

A-8. Tranzystor bipolarny – charakterystyki

wersja 04'2022

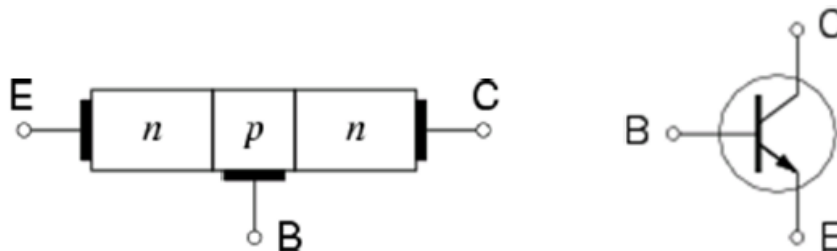
1. Zakres ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest pomiar podstawowych statycznych charakterystyk stałoprądowych dla krzemowego tranzystora bipolarnego typu $n-p-n$, a następnie wyznaczenie małosygnałowych parametrów tranzystora w funkcji punktu pracy na podstawie uzyskanych charakterystyk.

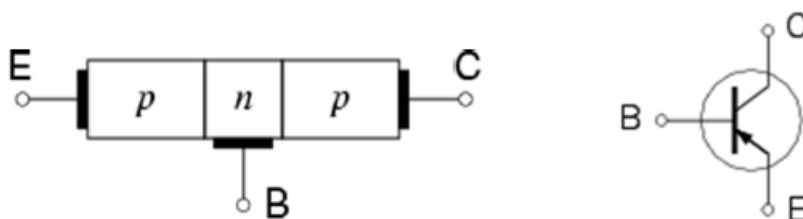
2. Wstęp [1] [2] [3] [4]

Tranzystor bipolarny to trójelektrodowy półprzewodnikowy element elektroniczny posiadający zdolność sterowania sygnału wyjściowego poprzez niezależny sygnał wejściowy. Konstrukcyjnie tranzystor zbudowany jest z trzech warstw półprzewodnika o różnym typie przewodnictwa i wyróżnia się dwa rodzaje (rysunki poniżej):

- typu $n-p-n$,
- typu $p-n-p$.



Rysunek 1. Tranzystor typu $n-p-n$: jego obrazowa konstrukcja i symbol.



Rysunek 2. Tranzystor typu $p-n-p$: jego obrazowa konstrukcja i symbol.

Poszczególne warstwy zależnie od swojej funkcjonalności noszą nazwy:

- emiter (oznaczenie E) – obszar silnego domieszkowania donorowego dla $n-p-n$ lub akceptorowego dla $p-n-p$ dostarczającego swoich większościowych nośników ładunku do obszaru środkowego,
- baza (oznaczenie B) – środkowa warstwa dość cienka o słabym domieszkowaniu własnym, której zadaniem jest kontrolowane transportowanie wstrzykiwanych nośników z obszaru emitera,
- kolektor (oznaczenie C) – warstwa zbiorcza.

Zależności prądowo-napięciowe występujących dwu złączy diodowych są nieliniowe i prezentują sobą rodziny charakterystyk opisane poniżej.

Charakterystyka wejściowa – opisuje zależność I-V złącza baza-emiter, tj. prąd bazy I_B w funkcji napięcia baza-emiter U_{BE} , przy ustalonym napięciu między kolektorem a emiterym U_{CE} (Rysunek 3). Charakterystyka ta opisana jest klasycznym równaniem Shockley'a złącza diodowego p-n:

$$I_B \approx I_S \left(e^{U_{BE}/\eta V_T} - 1 \right) \quad (1)$$

gdzie: I_S – prąd nasycenia złącza, zależny w szczególności od konstrukcji tranzystora i poziomu domieszkowania,

$V_T = \frac{kT}{q_e}$, potencjał termiczny,

k - stała Boltzmann,

T – temperatura złącza,

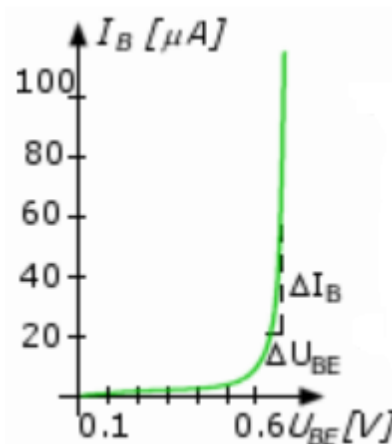
q_e – ładunek elementarny elektronu,

η - parametr idealności złącza przyjmujący wartość z zakresu od 1 do 2.

