



Ćw. V. Tranzystor bipolarny i fototranzystor

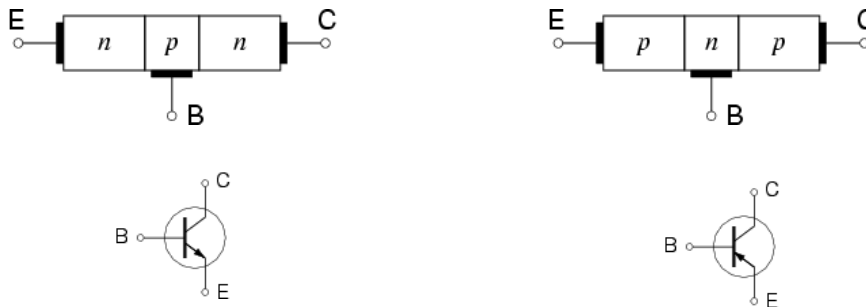
1. Wstęp

Nazwa tranzystor pochodzi z języka angielskiego: *transistor* - “*transferring an electrical signal across a resistor.*” (transfer sygnału elektrycznego przez rezystancję). Tranzystor bipolarny (BJT) jest zaworem, który jest sterowany prądowo: prąd bazy (I_B) steruje prądem kolektora (I_C). W tranzystorze tym w transporcie biorą udział elektrony i dziury. Jest to tranzystor, który zbudowany jest z trzech warstw półprzewodników o różnym rodzaju przewodnictwa, tworzących dwa złącza **p-n**; sposób polaryzacji złączy determinuje **stan prac** tranzystora.

Tranzystor posiada trzy końcówki przyłączone do warstw półprzewodnika, nazywane:

- **emiter** (ozn. E),
- **baza** (ozn. B),
- **kolektor** (ozn. C).

Ze względu na kolejność warstw półprzewodnika rozróżnia się dwa typy tranzystorów: **pnp** oraz **nnp**; w tranzystorach *nnp* nośnikiem prądu są elektrony, w tranzystorach *pnp* dziury. Na rys. 1 przedstawiono schematycznie budowę oraz oznaczenia tranzystorów.



Rys. 1. Tranzystory npn i pnp

a) Stany pracy

Rozróżnia się cztery **stany pracy** tranzystora bipolarnego:

- **stan zatkania (odcięcia)**: złącza BE i CB spolaryzowane są w kierunku zaporowym,
- **stan nasycenia**: złącza BE i CB spolaryzowane są w kierunku przewodzenia,
- **stan aktywny**: złącze BE spolaryzowane w kierunku przewodzenia, zaś złącze CB zaporowo,
- **stan aktywny inwersyjny** (krócej: inwersyjny): BE zaporowo, CB w kierunku przewodzenia (odwrotnie niż stanie aktywnym).

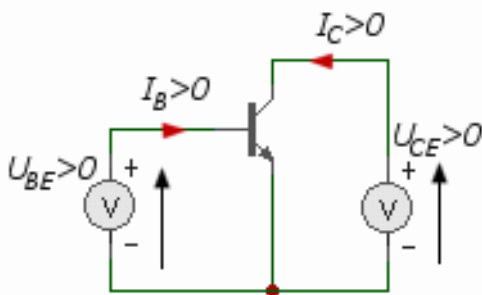
Stan aktywny tranzystora jest podstawowym stanem pracy wykorzystywanym we wzmacniaczach; w tym zakresie pracy tranzystor charakteryzuje się dużym wzmocnieniem prądowym (kilkadziesiąt-kilkuset). Stany nasycenia i zaporowy stosowane są w technice impulsowej, jak również w układach cyfrowych. Stan aktywny inwersyjny nie jest powszechnie stosowanych, ponieważ ze względów konstrukcyjnych tranzystor charakteryzuje się wówczas gorszymi parametrami niż w stanie aktywnym (normalnym), m.in. mniejszym wzmocnieniem



