



Elektronika przyrządów półprzewodnikowych

Laboratorium nr 2

Półprzewodnikowe elementy przełączające

1. Cel zajęć

W trakcie ćwiczenia badane będą charakterystyki prądowo-napięciowe tranzystora jednozłączowego oraz praca tego tranzystora w układzie prostego generatora relaksacyjnego. Na ich podstawie możliwe będzie wyznaczenie podstawowych parametrów tranzystora: U_p , U_v , I_p , I_v , η oraz porównanie ich wartości w zależności od sposobu wyznaczania

2. Zagadnienia obowiązujące na kartkówce

- Symbol i zasada polaryzacji tranzystora jednozłączowego.
- Szkic i opis budowy tranzystora jednozłączowego.
- Zastępczy schemat elektryczny tranzystora jednozłączowego wraz z wyjaśnieniem.
- Opis zasady działania tranzystora jednozłączowego.
- Charakterystyka $I_E = f(U_{EB1})$ tranzystora jednozłączowego dla różnych wartości U_{BB} .
- Parametry tranzystora jednozłączowego – definicje, wzory, typowe wartości.
- Zastosowania tranzystorów jednozłączowych.
- Generator relaksacyjny – wyjaśnić pojęcie.
- Generator relaksacyjny z tranzystorem jednozłączowym – schemat, zasada działania, przebiegi czasowe, rola elementów.
- Zadania obliczeniowe związane z programem ćwiczenia.

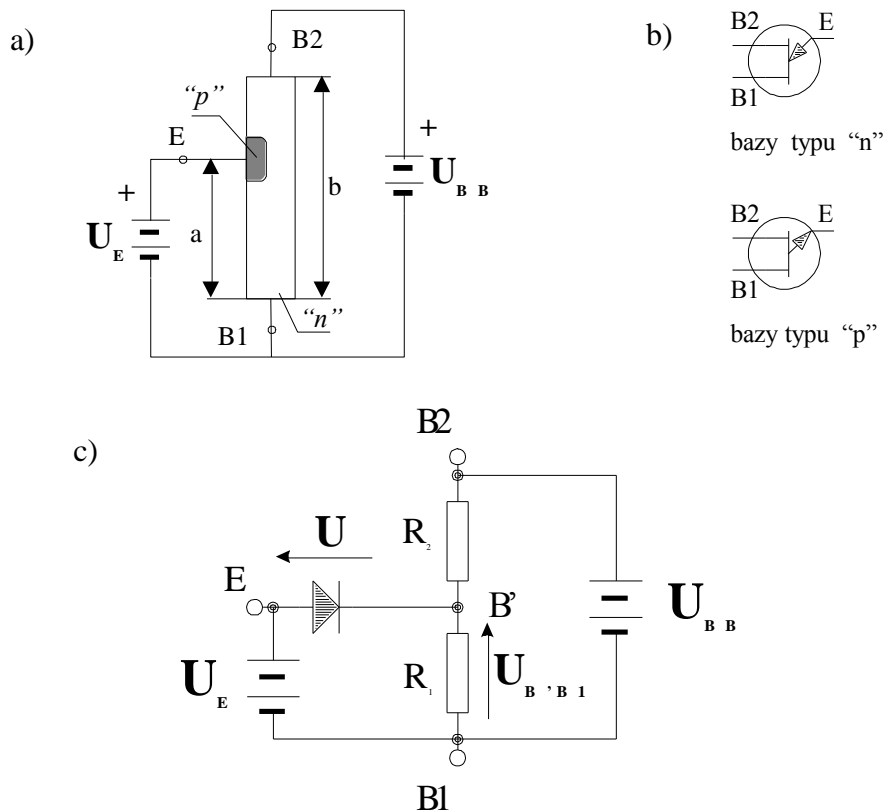
3. Literatura

- T. Ohly, Z. Radzimski, *Elementy elektroniczne cz. II*, Wydawnictwo PWr, Wrocław 1980, rozdział 5. Tranzystor jednozłączowy,
- W. Marciniak, *Przyrządy półprzewodnikowe i układy scalone*, WNT, Warszawa 1987, podrozdział 11.1. Tranzystor jednozłączowy,
- B. Wilamowski, *Mikroelektronika: Specjalne przyrządy półprzewodnikowe*, podrozdział 2.3.4. Tranzystor jednozłączowy.

4. Wstęp

Jednym z interesujących przyrządów półprzewodnikowych jest tranzystor jednozłączowy UJT (UniJunction Transistor), zwany także czasami dwubazową diodą. Jest to trójzłączowy przyrząd bipolarny, którego charakterystyka prądowo-napięciowa posiada zakres ujemnej rezystancji dynamicznej.