Prąd nasycenia złącza I_S silnie zależy od temperatury w następujący sposób:

$$I_S \sim T^{3/2} \exp(-E_g/kT) \quad (2)$$

gdzie: E_g – wartość przerwy energetycznej półprzewodnika z którego wykonany jest tranzystor.

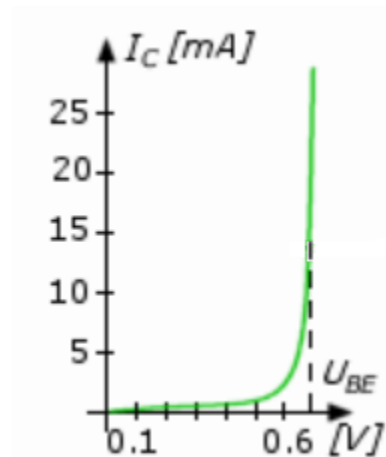


Rysunek 3. Charakterystyka wejściowa tranzystora bipolarnego.

Charakterystyka przejściowa – odpowiada zależności prądu kolektora I_C w funkcji napięcia baza-emiter U_{BE} dla $U_{CE} = \text{const}$ (Rysunek 4):

$$I_C \approx \beta I_S \left(e^{U_{BE}/\eta V_T} - 1 \right) \quad (3)$$

gdzie: β - stały współczynnik.

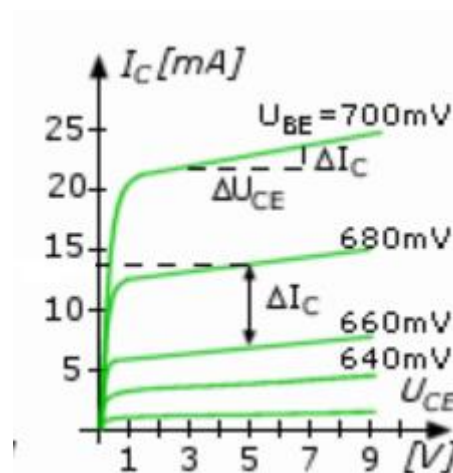


Rysunek 4. Charakterystyka przejściowa tranzystora bipolarnego.

Charakterystyka wyjściowa – reprezentuje zależność prądu kolektora I_C od napięcia panującego na wyprowadzeniach kolektor-emiter U_{CE} przy dostarczonym napięciu złącza baza-emiter U_{BE} i stałym prądzie bazy I_B (Rysunek 5). Charakterystyka ta podzielona jest na obszary pracy, które opisane są niezależnymi formułami matematycznymi prostego modelu Ebersa-Molla [5]. W normalnym zakresie aktywnym zależność od napięcia U_{CE} przyjmuje postać:

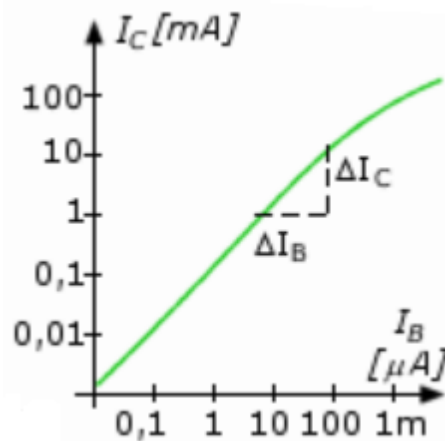
$$I_C \approx \beta I_S \left(e^{U_{BE}/\eta V_T} - 1 \right) \left[1 + \frac{U_{CE}}{U_A} \right] \quad (4)$$

gdzie: U_A – napięcie Early'ego wskazujące dodatkową zależność liniową prądu I_C od napięcia U_{CE} ze współczynnikiem nachylenia $1/U_A$.



Rysunek 5. Charakterystyka wyjściowa tranzystora bipolarnego.

Charakterystyka zwrotna – przedstawia zależność prądu kolektora I_C od prądu bazy I_B przy ustalonym napięciu U_{CE} (Rysunek 6). Zależność ta w części obszaru pracy tranzystora jest liniowa, a współczynnik nachylenia tej zależności przyjmuje nazwę współczynnika wzmocnienia prądowego i jest oznaczane symbolem β lub h_{FE} .



Rysunek 6. Charakterystyka zwrotna tranzystora bipolarnego.

Przykładowe rzeczywiste charakterystyki tranzystora bipolarnego o symbolu BC547 umieszczono w dodatku do tej instrukcji, które zostały zaczerpnięte z noty katalogowej producenta tranzystora.