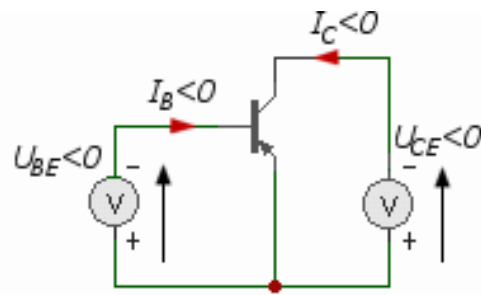
Urządzenia Półprzewodnikowe 2

prądowym. Można powiedzieć, że w tranzystorze złącze baza-emiter i kolektor-baza zachowują się jak diody. Aby tranzystor znajdował się w stanie normalnej pracy to muszą być spełnione następujące warunki:

- dla tranzystora npn potencjał kolektora musi być wyższy od potencjału emitera,
- dla tranzystora pnp potencjał kolektora musi być niższy od potencjału emitera,
- „dioda” baza-emiter musi być spolaryzowana w kierunku przewodzenia, a „dioda” kolektor-baza w kierunku zaporowym (rys.2)
- nie mogą zostać przekroczone maksymalne wartości I_C , I_B , U_{CE} , moc wydzielana na kolektorze $I_C \cdot U_{CE}$, temperatura pracy czy też napięcie U_{BE} .



Rys.2.a Polaryzacja tranzystora npn



Rys.2.b Polaryzacja tranzystora pnp

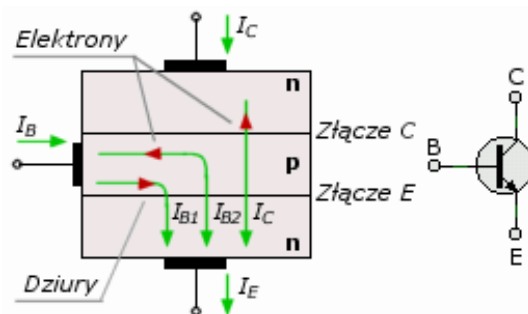
Jeżeli tranzystor jest w stanie normalnej pracy czyli spełnia powyższe warunki to z dobrym przybliżeniem prawdziwa jest zależność:

$$I_C = \beta I_B \quad (1)$$

gdzie β jest współczynnikiem wzmocnienia prądowego. Współczynnik ten może przyjmować wartości od 50 do 300 A/A dla tego samego typu tranzystora, a więc nie jest parametrem na którym można opierać parametry projektowanego układu.

b) Rozpływ prądu w tranzystorze npn.

Ponieważ złącze baza-emiter jest spolaryzowane w kierunku przewodzenia to istnieje przepływ dziur z obszaru p do obszaru n oraz przepływ elektronów z obszaru n do obszaru p. Elektrony wprowadzane z emitera do bazy stają się tam nośnikami mniejszościowymi i drogą dyfuzji oddalają się od złącza emiterowego. Część tych elektronów łączy się z dziurami, których w bazie jest bardzo dużo (obszar p). Wszystkie elektrony, które dotrą w pobliże złącza kolektor-baza są unoszone do obszaru kolektora. Dla niedużej szerokości obszaru p (bazy) praktycznie wszystkie elektrony wstrzykiwane przez emiter do bazy dotrą do kolektora. Bardzo ważnym jest aby strata elektronów w bazie była jak najmniejsza. Miarą tego na ile prąd kolektora odpowiada prądowi emitera jest współczynnik α nazywany współczynnikiem wzmocnienia prądowego, przy dużych sygnałach definiowany jako:



Rys.3. Rozpływ prądu w tranzystorze npn



Urządzenia Półprzewodnikowe 2

$$\alpha = \frac{I_C - I_{C_0}}{I_E} \quad (2)$$

gdzie I_{C_0} jest prądem złącza kolektorowego spolaryzowanego zaporowo przy $I_B = 0$. W tranzystorach krzemowych wartość prądu I_{C_0} (zależąca od temperatury) jest rzędu 0,001pA do 0,01pA i można go zaniedbać. Dla większości tranzystorów wartość α zawiera się w granicach od 0,95 do 0,99. Prąd bazy I_B składa się z prądu dziurowego płynącego od bazy do emitera i z prądu wynikającego z rekombinacji dziur w obszarze bazy. Tranzystory wykonywane są tak aby oba te prądy były jak najmniejsze. Osiągnięte jest to w ten sposób, że obszar n emitera jest bardzo silnie domieszkowany i prąd elektronowy złącza baza-emiter jest zdecydowanie większy od prądu dziurowego. W celu zmniejszenia drugiego składnika prądu bazy czyli prądu wywołanego rekombinacją, zmniejsza się obszar bazy. W efekcie prąd bazy I_B ma wartość bardzo małą w porównaniu z prądem kolektora I_C . W rezultacie można powiedzieć, że mały prąd wejściowy bazy I_B steruje znacznie większym prądem wyjściowym kolektora I_C , a więc następuje efekt wzmacnienia.

$$I_C + I_B = I_E \quad (3)$$

Po uwzględnieniu wzoru (2):

$$I_C = \frac{I_{C_0}}{1-\alpha} + \frac{\alpha I_B}{1-\alpha} \quad (4)$$

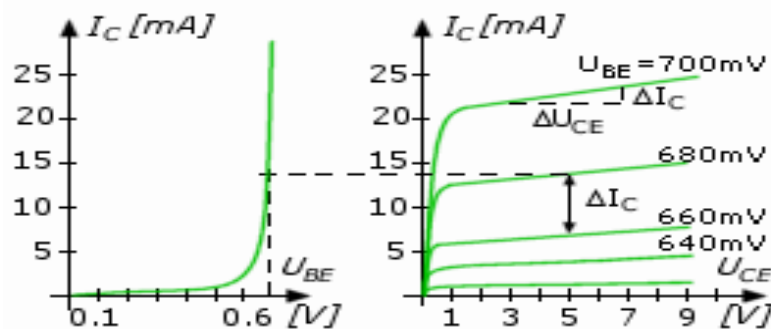
Niech $\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$, wówczas prąd kolektora wyraża się wzorem:

$$I_C = (1 + \beta)I_{C_0} + \beta I_B \quad (5)$$

Ponieważ $I_{C_0} \ll I_B$ to $I_C = \beta I_B$ (6)

c) Charakterystyki tranzystora

Na rys. 4 przedstawiono przykładowe charakterystyki: przejściową $I_C = f(U_{BE})$ oraz wyjściową $I_C = f(U_{CE})$ tranzystora.



Rys. 4 Charakterystyki prądowo-napięciowe tranzystora.



Urządzenia Półprzewodnikowe 2

Charakterystyka przejściowa tranzystora to zależność prądu kolektora I_C od napięcia baza-emiter U_{BE} . Charakterystyka ta ma charakter wykładniczy:

$$I_C = I_{Co}(T, U_{CE}) \exp\left(\frac{U_{BE}}{U_T}\right) \quad (7)$$

Charakterystyka wyjściowa to zależność prądu kolektora I_C od napięcia kolektor-emiter U_{CE} przy doprowadzonym napięciu wejściowym baza-emiter U_{BE} . Z charakterystyki tej wynika, że:

- powyżej pewnego napięcia prąd kolektora prawie nie zależy od napięcia U_{CE} ,
- do wywołania dużej zmiany prądu kolektora I_C wystarczy mała zmiana napięcia baza-emiter U_{BE} .

