spolaryzowane w kierunku zaporowym, co jak wiemy podnosi wewnętrzną barierę potencjału i sprowadza praktycznie prąd kolektora I_k do zera (płyne tylko tzw. prąd wsteczny).

Ponieważ grubość bazy jest zawsze bardzo mała i odpowiednio konstrukcyjnie dobrana, to większość wpływających do niej z emitera elektronów znajdzie się w pobliżu złącza K–B. Pod wpływem pola wytwarzanego w poprzek przejścia K–B duża liczba elektronów (pomimo że część z nich zrekombinuje w obszarze bazy – I_b), z łatwością dotrze do obszaru kolektora. Tak więc prąd kolektora I_k zostanie w sposób widoczny zwiększony o część prądu emitera I_e . Przyrosty prądów w obwodach tranzystora spełniają zawsze zależność:

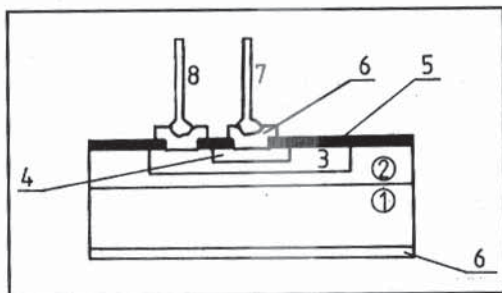
$$\Delta I_e = \Delta I_k + \Delta I_b$$

Na zmianę prądu I_e wpływa oczywiście wielkość napięcia przyłożonego do złącza E–B w kierunku przewodzenia. W ten sposób można wpływać na wielkość prądu kolektora I_k . Prąd kolektora nie zależy natomiast w dużym zakresie od wartości napięcia U_{CB} i U_{CE} .

Rozważania te prowadzą do stwierdzenia, że zmiany I_k są proporcjonalne do zmian I_e i można zapisać $\Delta I_k = \alpha \cdot \Delta I_e$, czyli $\alpha = \Delta I_k / \Delta I_e$. Jest to *zwarciowy współczynnik wzmocnienia prądowego*. Jest on nieco mniejszy od 1. Jest to słuszne dla omawianego dotychczas układu pracy ze wspólną bazą (WB). Istnieją jeszcze układy wspólnego emitera (WE) i wspólnego kolektora (WK).

W układzie WE ze względu na to, że prąd bazy jest różnicą prądu emitera i kolektora, do wywołania dużego prądu kolektora wystarczają małe zmiany prądu bazy. W tym układzie *statyczny współczynnik wzmocnienia prądowego* będzie wynosił:

$$h_{21E} = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_b} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$



Przekrój tranzystora wykonanego w technice planarno-epitaksjalnej. Jest to obecnie najczęściej stosowana technologia. Podłożem takiego tranzystora i zarazem kolektorem jest płytka krzemowa o b. niskiej rezystywności (dlatego piszemy n+): 1 – krzem typu n+, 2 – warstwa epitaksjalna typu n, 3 – warstwa dyfuzyjna typu p, 4 – warstwa dyfuzyjna typu n, 5 – warstwa tlenkowa (SiO_2), 6 – warstwa metalizacji (naparowana Al), 7 – wyprowadzenie emitera, 8 – wyprowadzenie bazy

Można więc stwierdzić, że wzmocnienie w układzie WE i WK jest największe. W elektronice najczęściej stosuje się układy ze wspólnym emiterem, gdyż mamy tutaj największe wzmocnienie prądowe i napięciowe, czyli największe wzmocnienie mocy i najbardziej zbliżone do siebie wartości rezystancji wejściowej i wyjściowej.

Tranzystory w elektronice spełniają taką samą rolę, jak cegły w budownictwie. Można z nich budować najrozmaitsze urządzenia w dowolnych konfiguracjach, spełniające różne funkcje np.: wzmacniające lub generujące. Częstotliwości pracy dochodzą już do gigaherców, a moce sięgają dziesiątków wat.

Szczególnym przypadkiem jest wytwarzanie wielu (nawet paru tysięcy) tranzystorów na jednym małym kawałeczku półprzewodnika, czyli tzw. scalanie, w wyniku czego otrzymujemy nowy element elektroniczny: układ scalony. Ale o nim pomówimy innym razem.

Jacek Sawicki