Z zaprezentowanymi charakterystykami związane są parametry małosygnałowe tranzystora, które reprezentują współczynnik nachylenia stycznej do danej krzywej w określonym punkcie zmiennej niezależnej wykresu. Wyróżniamy następujące parametry małosygnałowe dla tranzystora bipolarnego:

- r_{be} – rezystancja dynamiczna złącza baza-emiter, definiowana jako:

$$r_{be} = \frac{dU_{BE}}{dI_B} \approx \frac{\beta}{g_m} \quad (5)$$

- r_{ce} – rezystancja dynamiczna charakterystyki wyjściowej, definiowana jako:

$$r_{ce} = \frac{dU_{CE}}{dI_C} \approx \frac{I_C}{U_A} \quad (6)$$

- g_m – transkonduktancja, która odzwierciedla nachylenie charakterystyki przejściowej, definiowana jako:

$$g_m = \frac{dI_C}{dU_{BE}} \approx \frac{I_C}{V_T} \quad (7)$$

- β – współczynnik wzmacnienia prądowego:

$$\beta = \frac{dI_C}{dI_B} \quad (8)$$

Wykorzystując przytoczone formuły matematyczne po zróźniczkowaniu zgodnie z powyższymi definicjami uzyskuje się przybliżone wzory na parametry małosygnałowe w zakresie aktywnym – normalnym, które zostały podane powyżej.


3. Program ćwiczenia

Program ćwiczenia i sposób opracowania sprawozdań zgodnie z wytycznymi prowadzącego.

4. Dodatek

Dane katalogowe tranzystora BC547 (*n-p-n*) produkcji Fairchild Semi. [6]:


BC546/547/548/549/550



BC546/547/548/549/550

Switching and Applications

- High Voltage: BC546, $V_{CE0}=85V$
- Low Noise: BC549, BC550
- Complement to BC556 ... BC560



TO-92
1. Collector 2. Base 3. Emitter

NPN Epitaxial Silicon Transistor

Absolute Maximum Ratings $T_a=25^\circ C$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Value	Units
V_{CBO}	Collector-Base Voltage : BC546	80	V
	: BC547/550	50	V
	: BC548/549	30	V
V_{CEO}	Collector-Emitter Voltage : BC546	65	V
	: BC547/550	45	V
	: BC548/549	30	V
V_{EBO}	Emitter-Base Voltage : BC546/547	6	V
	: BC548/549/550	5	V
I_C	Collector Current (DC)	100	mA
P_C	Collector Power Dissipation	500	mW
T_J	Junction Temperature	150	$^\circ C$
T_{STG}	Storage Temperature	-65 ~ 150	$^\circ C$

Electrical Characteristics $T_a=25^\circ C$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Test Condition	Min.	Typ.	Max.	Units
I_{CBO}	Collector Cut-off Current	$V_{CB}=30V, I_E=0$			15	nA
h_{FE}	DC Current Gain	$V_{CE}=5V, I_C=2mA$	110		800	
$V_{CE(sat)}$	Collector-Emitter Saturation Voltage	$I_C=10mA, I_B=0.5mA$		90	250	mV
		$I_C=100mA, I_B=5mA$		200	600	mV
$V_{BE(sat)}$	Base-Emitter Saturation Voltage	$I_C=10mA, I_B=0.5mA$		700		mV
		$I_C=100mA, I_B=5mA$		900		mV
$V_{BE(on)}$	Base-Emitter On Voltage	$V_{CE}=5V, I_C=2mA$	580	660	700	mV
		$V_{CE}=5V, I_C=10mA$			720	mV
f_T	Current Gain Bandwidth Product	$V_{CE}=5V, I_C=10mA, f=100MHz$		300		MHz
C_{ob}	Output Capacitance	$V_{CB}=10V, I_E=0, f=1MHz$		3.5	6	pF
C_{ib}	Input Capacitance	$V_{EB}=0.5V, I_C=0, f=1MHz$		9		pF
NF	Noise Figure : BC546/547/548	$V_{CE}=5V, I_C=200\mu A$ $f=1KHz, R_G=2K\Omega$ $V_{CE}=5V, I_C=200\mu A$ $R_G=2K\Omega, f=30\sim 15000MHz$		2	10	dB
				1.2	4	dB
				1.4	4	dB
				1.4	3	dB