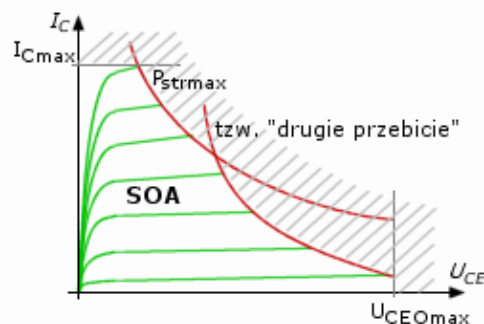
Punkt, w którym następuje zagięcie charakterystyki wyjściowej nazywany jest napięciem nasycenia kolektor-emiter U_{CEsat} .

d) Parametry graniczne tranzystora

Tranzystory, tak zresztą jak inne elementy elektroniczne, mają charakterystyczne dla siebie parametry graniczne, tzn. takie których przekroczenie grozi uszkodzeniem tranzystora. Do takich parametrów należą:

- U_{EB0max} - dopuszczalne napięcie wsteczne baza-emiter
- U_{CB0max} - dopuszczalne napięcie wsteczne kolektor-baza
- U_{CE0max} - maksymalne dopuszczalne napięcie kolektor-emiter
- I_{Cmax} - maksymalny prąd kolektora
- I_{Bmax} - maksymalny prąd bazy
- P_{strmax} - maksymalna dopuszczalna moc strat

Na rys. 5 zaznaczono niektóre z tych wielkości.



Rys. 5. Charakterystyka wyjściowa tranzystora

e) Tranzystor jako czwórnik

Najprostszą, lecz bardzo czasochłonną metodą wyznaczania rodziny charakterystyk statycznych tranzystorów bipolarnych jest metoda "punkt po punkcie". Pomiar powinien być wykonany możliwie szybko i przy wartościach prądów i napięć znacznie niższych od dopuszczalnych (problemy z nagrzewaniem się tranzystora). Zaletą metody jest stosunkowo duża dokładność. Jeżeli tranzystor potraktujemy, jako czwórnik (rys.2), to możemy zdefiniować cztery rodziny charakterystyk statycznych:



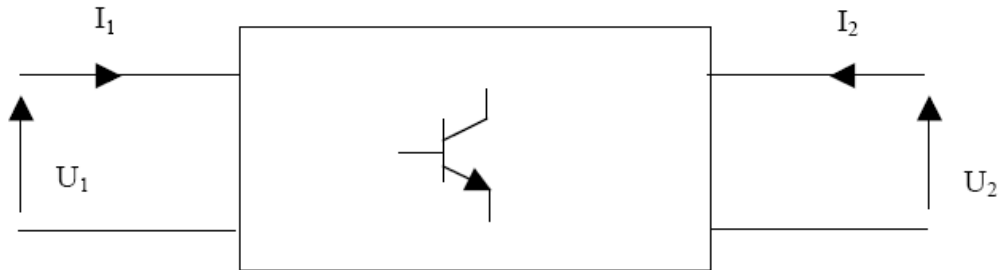
Urządzenia Półprzewodnikowe 2

charakterystyki wejściowe: $I_1 = f(U_1)|_{U_2=const}$

charakterystyki wyjściowe: $I_2 = f(U_2)|_{I_1=const}$

charakterystyki przejściowe: $I_2 = f(I_1)|_{U_2=const}$

charakterystyki zwrotne: $U_1 = f(U_2)|_{I_1=const}$



Rys.6. Tranzystor jako czwórnik

Do opisu tranzystora pracującego w zakresie małych częstotliwości najczęściej stosuje się parametry czwórnik typu [h]. Wówczas układ równań dla sygnałów zmiennych, opisujących zależności WE-WY wygląda następująco:

$$u_1 = h_{11}i_1 + h_{12}u_2$$

$$i_2 = h_{21}i_1 + h_{22}u_2$$

Parametry małosygnałowe tranzystora mogą być wyznaczone z charakterystyk statycznych:

$$h_{11} = \frac{\Delta U_1}{\Delta I_1} \quad U_2 = const - \text{rezystancja wejściowa}$$

$$h_{12} = \frac{\Delta U_1}{\Delta U_2} \quad I_1 = const - \text{współczynnik napięciowego oddziaływania wstecznego}$$

$$h_{21} = \frac{\Delta I_2}{\Delta I_1} \quad U_2 = const - \text{zwarciovyy współczynnik wzmocnienia prądowego}$$

$$h_{22} = \frac{\Delta I_2}{\Delta U_2} \quad I_1 = const - \text{konduktancja wyjściowa}$$

