



## Ćwiczenie C2

### Tranzystory

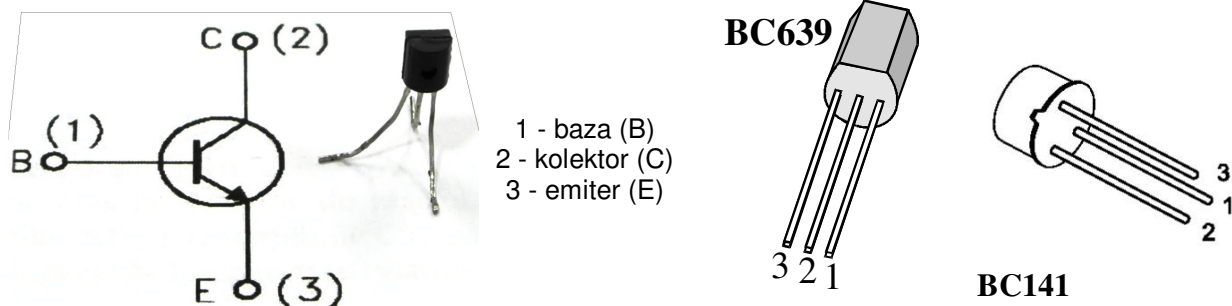
#### Streszczenie

W tym ćwiczeniu poznajemy podstawowe własności tranzystora czyli podstawowego elementu wzmacniającego sygnały elektroniczne. Rozpoczniemy od zbadania charakterystyki wyjściowej tranzystora bipolarnego  $I_C(U_{CE})$  - czyli zależności prądu kolektora,  $I_C$ , od napięcia kolektor-emiter,  $U_{CE}$  oraz wyznaczymy współczynnik wzmocnienia prądowego,  $\beta$ . Charakterystyki  $I_C(U_{CE})$  dla różnych prądów bazy  $I_B$  (i różnych napięć baza-emiter  $U_{BE}$ ) otrzymamy na ekranie oscyloskopu w modzie wyświetlania XY. Na ich podstawie zostaną ustalone warunki optymalnej pracy wzmacniacza tranzystorowego (optymalny punkt pracy wzmacniacza), czyli optymalny prąd kolektora dla wzmacniacza. Następnie zostanie zbudowany wzmacniacz tranzystorowy i zmierzmy jego wzmocnienie napięciowe.

#### Wstęp

Tranzystor to trójelektrodowy element elektroniczny umożliwiający wzmacnianie lub przełączanie sygnałów elektrycznych. Od jego wynalezienia w roku 1948 rozpoczęła się era elektroniki półprzewodnikowej, w tym masowego przetwarzania informacji z wykorzystaniem układów scalonych, projektowanych do realizacji złożonych funkcji w obwodach elektronicznych i budowanych w oparciu o tranzystory. Duże układy scalone zawierają nawet biliony tranzystorów (np. 128-layer 1.33 Tb QLC 3D NAND flash memory chip).

Działanie tranzystora będziemy badać na przykładzie popularnego tranzystora bipolarnego npn typu BC141, BC635 lub BC639. Są to tranzystor średniej mocy (dopuszczalna moc  $U_{CE} \cdot I_C \leq 1$  W) o dopuszczalnym prądzie kolektora  $I_{Cmax} = 1$  A oraz o dopuszczalnym napięciu kolektor-emiter  $U_{CEmax} = 60$  V (BC639 - 80V) i granicznej częstotliwości pracy 100 MHz (BC141 - 50 MHz).



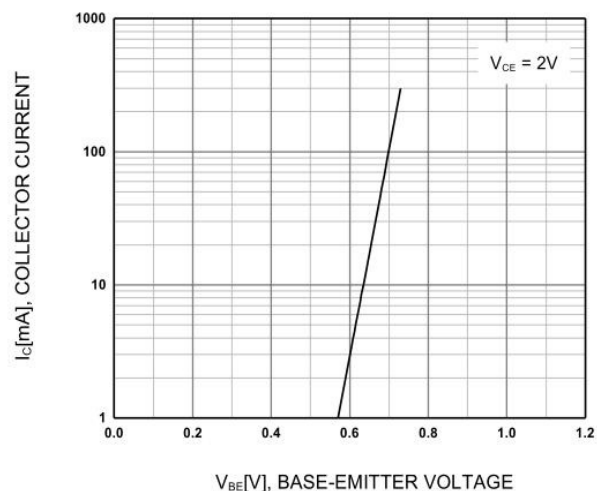
Rys. 1. Schemat elektryczny tranzystora npn oraz widok obudowy tranzystorów z oznaczeniem wprowadzeń. W obudowie tranzystora istnieje znacznik przy elektrodzie E.

