

JAK DZIAŁA TRANZYSTOR BIPOLARNY

wer.2

(żaden fragment poniższego tekstu nie może być powielany ani wykorzystany bez zgody autora)

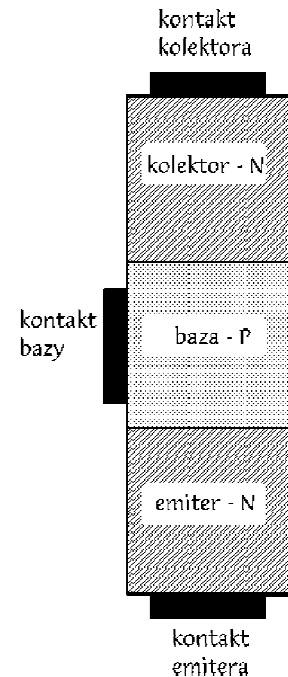
O, już słyszę ten jęk: "Ale czy to w ogóle można zrozumieć?!"

No coż, po wykonaniu wielu doświadczeń (na ludziach) jestem skłonny twierdzić, że **można**. Oczywiście nie od razu w całej pełni, rozumienie wszystkich subtelnych zjawisk zachodzących w tranzystorach to przywilej nielicznych, ale większość zainteresowanych elektroniką może opanować tę sprawę na tyle, żeby opracowywać własne układy.

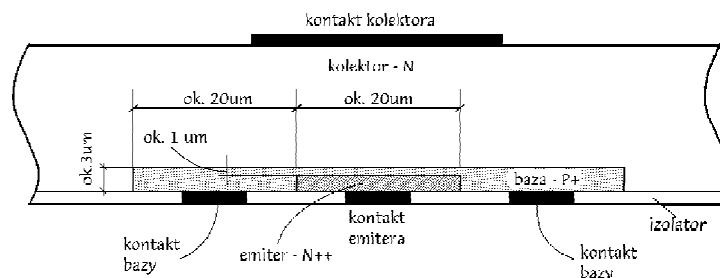
Tylko nie trzeba zaczynać od strasznie dłuugich wzorów z baaardzo mądrych książek. Spróbujmy zacząć od dość ważnego, a zwykle pomijanego stwierdzenia: tranzystor nie działa, jakby to rzec, sam z siebie. Działa, kiedy konstruktorzy technolodzy dołożą odpowiednio wielu starań, żeby działał. Właściwie tak samo jest ze wszystkimi rzeczami: np. rower daje się używać, kiedy kółka obracają się na kulkowych łożyskach, a nie są np. przyspawane do ramy. Dlatego nie jest tak, że wystarczy sklecić ze sobą trzy warstwy półprzewodnika o odpowiednich przewodnościach (rys. 1.1) i już będzie tranzystor. Rysunek taki, jak 1.1 pojawia się w wielu książkach. Jednak dla niewtajemniczonych czytelników przeważnie jest mylący. Może właśnie sprawiać wrażenie roweru z przyspawanymi kołami (niby rower - a nie jeździ). Dlaczego taki zestaw trzech klocków N+P+N miałby nie działać? To stanie się jasne (mam nadzieję) po dalszych wywodach.

Tranzystor NPN wykonany przy zastosowaniu standardowej technologii wygląda w przekroju mniej więcej tak¹, jak na rys. 1.2. Zwróćcie uwagę na dwie ważne rzeczy:

- 1) Trzy warstwy tranzystora są różnie domieszkowane. Najślabiej domieszkowany jest kolektor. Wyraźnie silniej domieszkowana jest baza (co oznacza się plusem przy literze P). Z kolei emiter domieszkowany jest jeszcze dużo silniej niż baza (N z dwoma plusami).
- 2) Bardzo istotne: baza - środkowy, najwazniejszy obszar tranzystora - jest niezwykle cienka² (na rysunku zachowano proporcje). To wynik wysiłku technologów. BAZA MUSI BYĆ CIENKA, inaczej tranzystor będzie kiepski, albo nawet wcale nie będzie się za-



Rys.1.1 Typowy rysunek objaśniający budowę tranzystora; trudno uwierzyć, że to działa



Rys.1.2 Przekrój typowego tranzystora z zachowaniem proporcji poszczególnych wymiarów

¹Ten rysunek przedstawiony jest do góry nogami w stosunku do podobnych obrazków w niektórych książkach (zwykle kolektor jest na dole). Jednak doświadczenia dowodzą, że tranzystor obrócony do góry nogami, np. w Walkmanie, działa.