W zależności od sposobu włączenia tranzystora (wspólny emiter, wspólna baza, wspólny kolektor) otrzymujemy różne rodziny charakterystyk statycznych. Przykładowo, dla tranzystora bipolarnego npn w układzie wspólnego emitera, przytoczone wyżej zależności (1) przyjmują postać:

$$\text{charakterystyki wejściowe: } I_B = f(U_{BE})|_{U_{CE}=const}$$

$$\text{charakterystyki wyjściowe: } I_C = f(U_{CE})|_{I_B=const}$$

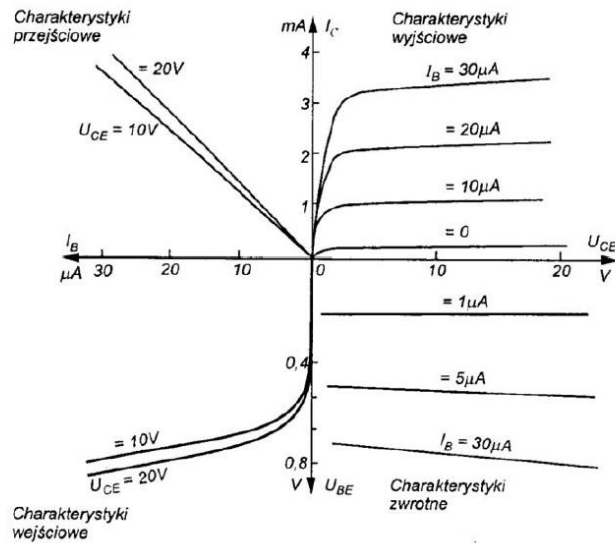
$$\text{charakterystyki przejściowe: } I_C = f(I_B)|_{U_{CE}=const}$$

$$\text{charakterystyki zwrotne: } U_{BE} = f(U_{CE})|_{I_B=const}$$



Urządzenia Półprzewodnikowe 2

Na rys. 7 przedstawiono charakterystyki statyczne tranzystora w układzie OE.



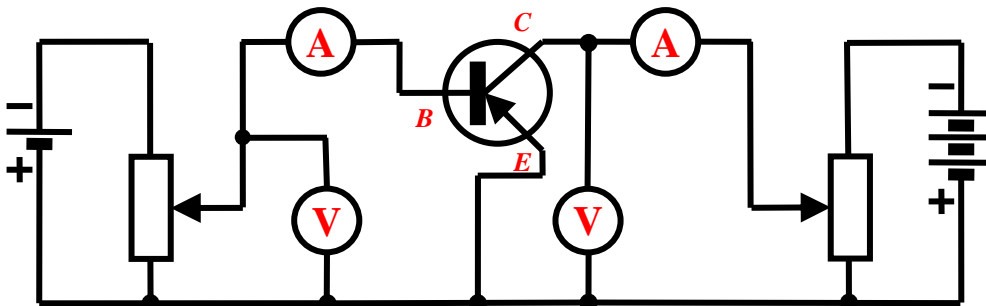
Rys.7. Charakterystyki statyczne tranzystora w układzie OE

2.Przebieg ćwiczenia

Przed przystąpieniem do pomiarów należy określić na podstawie danych katalogowych (katalog dostępny jest na pracowni 211A oraz jako plik pdf na stronie internetowej wraz z materiałami do laboratorium; tranzystor pnp 2SA970-BL), jaki zakres prądów i napięć można stosować podczas pomiarów, aby nie przekroczyć mocy admysyjnej P_{cmax} . W tym celu należy odczytać z katalogu dopuszczalne wartości h_{21} , I_{Bmax} , I_{Cmax} oraz P_{cmax}

Należy zmierzyć charakterystyki prądowo-napięciowe wyjściowe, przejściowe i wejściowe tranzystora w układzie OE.