h_{FE} Classification

Classification	A	B	C
h_{FE}	110 ~ 220	200 ~ 450	420 ~ 800

Typical Characteristics

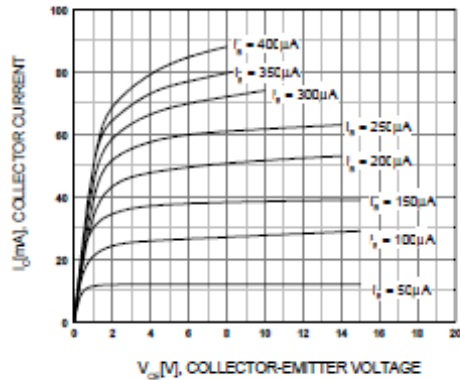


Figure 1. Static Characteristic

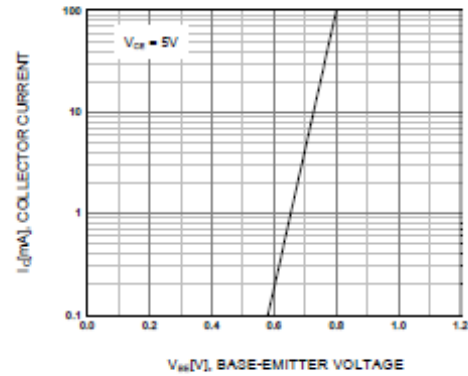


Figure 2. Transfer Characteristic

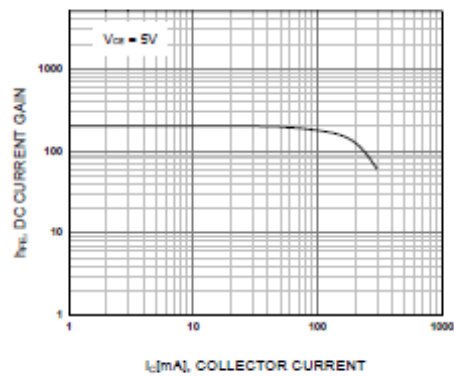


Figure 3. DC current Gain

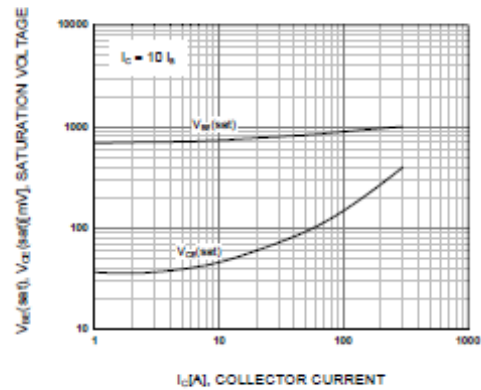
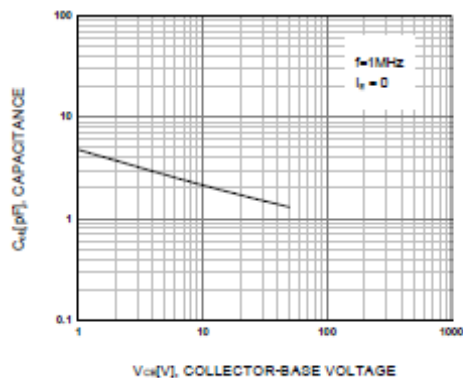
Figure 4. Base-Emitter Saturation Voltage
Collector-Emitter Saturation Voltage

Figure 5. Output Capacitance

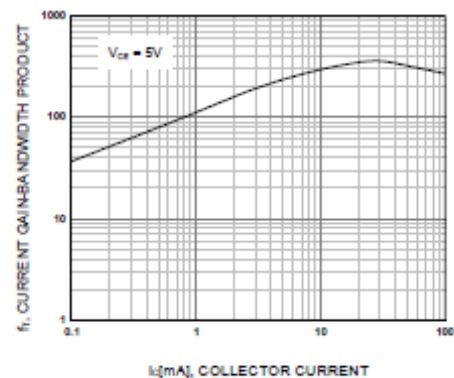


Figure 6. Current Gain Bandwidth Product

Bibliografia

- [1] S. Kuta, Układy Elektroniczne, cz. 1, Kraków: Wydawnictwa AGH, 1995.
- [2] J. Koprowski, Podstawowe przyrządy półprzewodnikowe, Kraków: Wydawnictwa AGH, 2009.
- [3] W. H. Paul Horowitz, Sztuka elektroniki, Tom 1-2, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności.
- [4] B. Razavi, Fundamentals of Microelectronics, John Wiley and Sons, 2008.
- [5] J. M. R.S. Ebers, „Large-Signal Behavior of Function Transistors,” *Proc. IRE vol. 42*, pp. 1761 - 1772, Dec. 1954.
- [6] „AllDatasheet,” [Online]. Available: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/50729/FAIRCHILD/BC546.html>.