²Chodzi tu o obszar "aktywnej bazy" - leżący bezpośrednio między emiterskim a kolektorskim.

chowować jak tranzystor.

Jak więc to wszystko działa? Spójrzmy na złącze baza-emiter (B-E). Choć rozmieszczenie kontaktów jest inne, niż w diodzie (kontakty nie leżą naprzeciwko siebie), to mimo wszystko jest to złącze PN. Jeśli więc spolaryzujemy złącze B-E to oczywiście złącze zacznie przewodzić i pojawią się nośniki w obszarze bazy. Emiter jest wyraźnie silniej domieszkowany niż baza, więc w transporcie nośników właśnie emiter odgrywa dominującą rolę (pomińmy na razie dużo słabsze wstrzykiwanie odwrotne: z bazy - do emitera). A więc w bazie naszego tranzystora pojawiają się wstrzyknięte przez emiter elektrony. Gdyby nie było kolektora, to oczywiście część elektronów zrekombinowałaby z dziurami obecnymi w obszarze bazy, a pozostałe dotarłyby aż do kontaktu bazy. I mielibyśmy do czynienia z taką jakąś koślawą diodą (z dziwnie rozmieszczonymi kontaktami). Jednak kolektor istnieje i leży akurat na drodze ruchu znacznej większości wstrzykiwanych z emitera elektronów. Elektrony wprowadzone z emitera właściwie siłą rozpędu ("rozpęd" to niezbyt trafne określenie, ale na razie pozostanmy przy takim) trafiają do obszaru kolektora. Jeśli do kolektora doprowadziliśmy napięcie dodatnie (powinno być dodatnie, jeśli tranzystor ma działać aktywnie), to elektron (ładunek ujemny), który już tafi do kolektora jest po prostu "odsysany". Niektóre elektrony mogą oczywiście na swojej drodze trafić na dziurę i zrekombinować³. Jednak dziur jest w obszarze bazy dość mało (dlaczego mało - o tym później). Dlatego rzadko który elektron na krótkiej drodze od emitera do kolektora rekombinuje z dziurą. Jeśli np. jeden elektron na 100 wprowadzonych z emitera do kolektora zrekombinował, to prąd emitera jest 100 razy większy od prądu bazy. A prąd kolektora - prawie 100 (dokładnie 99) razy większy od prądu bazy. Stosunek prądu kolektora do prądu bazy to β (czyli beta; $\beta = I_C/I_B$) - według niektórych starych górali najważniejszy parametr tranzystora bipolarnego. Jak widać - ten ważny parametr tranzystora to po prostu rodzaj miary. Konkretnie jest to **miara prawdopodobieństwa rekombinacji**. Czym mniejsze prawdopodobieństwo rekombinacji - tym większa β i tym lepszy tranzystor (lepszy - pod względem bety).

Reasumując: zmieniając napięcie na złączu B-E zmieniamy prąd kolektora. Właściwie tak samo jest w diodzie: zwiększając napięcie na złączu zwiększamy (i to wyraźnie - wykładniczo) prąd diody. A w tranzystorze prawie tak samo - tak jakby tranzystor był taką dziwną diodą, w której napięcie przykłada się do elektrod B-E, ale prawie cały prąd wywołany przyłożeniem tego napięcia nie płynie przez kontakt bazy, tylko przez kolektor (od⁴ kolektora do emitera). Prąd bazy natomiast, w przeciwieństwie do prądu kolektora, jest mały - można powiedzieć - "resztkowy" (w niektórych zastosowaniach pomijalny, tj. przyjmuje się, że praktycznie prądu bazy nie ma). "resztkowy" - bo prąd bazy wywołuje resztkę elektronów z emitera, które "miały pecha" i zrekombinowały po drodze do kolektora.