- Połączyć układ według schematu przedstawionego na rys. 3. Do pomiaru prądu użyć miernika BM857a zaś do pomiaru napięcia miernika BM811.
- Zmierzyć zależność $I_B = f(U_{BE})|_{U_{CE}=const}$ oraz $I_C = f(U_{BE})|_{U_{CE}=const}$ dla czterech różnych wartości U_{CE} (np. -2V, -4V, -6V, -8V).
- Zmierzyć 4 charakterystyki wyjściowe $I_C = f(U_{CE})|_{I_B=const}$ dla czterech różnych wartości prądu bazy (np. 2 μ A, 4 μ A, 6 μ A i 8 μ A).



Rys. 7. Schemat układu do pomiarów charakterystyk statycznych tranzystora bipolarnego



Urządzenia Półprzewodnikowe 2

3. Opracowanie wyników

- Na podstawie otrzymanych wyników wykreślić rodziny charakterystyk statycznych tranzystora.
- Wybrać punkt pracy (U_{CEQ} , I_{CQ}) na charakterystyce wyjściowej tranzystora w zakresie średnich wartości napięć i prądów. Następnie zaznaczyć na charakterystyce przejściowej punkt (I_{BQ} , I_{CQ}) i na charakterystyce wejściowej punkt (I_{BQ} , U_{BEQ}).
- Wyznaczyć parametry małosygnałowe na podstawie wykreślonych charakterystyk statycznych w obranym punkcie pracy. W tym celu na poszczególnych charakterystykach w pobliżu punktu pracy wyznaczyć przyrosty odpowiednich prądów i napięć i obliczyć parametry małosygnałowe korzystając ze wzorów:

$$h_{11} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} \quad U_{CE} = const$$

$$h_{21} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \quad U_{CE} = const$$

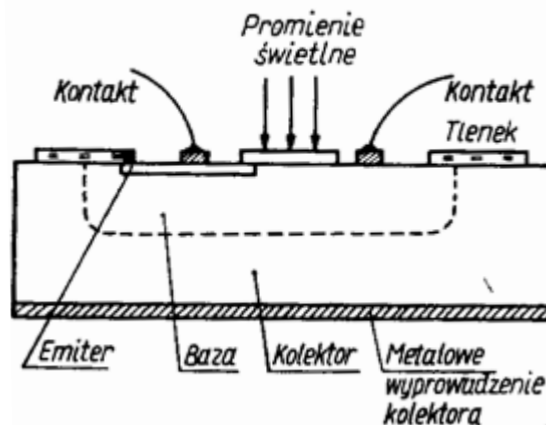
$$h_{22} = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{CE}} \quad I_B = const$$

- Obliczyć niepewności pomiarowe prądów, napięć i parametrów małosygnałowych. Zaznaczyć niepewności na rodzinach charakterystyk dla trzech (małych, średnich i dużych) różnych wartości prądów i napięć.

II. Fototranzystor

1. Wstęp

Konstrukcja fototranzystora jest zbliżona do konstrukcji zwykłego tranzystora wzmacniającego z tą różnicą, że obudowa umożliwia oświetlenie obszaru jego bazy (rys. 6). W większości fototranzystorów nie stosuje się wyprowadzenia bazy na zewnątrz.



Rys. 6. Budowa fototranzystora.