Działanie tranzystora bipolarnego (omówione tu na przykładzie npn) opiera się na dwu sąsiadujących ze sobą złączach p-n, baza-emiter (B-E) i baza-kolektor (B-C), przy czym złącze B-E jest podłączane w kierunku przewodzenia, a złącze B-C w kierunku zaporowym. Zasadniczą cechą budowy tranzystora bipolarnego, która umożliwia działanie wzmacniające i przełączające tranzystora, jest niewielka grubość obszaru bazy (typu p w tranzystorze npn), na tyle mała, aby strumień elektronów, który będzie płynąć w złączu B-E wywołany napięciem  $U_{BE}$  przekraczającym napięcie przewodzenia złącza p-n, zdołał być wstrzykiwany do obszaru kolektora typu n, czyli aby elektrony wstrzykiwane z obszaru emitera do obszaru bazy nie rekombinowały z dziurami w bazie, a płynęły dalej do obszaru kolektora. W ten sposób niewielkie zmiany napięcia baza-emiter,  $U_{BE}$ , wywołują duże zmiany prądu kolektor-emiter C-E. W obszarze bazy elektrony wstrzykiwane z emitera są nośnikami mniejszościowymi, zatem mogą “żyć” w obszarze bazy przez czasy rzędu dziesiątek lub setek nanosekund. Baza geometrycznie musi być na tyle cienka, aby większość elektronów wstrzykiwanych z emitera docierała do kolektora. Jedynie niewielka część elektronów wstrzykiwanych z emitera (czyli tworzących prąd emitera  $I_E$ ) rekombinuje w bazie i tworzy prąd bazy  $I_B$ , pozostała część dociera do obszaru kolektora i tworzy prąd kolektora  $I_C$ . Dla tranzystora spełnione są relacje:

$$I_C = \beta I_B \quad \text{oraz} \quad I_E = I_C + I_B \quad (1)$$

gdzie  $\beta$  nosi nazwę współczynnika wzmocnienia prądowego tranzystora, który jest zdefiniowany jako  $I_C / I_B$  i określa jaka część prądu kolektora (i w przybliżeniu emitera) tworzy prąd bazy. Zwykle wartość  $\beta = 10 - 1000$ , jest to współczynnik w przybliżeniu stały dla danego tranzystora (ale spada przy wzroście częstotliwości oraz przy dużych prądach kolektora). W przypadku badanych przez nas tranzystorów BC141, BC635 lub BC639 współczynnik  $\beta$  będzie wynosił około 100 - 200.

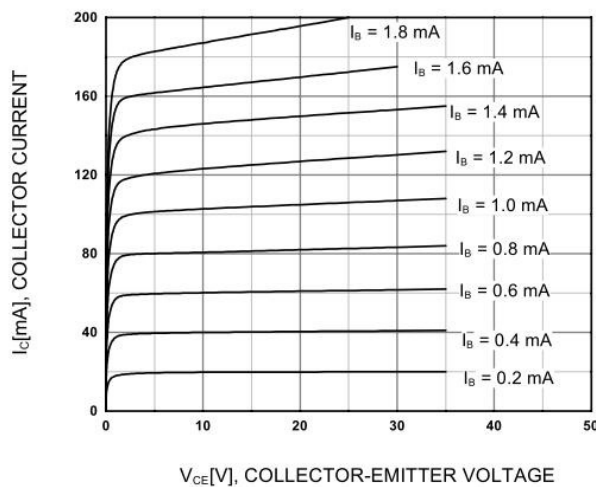
Rys. 2. Zależność prądu kolektora  $I_C$  od napięcia złącza pn baza-emiter  $U_{BE}$  dla przykładowego tranzystora npn typu BC635.



W tranzystorze prąd emitera  $I_E$ , równy w przybliżeniu prądowi kolektora  $I_C$ , jest wyznaczony przez napięcie  $U_{BE}$  przyłożone do złącza B-E, zgodnie z zależnością I-V dla złącza p-n opisaną równaniem Shockleya (instrukcja C1, równanie (1)) Obrazuje to rys. 2 pochodzący z danych katalogowych przykładowego tranzystora npn typu BC635.