Ideę budowy, sposób polaryzacji, symbole oraz schemat zastępczy tranzystora jednozłączowego pokazano na Rys.1. Elementy te mogą posiadać obszary baz typu „p” lub „n” oraz obszar emitera tworzący z bazami złącze typu p-n. Ze względu jednak na zasadę działania i związane z tym uzyskiwane parametry tranzystorów przeważnie wykonuje się je jako elementy z bazami typu „n”, w związku z tym dalsze rozważania przedstawione zostaną dla takiego typu tranzystora.



Rys.1. Tranzystor jednozłączowy: a) idea budowy i polaryzacja; b) symbole graficzne; c) schemat zastępczy. U_E , U_{BB} - napięcia polaryzujące, odpowiednio emiter i bazę; R_1 , R_2 - rezystancja obszaru odpowiednio bazy pierwszej i drugiej; U - spadek napięcia na złączu baza-emiter, $U_{B'B1}$ - spadek napięcia na bazie pierwszej, b - całkowita długość bazy, a - długość bazy o modulowanej rezystancji

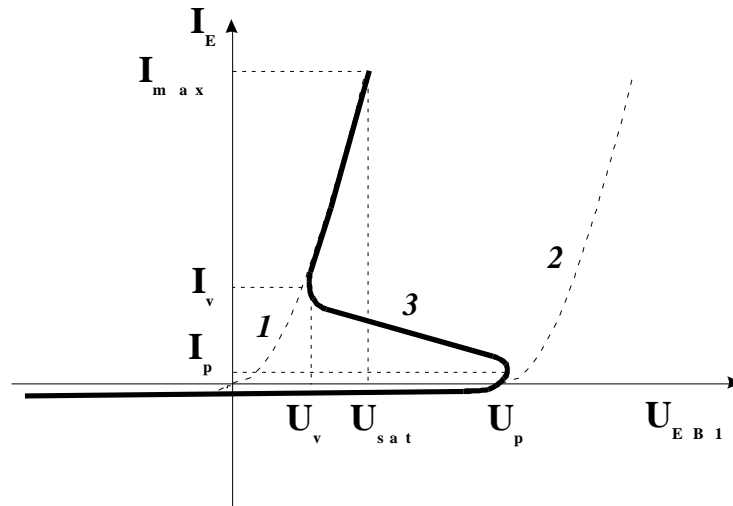
Tranzystor jednozłączowy należy zawsze polaryzować w następujący sposób:

- 1) do bazy drugiej B2 doprowadza się wyższy potencjał niż do bazy pierwszej B1 co powoduje dla bazy typu „n”, że złącze emiter-baza pierwsza polaryzuje się **wstępnie** zaporowo;
- 2) złącze emiter-baza pierwsza polaryzujemy tak, aby to złącze pracowało w kierunku przewodzenia.

Charakterystyka prądowo-napięciowa tranzystora jednozłączowego jest przedstawiona na Rys.2. Jeżeli napięcie U_{BB} między bazami będzie miało wartość zero, to charakterystyka prądowo-napięciowa obwodu emiter-baza pierwsza tego tranzystora będzie charakterystyką diody (krzywa 1). Przyłożone do obszaru bazy drugiej napięcie U_{BB} powoduje przepływ prądu przez bazę. Prąd ten zależy od wartości rezystancji bazy R_{BB} i powoduje, że w punkcie B' przy złączu emiter-baza pierwsza odkłada się napięcie $U_{B'B1}$ wynikające z dzielnika napięcia $R_1/(R_1+R_2)$. Wartość tego napięcia zależy od napięcia U_{BB} i wynosi