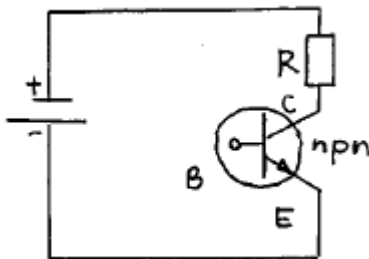
Urządzenie to najczęściej pracuje w układzie wspólnego emitera. Tranzystor n-p-n w układzie o wspólnym emiterze, pracuje w ten sposób, że złącze emiter-baza jest spolaryzowane w kierunku przewodzenia a baza-kolektor w kierunku zaporowym. Przez złącze



Urządzenia Półprzewodnikowe 2

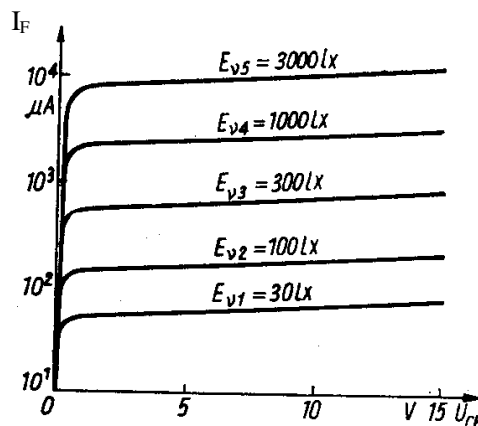
p-n spolaryzowane w kierunku przewodzenia (baza-emiter) płynie duży prąd nośników większościowych, elektronów z n do p i dziur z p do n. Prąd elektronowy w obszarze bazy (p) jest prądem nośników mniejszościowych, który z kolei jest dominującym prądem gdy złącze jest spolaryzowane w kierunku zaporowym. Pole elektryczne wzmacnia ten prąd. W ten sposób w tranzystorze uzyskuje się duże wzmocnienie prądowe: prąd kolektora jest zwykle dwa rzędy większy od prądu bazy.

W fototranzystorze baza nie jest nigdzie połączona elektrycznie, czyli złącze baza-emiter jest rozwarte. Fotony generują w tej sytuacji fotonapięcie, które jest równoważne spolaryzowaniu złącza emiter-baza w kierunku przewodzenia. Dalej fototranzystor działa jak zwykły tranzystor. Dodatkowo dziury generowane w obszarze p (bazy) i te wciągane z obszaru kolektora zmniejszają napięcie na złączu baza-emiter, zwiększając prąd nośników większościowych. Zmiany w obszarze bazy spowodowane oświetleniem obserwuje się w obwodzie kolektora, zwykle mierząc spadek napięcia na oporniku połączonym z kolektorem. Na rys.7 przedstawiono schemat układu do wyznaczania charakterystyk prądowo-napięciowych i oświetleniowych fototranzystora. Dla fototranzystora n-p-n kolektor podłącza się do wyjścia „+” zasilacza a emiter do wyjścia „-”.



Rys. 8. Schemat układu polaryzującego fototranzystor n-p-n.

Fototranzystory charakteryzują się dużą czułością (wielokrotnie większą od czułości diody) i wzmocnieniem (rzędu 100÷1000), natomiast ich wadą jest niezbyt duża szybkość działania, częstotliwość graniczna wynosi około 200kHz. Ponadto zależność sygnału elektrycznego od mocy promieniowania optycznego padającego na złącze jest nieliniowa (zależność prądu kolektora od natężenia oświetlenia jest podobna jak w przypadku tranzystora konwencjonalnego od napięcia bazy). Fotodiody w tym przypadku odznaczają się bardzo dużym zakresem liniowości sygnału oraz bardzo dużą szybkością działania. Na rysunku 8 przedstawiono przykładową zależność fotoprądu (prądu kolektora) w funkcji napięcia kolektor - emiter dla różnych wartości natężenia oświetlenia. Jak widać charakterystyka ta jest podobna do zależności prądu kolektora w funkcji napięcia kolektor-emiter zwykłego tranzystora.



Rys.9. Charakterystyki statyczne fototranzystora, $I_F = f(U_{CE})$ dla różnych wartości natężenia oświetlenia.