Gdy zwiększamy napięcie  $U_{BE}$ , czyli także prąd bazy  $I_B$ , prąd kolektora  $I_C$  wzrasta proporcjonalnie do prądu bazy  $I_B$  - wzór (1). Czyli zmieniając niewielki prąd bazy proporcjonalnie zmieniamy znacznie większy prąd kolektora. Jak widać tranzystor wzmacnia prąd. Wykorzystując tę cechę buduje się układy wzmacniaczy z tranzystorem, w których uzyskuje się również wzmocnienie

napięcia. Efektywnie układ wzmacniacza daje wzmocnienie mocy - małe zmiany mocy w obwodzie wejściowym bazy wywołują duże zmiany mocy w obwodzie wyjściowym kolektora.



Rys. 3. Zależność prądu kolektora  $I_C$  od napięcia kolektor-emiter  $U_{CE}$  dla różnych wartości prądu bazy dla tranzystora npn BC635.

Dla ustalonego prądu bazy (także napięcia  $U_{BE}$ ), prąd kolektora  $I_C$ , czyli prąd płynący między emiterem i kolektorem, jest w szerokim zakresie napięć kolektor-emiter  $U_{CE}$  w przybliżeniu niezależny (dla niewielkich prądów kolektora) od napięcia  $U_{CE}$  - rys. 3. Tranzystor może więc działać jak źródło prądowe - prąd kolektora  $I_C$  nie zależy (w przybliżeniu małych prądów  $I_C$ ) od napięcia  $U_{CE} > 1$  V. Wykresy przedstawione na rys. 3, czyli zależności  $I_C$  od  $U_{CE}$  dla ustalonego  $I_B$  (a więc i ustalonego  $U_{BE}$ ), noszą nazwę charakterystyk wyjściowych tranzystora.

Badanie tranzystora w tym ćwiczeniu zaczniemy od wyznaczenia podobnych charakterystyk do pokazanych na rys. 2 i 3 oraz wyznaczenia współczynnika wzmocnienia prądowego  $\beta$  dla tranzystora BC141 lub BC639. Taki tranzystor będzie następnie użyty do zbudowania wzmacniacza.

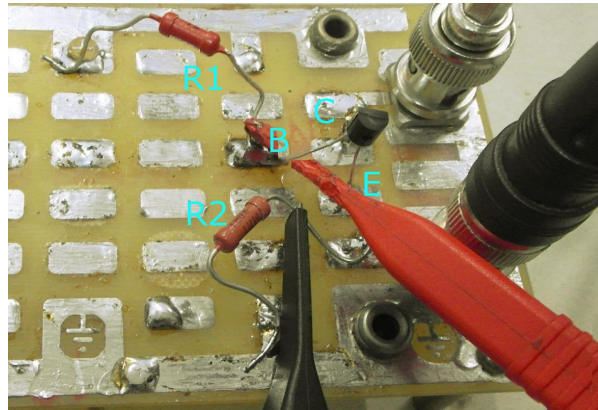
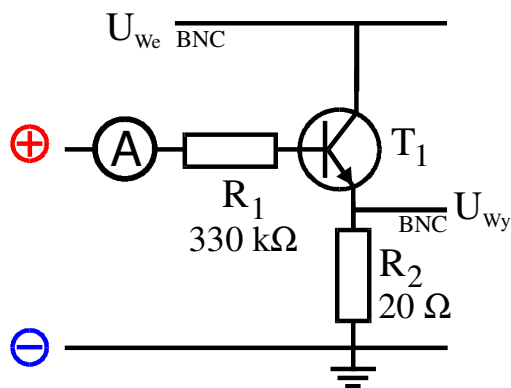
Wzmacniacz tranzystorowy (o wspólnym emiterze) dla prądów zmiennych uzyskuje się przykładając do bazy napięcie zmienne, dodatkowo oprócz napięcia stałego. Napięcia stałe stosuje się dla ustawienia wstępnych warunków pracy tranzystora, czyli w szczególności wartości prądu stałego kolektora oraz napięcia stałego na kolektorze. Ustalenie tych warunków napięć i prądów stałych nosi nazwę wyboru optymalnego punktu pracy wzmacniacza tranzystorowego. We wzmacniaczach w obwodzie kolektora stosowany jest opornik ograniczający prąd kolektora do wartości bezpiecznych dla tranzystora (ograniczający też moc pracy tranzystora poniżej dopuszczalnej dla danego typu tranzystora). Optymalny punkt pracy tranzystora we wzmacniaczu jest wyznaczony przez taki prąd kolektora, przy którym na kolektorze panuje napięcie równe połowie napięcia zasilania. Wtedy napięcie zmienne na kolektorze może wahać się od napięcia bliskiego 0, do napięcia bliskiego napięcia zasilania przy zachowaniu kształtu napięcia zmiennego podawanego do bazy. Można wtedy uzyskać największe wzmocnienie mocy sygnału (przy zachowaniu niezmiennego kształtu sygnału wyjściowego takiego jak sygnał wejściowy np. sinusoidalny, czyli bez wprowadzania zniekształceń sygnału wzmacnianego).