I takie właśnie, z grubsza rzecz biorąc, ma właściwości tranzystor bipolarny, wtedy gdy chcemy zrobić z niego wzmacniacz.

Dla porządku należy teraz wyjaśnić kilka kwestii.

³Oczywiście na miejsce zrekombinowanej dziury wchodzi nowa dziura z kontaktu bazy. I taki jest mechanizm powstawania prądu bazy - jest to wprowadzanie z kontaktu bazy nowych dziur na miejsce tych, które zrekombinowały z elektronami.

⁴Przypominam: kierunek przepływu prądu jest zgodnie z ustaloną konwencją przeciwny do ruchu elektronów. W tranzystorze NPN prąd płynie od kolektora do emitera, a elektrony, jak już ustaliliśmy - od emitera do kolektora.

Skąd się biorą dziury w bazie i dlaczego jest ich dość mało? Mechanizm pojawiania się dziur w bazie jest dość prosty. Emiter wstrzykuje do bazy elektrony. Ale nie można, ot tak sobie, wstrzyknąć gdzieś tam elektrony i nic. Trzeba pamiętać o zasadzie zachowania ładunku. Do zrównoważenia ujemnego ładunku wstrzykniętych elektronów potrzebne są jakieś inne ładunki. Oczywiście tylko dziury mogą zrównoważyć ładunek elektronów, bo tylko one są ruchome i mają ładunek dodatni. Wpływają więc w obszar bazy z kontaktu bazy. Gdyby elektrony po wprowadzeniu z emitera stały w miejscu i czekały spokojnie, to do obszaru bazy wpłynęłoby tyle samo dziur ile było wstrzykniętych z emitera elektronów. A następnie po jakimś czasie elektrony zostałyby zubożone przez dziury w procesie rekombinacji, tzn. każdy elektron "wpadłby" w dziurę i nie byłoby już żadnych nośników. Jednak - uwaga - takie całkowite zubożenie mogłoby zajść dopiero po dostatecznie długim czasie, bo ładunki (elektrony i dziury) poruszają się w półprzewodniku ze stosunkowo małymi prędkościami. A ponieważ elektrony jednak nie stoją w miejscu i przemieszczają się w kierunku kolektora, to przeciętny elektron przebywa w obszarze bazy dość krótko. I właśnie dlatego, że typowy elektron krótko gości w bazie, to wychodzi na to, że:

- a) prawdopodobieństwo rekombinacji w tym krótkim czasie jest małe,
- b) wpływ elektronu na "ujemność" ładunku bazy jest tylko częścią tego wpływu, który miałby nasz elektron, gdyby coś go w bazie zatrzymało.

Na czym polega siła "rozpędu" elektronów wprowadzanych przez emiter do bazy. Tak naprawdę nie ma żadnego rozpędu. Działają tu natomiast dwa zjawiska:

a) **Dyfuzja.** Dyfuzja to dość znane zjawisko fizyczne występujące często w gazach i cieczach. Jeśli np. wprowadzimy kroplę barwnika (np. atramentu) do naczynia z wodą, to choćbyśmy się nie wiem jak starali, barwnik i tak rozejdzie się po całym naczyniu. Tak samo z elektronami, które znajdują się w obszarze bazy - rozłóżą się we wszystkich kierunkach. A jak już wiele razy powiedziano, "większość kierunków" zajmuje złącze kolektora.

b) Tzw. **pole wbudowane**, występujące w znacznej większości tranzystorów bipolarnych. Nie wnikając w technologię można powiedzieć, że najczęściej warstwę bazy robi się tak, iż na elektrony oddziałuje wytworzone w przestrzeni bazy pole elektryczne, które kieruje elektrony w stronę kolektora. Uzyskuje się ten efekt stosując nierównomierne domieszkowanie bazy - więcej domieszki akceptorowych przy emiterze, a mniej przy kolektorze. Jony akceptorowe są ujemne, więc elektrony kierują się tam, gdzie ujemnych ładunków jest mniej.