Urządzenia Półprzewodnikowe 2

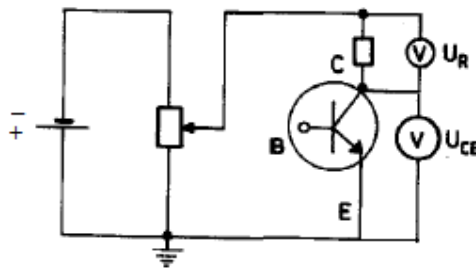
Fototranzystor krzemowy, produkcji polskiej typu BPYP21, o strukturze n-p-n wymaga napięcia zasilającego (napięcia U_{CE}) równego 5 V. Prąd ciemny fototranzystora jest równy $0,1\mu\text{A}$, a prąd fotoelektryczny przy oświetleniu $E_v = 1000 \text{ lx}$ wynosi 2 mA. Graniczna częstotliwość pracy wynosi 90 kHz.

2. Część praktyczna

Cel ćwiczenia: Wyznaczenie charakterystyki statycznej I-V oraz charakterystyki spektralnej fototranzystora.

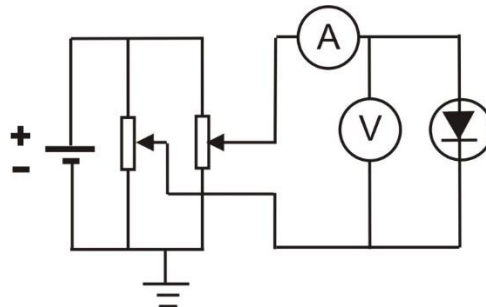
Przebieg ćwiczenia:

- Podłączyć fototranzystor do układu polaryzującego w przystawce pomiarowej, zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 10 tak, aby „+” zasilacza został podłączony do kolektora a „-” do emitera. Odpowiada to połączeniu „-” zasilacza do „gorącego” wejścia gniazda w przystawce pomiarowej.



Rys.10. Układ polaryzujący fototranzystor n-p-n. Dla tranzystora p-n-p źródło należy połączyć odwrotnie.

- Oświetlić fototranzystor diodą elektroluminescencyjną (LED). W tym celu należy diodę elektroluminescencyjną ustawić vis a vis fototranzystora i spolaryzować ją w kierunku przewodzenia, korzystając z układu przedstawionego na rys. 11. Ustawić pokrętko potencjometru tak, aby przez LED płynął maksymalny prąd.



Rys.11. Układ polaryzujący LED.

- Zmierzyć zależność fotosygnалу z fototranzystora, tj. napięcia $U_R = I_F R$ w funkcji napięcia kolektor – emiter, od 0.1V do 1V co 0.02V do 0.3V i dalej, co 0.1V do 1.5V.



Urządzenia Półprzewodnikowe 2

- Powtórzyć te pomiary dla dwóch innych wartości napięcia zasilającego LED.

3. Opracowanie wyników

Pomiar charakterystyk statycznych fototranzystora

- Narysować wykres zależności sygnału fototranzystora U_R w funkcji napięcia kolektor – emiter U_{CE} dla 3 różnych prądów płynących przez LED. Zaznaczyć niepewność pomiaru napięć U_R i U_{CE} korzystając ze wzoru $u(U) = \frac{\text{dokładność pomiaru napięcia}}{\sqrt{3}}$. Dokładności pomiaru napięcia obliczyć korzystając z odpowiednich formuł dla mierników.
- Porównać z charakterystyką $I_C=f(U_{CE})$ dla zwykłego tranzystora.

Literatura:

- 1) Wykłady 7 i 8 - Źródła i detektory
- 2) <http://www.eleota.pl/datasheet-pdf/60544/CEMI/BPYP21?sid=205252d80b2ea291c79d63630a4d9a55>
- 3) <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/548266/TOSHIBA/2SA970-BL.html>

Pytania kontrolne

1. Efekt fotowoltaiczny.
2. Tranzystor i fototranzystor. Zasada działania.