$$U_{B'B1} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{BB}$$

Dla wartości napięć między emiterym a bazą pierwszą U_E mniejszych od wartości $U_{B'B1}$ złącze emiterowe spolaryzowane jest w kierunku zaporowym i w tym obwodzie płynie prąd zaporowy, a tranzystor jest w stanie nieprzewodzenia. Gdy $U_E \geq U_{B'B1}$, złącze emiter-baza pierwsza polaryzuje się w kierunku przewodzenia i zaczyna przewodzić prąd. Jeżeli rezystancje bazy byłyby stałe, to przy wzroście napięcia zasilania U_E , prąd emitera rósłby zgodnie z krzywą 2. Wzrost prądu emitera powoduje jednak wzrost poziomu wstrzykiwania nośników (w przypadku emitery typu „p” dziur), co zmienia koncentrację nośników w bazie (zwiększa ją). Wstrzykiwane w obszar bazy nośniki unoszone są w polu elektrycznym w stronę bazy pierwszej zmniejszając jej rezystancję R_1 , co z kolei zmniejsza polaryzację zaporową $U_{B'B1}$, zwiększa spadek napięcia na złączu i powoduje odpowiedni (eksponencjalny) wzrost gęstości prądu nośników wstrzykiwanych do bazy. Istnieje więc tutaj klasyczny mechanizm dodatniego sprzężenia zwrotnego, działającego do momentu kiedy wartość rezystancji R_1 przestanie się zmieniać i osiągnie określoną wartość równowagową. Ten mechanizm odpowiedzialny jest za odcinek ujemnej rezystancji na charakterystyce prądowo-napięciowej. Od tego momentu kształt charakterystyki prądowo-napięciowej jest podobny kształtem do charakterystyki klasycznej diody półprzewodnikowej.



Rys.2 Charakterystyka prądowo-napięciowa tranzystora jednozłączowego. I_{max} - maksymalny prąd emitera, I_v - prąd doliny i odpowiadające mu napięcie doliny U_v , I_p - prąd szczytu i odpowiadające mu napięcie szczytu U_p , U_{sat} - napięcie nasycenia emitera, 1 - charakterystyka diody, 2 - hipotetyczna charakterystyka w przypadku stałych rezystancji bazy, 3 - rzeczywista charakterystyka tranzystora jednozłączowego.

Najważniejszymi parametrami tranzystora jednozłączowego są:

- wewnętrzny współczynnik blokowania η , inaczej nazywany współczynnikiem podziału napięcia i definiowany jako:

$$\eta = \frac{U_p - U_v}{U_{BB}} \quad (1)$$
- rezystancja międzybazowa $R_{BB}=(R_1+R_2,)$;
- napięcie nasycenia U_{sat} (napięcie emiter-baza pierwsza) przy maksymalnym prądzie emitera I_{max} ;
- napięcie i prąd doliny U_v, I_v ;
- napięcie i prąd szczytu U_p, I_p

Tranzystorów jednozłączowych używa się do budowy przerzutników astabilnych, bistabilnych i monostabilnych oraz w układach generatorów piłokształtnych. Przerzutnikowe działanie tych tranzystorów polega na włączaniu lub wyłączaniu określonych obwodów przy odpowiednio wysokim sterowaniu napięciowym. Najczęściej tę „przerzutnikową właściwość” stosuje się w układach włączających tyrystory lub triaki.

Podczas ćwiczenia badany będzie najprostszy układ generatora, który jest przedstawiony na Rys.4. Generacja w takim układzie pojawia się tylko wtedy, gdy tranzystor pracuje w zakresie ujemnej rezystancji. Dla odpowiednio wybranych wartości rezystancji R_E w układzie generatora kondensator C_E będzie ładował się do wartości U_p , po czym rozładowuje się przez złącze emiterowe i rezystor R_L do wartości U_v . Impulsy prądowe pojawiające się w trakcie rozładowywania się kondensatora C_E pojawią się tylko wtedy, gdy punkt pracy tego

tranzystora będzie znajdował się między punktami szczytu (U_p, I_p) a doliny (U_v, I_v) na charakterystyce prądowo-napięciowej. Jeżeli wartość rezystora R_E będzie za duża w obwodzie ładowania kondensatora C_E nie przekroczymy poziomu prądu szczytu I_p i tranzystor będzie pracował w stanie zablokowania. Jeżeli wartość R_E będzie za mała tranzystor będzie pracował w stanie nasycenia i również nie będzie zachodziła generacja. Wartości tej rezystancji zależą od parametrów tranzystora jednozłączowego, a dokładniej od położenia punktów szczytu i doliny na charakterystyce prądowo-napięciowej według następujących zależności:

$$R_{Emin} = \frac{U_{BB} - U_v}{I_v} \quad (2)$$

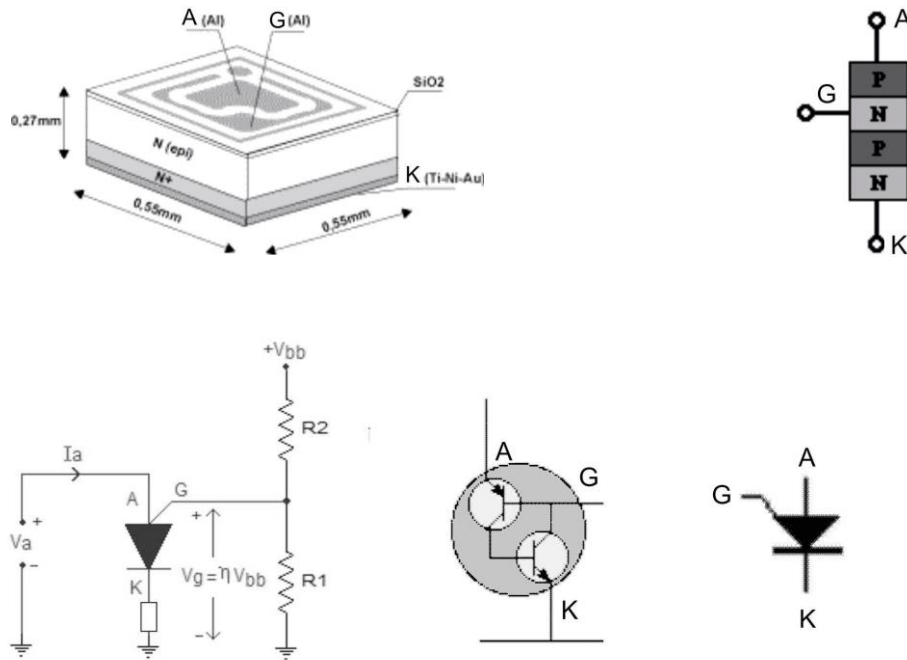
$$R_{Emax} = \frac{U_{BB} - U_p}{I_p} \quad (3)$$

Częstotliwość generacji zależą będzie od stałej ładowania kondensatora, czyli od stałej R_EC_E oraz od zakresu napięć szczytu i doliny tranzystora jednozłączowego (a więc zakresu napięć ładowania i rozładowywania się kondensatora). Okres drgań można określić wzorem:

$$T = R_E C_E \ln \frac{U_{BB} - U_v}{U_{BB} - U_p} \quad (4)$$

Tranzystory jednozłączowe są wytwarzane z wysokorezystywnego krzemu ($\rho > 40 \Omega\text{cm}$), co stwarza problemy z uzyskiem w produkcji i powtarzalnością parametrów wykonywanych elementów (patrz Tabela 1), dlatego też coraz częściej przyrząd ten jest wypierany przez programowalny tranzystor jednozłączowy PUT (**P**rogrammable **U**nijunction **T**ransistor). Jest to struktura, której działanie można przedstawić jako parę odpowiednio połączonych komplementarnych tranzystorów bipolarnych. Strukturę, schemat zastępczy, symbol przyrządu, a także układ aplikacyjny przedstawiono na Rys.3. Napięcie przełączania przyrządu ustala się („programuje”) za pomocą dwóch zewnętrznych rezystorów tworzących dzielnik napięcia zasilania na podobieństwo rezystorów wewnętrznych R_1 i R_2 obszaru bazy tranzystora UJT (Rys.1). Należy podkreślić, że PUT, mimo iż posiada charakterystykę prądowo-napięciową bardzo zbliżoną do UJT, to ze względu na swą budowę warstwową p-n-p-n jest zaliczany do grupy prostowników sterowanych, czyli tyrystorów (diod czterowarstwowych). Cechą charakterystyczną jego konstrukcji jest zastosowanie standardowego krzemu używanego w produkcji klasycznych tranzystorów. Pozostałe zalety w stosunku do UJT to:

- ❖ większe napięcia przebicia
- ❖ programowalne napięcia przełączające
- ❖ możliwość pracy także przy małych napięciach
- ❖ sygnał wyjściowy o większej amplitudzie
- ❖ niski koszt



Rys.3. Programowalny tranzystor jednozłączowy (PUT) – budowa i model struktury, układ pracy z rezystorami zewnętrznymi, schemat zastępczy i symbol.

5. Pomiary

5.1. Charakterystyka prądowo-napięciowa UJT $I_E = f(U_{EB1})$

Pomiar przeprowadzamy z wykorzystaniem charakterografu KI 3022A (opis działania w *Instrukcji wstępnej do LAB. I*) i oscyloskopu pracującym w trybie pracy X-Y.

Ustawienia charakterografu: Tranzystor *npn*

SIGNAL

U=10V (sprawdzić wartość na osi X oscyloskopu),

EXT. BIAS: (+U_{B2B1}) zewnętrzny zasilacz DC.