Dlaczego rys. 1.1 typu "trzy klocki" utrudnia zrozumienie działania tranzystora. Specjaliści od technologii półprzewodnikowej często używają tego rysunku. Oczywiście w dobrej wierze. Ten rysunek przedstawia nie całą budowę tranzystora, a konkretnie wycinek przekroju. Na takim rysunku można np. pokazać ruch wszystkich nośników, co jest potrzebne przy głębszym wniknięciu w subtelności działania tranzystora. Tymczasem nieświadomi albo po prostu nieuważni czytelnicy interpretują ten rysunek wprost, tak jakby to była rzeczywista budowa tranzystora. Oczywiście tak nie jest. Mam nadzieję, że czytelnicy już rozumieją na czym polega problem. Gdyby to była rzeczywista struktura półprzewodnikowa "trzyklockowa", to wiele elektronów wstrzykiwanych z emitera docierałoby do kontaktu bazy, który w tym przypadku jest bezpośrednio "na widoku". Elektrony mają tu również dużą szansę na rekombinację. A to oznaczałoby, że mamy absurdalny tranzystor

o wzmacnieniu β mniejszym od jedności⁵ (bo większość elektronów kierowałaby się do bazy, albo rekombinowała, a tylko resztką - do kolektora).

Prąd kolektora zależy głównie od napięcia na złączu B-E, a bardzo mało zależy od czegokolwiek więcej. Między innymi, prąd kolektora bardzo mało zależy od napięcia między bazą a kolektorem, o ile napięcie na kolektorze w ogóle jest jakieś. Dlatego absurdalne są odruchy początkujących elektroników, którzy próbują ustalić prąd kolektora za pomocą zmiany napięcia kolektor-baza, czy też kolektor-emiter.

Tranzystor jest elementem unilateralnym. To mądre słowo "unilateralny" oznacza po prostu, że istnieje (i jest łatwo zauważalne) oddziaływanie wejścia na wyjście, natomiast nie ma oddziaływania w drugą stronę - wyjścia na wejście (w ogóle takie oddziaływanie istnieje, ale jest szczątkowe). W omówionym wcześniej sposobie sterowania tranzystorem "wejściem" (dokładniej zmienną wejściową) jest napięcie na złączu B-E, a "wyjściem" (zmienną wyjściową) prąd kolektora. Unilateralność to ważna i w znacznej większości zastosowań bardzo pożyteczna cecha.

Sam tranzystor nie jest wzmacniaczem. Nie należy zapominać, że sam tranzystor jako taki nie jest ani wzmacniaczem, ani kluczem ani w ogóle niczym, a tylko tranzystorem. Wzmacniaczem czy czymś tam innym staje się tranzystor dopiero w odpowiednim układzie. Porównując tranzystor do, powiedzmy, komputera możemy powiedzieć, że "goły" tranzystor to jak komputer bez oprogramowania. Do tranzystora trzeba dodać, i to z sensem, jakieś oporniki, kondensatory, zasilanie itp, żeby powstał wzmacniacz, bufor, ogranicznik czy inny układ (a czasami, ha, ha, powstaje twór realizujący inną funkcję, niż chcieliśmy). Dlatego apeluję: patrzcie na tranzystor jak na element o określonych właściwościach (może i w pierwszym zetknięciu dziwacznych), ale nie jak na np. wzmacniacz. A wzmacniacz da się zbudować, jeśli tylko rozumie się właściwości najważniejszej części składowej wzmacniacza, czyli właściwości tranzystora.

I na koniec w skrócie niektóre występujące w tranzystorze efekty i właściwości drugiego i trzeciego rzędu

Efekt Early'ego (modulacja szerokości bazy). Jest to efekt polegający na tym, że kiedy zwiększa się napięcie na złączu B-C (a więc również napięcie U_{CE}), to zgodnie z prawami fizyki półprzewodników zwiększa się szerokość tego złącza. A to oznacza, że baza staje się cieńsza, bo "włazi" w nią złącze kolektora. A więc maleje prawdopodobieństwo rekombinacji - czyli rośnie β . To oznacza też, że prąd kolektora nieznacznie rośnie przy wzroście napięcia U_{CE} przy utrzymywaniu stałego prądu bazy.