Podłączenie wyprowadzeń mierzonego tranzystora UJT do wejścia charakterografu:

E ⇒ C/D;

B1 ⇒ E/S

B2 ⇒ B/G - to gniazdo jest zasilane z zasilacza (EXT. BIAS)

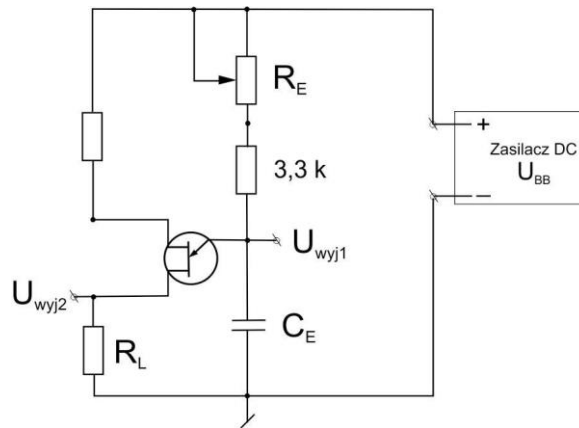
Takie podłączenie jest optymalne ze względu na wymaganą polaryzację $U_{EB1} > 0$ dla tranzystora jednozłączowego z emiterem typu *p*. Baza 1 jest wówczas podłączona do masy układu, a na emiter podawane jest przemiatane napięcie dodatnie z charakterografu.

Zmieniając płynnie wartość napięcia polaryzacji zewnętrznej U_{B2B1} obserwować zmianę kształtu charakterystyki. Następnie, wyznaczyć charakterystyki $I_E = f(U_{EB1})$ dla polaryzacji $U_{B2B1} = 0 \text{ V}, 5 \text{ V}, 10 \text{ V}$. Ze względu na niewielką katalogową wartość prądu szczytu I_p (rzędu μA) i małą czułość wejścia oscyloskopu zakres ujemnej rezystancji charakterystyki I-U jest

słabo widoczny, co nie przeszkadza w wyznaczeniu charakterystycznych parametrów napięciowych tranzystora. Przy ustalonych napięciach U_{B2B1} odczytać wartość U_p oraz U_v . Obliczyć wartość współczynnika podziału napięcia η .

5.2. Praca UJT w układzie generatora relaksacyjnego

Pomiar wykonujemy w układzie przedstawionym na Rys.4.



Rys.4. Układ generatora z użyciem mierzonego UJT

W tej części ćwiczenia należy:

- wydrukować uzyskane na oscyloskopie przebiegi napięć U_{wyj1} , U_{wyj2} dla wartości $U_{BB} = 10 \text{ V}$, $R_L = 100 \Omega$, $C_E = 0,033 \mu\text{F}$, $R_E \approx 100 \text{ k}\Omega$ (wartość R_E ustawiamy przy użyciu omomierza przed zmontowaniem układu).

UWAGA: wydruk wykonać przy wykorzystaniu funkcji MEASURE oscyloskopu, która pozwoli na odczytanie wartości U_{max} , U_{min} i okresu dla napięcia U_{wyj1} .

- Korzystając z układu generatora stosując wzory (2) i (3) określić wartość I_v i I_p dla $U_{BB} = 10 \text{ V}$, 20 V , $R_L = 100 \Omega$, $C_E = 0.033 \mu\text{F}$, $R_E \approx 100 \text{ k}\Omega$.

W tym celu:

- odczytać wartości napięć U_p , U_v korzystając z przebiegu U_{wyj1} na oscyloskopie,
- ustawić potencjometrem wartość R_{Emin} , przy której zanika generacja. Odłączyć R_E z układu generatora i zmierzyć wartość R_{Emin} omomierzem,
- ustawić potencjometrem wartość R_{Emax} , przy której zanika generacja. Odłączyć R_E z układu generatora i zmierzyć wartość R_{Emax} omomierzem.

- zmierzyć napięcie U_{wyj2} w funkcji C_E dla: $U_{BB} = 10 \text{ V}$, 20 V , $R_L = 100 \Omega$, $R_E = 100 \text{ k}\Omega$ oraz podać częstotliwość oscylacji. Sporządzić wykresy $U_{wyj2} = f(C_E)$. Wyznaczoną częstotliwość oscylacji porównać z częstotliwością obliczoną teoretycznie.

Porównać wartości zmierzonych parametrów z wartościami otrzymanymi w p.5.1.

Tabela 1. Parametry tranzystorów jednozłączowych UJT

Typ	η_{min}	η_{max}	$I_{p \max} (\mu\text{A})$	$I_{v \min.} (\text{mA})$
2N2646	0,56	0,75	5	4
2N2647	0,68	0,82	2	8