Przebiecia. Oba złącza przebijają się przy określonych napięciach. Wielu początkujących zapomina, albo wręcz nie wie, że złącze E-B przebija się dla napięć wyraźnie mniejszych od tych, przy których

⁵Uwaga. Nie zawsze β jest parametrem decydującym o przydatności tranzystora. W układzie odchylenia prawie każdego telewizora pracuje tranzystor o współczynniku β bliskim jedności. Jego β jest bardzo mała, ale za to tranzystor jest w stanie skutecznie przełączać bardzo duże napięcia.

przebija się złącze B-C. Istnieje też możliwość przebicia C-E przy niepodłączonej bazie. Z pewnych powodów prawie zawsze jest tak, że $U_{CEMAX} \leq U_{BCMAX}$. Tranzystor cechują więc co najmniej trzy napięcia przebicia (są jeszcze inne!). Warto zaznaczyć, że przeważnie nie podaje się w katalogach ani napięcia przebicia B-C, ani E-B, a tylko napięcie przebicia kolektor-emiter przy rozwartej bazie (U_{CEMAX}). Przykładowe napięcia przebicia popularnego tranzystora BC107: $U_{CBMAX} = 50V$, $U_{CEMAX} = 45V$, $U_{EBmax} = 7V$. Oczywiście nie należy doprowadzać do przebić złączy, chyba, że panuje się nad tym procesem (przebiecie tranzystora w określonych warunkach nie musi być niszczące!)

Efekt Kirka (efekt quasinasylenia). Niektóre tranzystory wykazują ten efekt bardzo wyraźnie, inne - prawie wcale. Efekt Kirka polega na tym, że wewnątrz rzeczywistej struktury półprzewodnika, z którego zrobiono tranzystor, powstaje tak jakby opornik włączony w szereg z kolektorem, którego oczywiście (tego opornika znaczy), nikt nie chciał. Dlatego właściwie tranzystor może być wewnętrznie nasycony, chociaż pomiar napięcia na zaciskach zewnętrznych tego nie wykazuje. Jednak fakt nasylenia wewnętrznego wyraźnie zakłóca normalną pracę tranzystora (spowolnienie, niemożliwość osiągnięcia oczekiwanego małego napięcia nasylenia U_{CESAT}). Efekt ten występuje dla dość dużych prądów kolektora (dla niektórych tranzystorów "duży prąd" to 20mA !) i małych napięć U_{CE} (rzędu 1V).

Wpływ temperatury. Ważne są dwa podstawowe parametry, które zależą od temperatury: U_{BE} i β . U_{BE} maleje z temperaturą o ok. 2.3mV/°C, a β rośnie z temperaturą zgodnie z zależnością:

$$\beta(T) = \beta_0(T/T_0)^m,$$

gdzie β_0 - β w temp. T_0 ,

T_0 - temp. odniesienia, typowo 25°C,

m - współczynnik potęgowy, typowo $m \approx 1.5$.

Niektóre źródła podają inne wartości współczynnika m (2÷6), albo zależność w postaci zwiększania β o ok. 5% na każde 10°C.

Główna przyczyna powstawania prądu bazy

W starszych technologicznie typach tranzystorów (ale również w niektórych obecnie stosowanych) prąd bazy bierze się, tak jak opisano wyżej, z rekombinacji elektron (z emitera) - dziura (z bazy). W nowszych typach (obecnie znaczna większość) - w których baza jest naprawdę bardzo cienka - rekombinacja zachodzi bardzo rzadko - np. raz na 10000. Główną przyczyną prądu bazy jest wstrzykiwanie odwrotne: z bazy do emitera. Parametr β zatem odzwierciedla w tych tranzystorach głównie stosunek skuteczności wstrzykiwania emiter - baza do wstrzykiwania baza - emiter.