## Aparatura do wykonania ćwiczenia

Płytką drukowaną z dwoma gniazdami BNC, tranzystor BC141, oporniki 330 kΩ, 200 kΩ, 1,5 kΩ, 20 Ω, potencjometr 1 MΩ, kondensatory 47 nF i 1 μF. Dwa mierniki uniwersalne, generator funkcyjny, oscyloskop 2 kanałowy, akcesoria pomocnicze (lutownica elektroniczna, kable łączeniowe, chwytaki pomiarowe, trójnik rozgałęziający BNC).

## Wykonanie ćwiczenia

Część pierwsza - pomiar charakterystyk tranzystora.



Rys. 4. Schemat i zdjęcie układu do pomiaru w funkcji napięcia  $U_{CE}$ . Opornik  $R_2$  w obwodzie emitera pełni rolę czujnika prądu emitera (mierzone napięcie na  $R_2$  jest proporcjonalne do prądu  $I_E \approx I_C$ ).

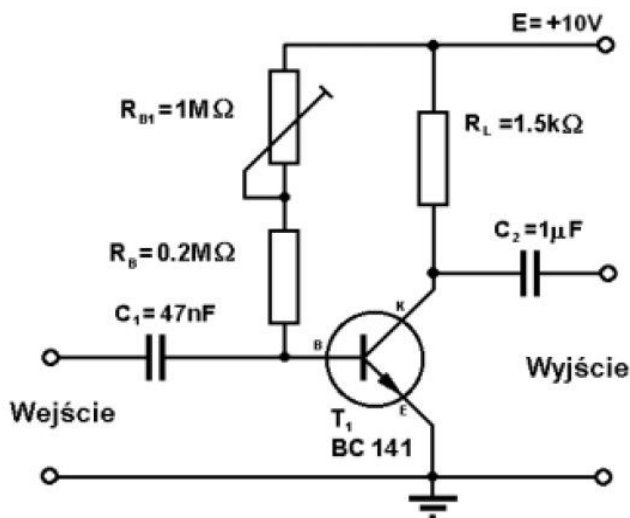
- 1) Zbudować układ pomiarowy według schematu z rys. 4. Do zasilania układu (kolektor tranzystora) wykorzystamy generator funkcyjny, podłączony jednocześnie do kanału CH1 oscyloskopu, a sygnał wyjściowy należy podłączyć do kanału CH2. Napięcie obwodu bazy,  $U_b$ , podajemy z zasilacza regulowanego napięcia stałego. Jako amperomierz stosujemy miernik uniwersalny ustawiony na zakres mikroamperów.
- 2) Generator skonfigurować tak, by generował przebieg piłokształtny o częstotliwości około 100 Hz i o napięciu zmieniającym się od 0 do 10 V.
- 3) Oscyloskop skonfigurować do pracy w trybie XY (przycisk Display --> XY). Oscyloskop powinien kanał CH1 wyświetlać jako X (oś pozioma), a kanał CH2 jako Y (oś pionowa). Jeżeli oscyloskop inaczej przyporządkowuje kanały, to należy zamienić kable. W ten sposób sygnał na osi poziomej będzie proporcjonalny do napięcia  $U_{CE}$  (napięcie na oporniku  $R_2$  zaniedbujemy, bo jest małe). Natomiast sygnał na osi pionowej będzie proporcjonalny do prądów kolektora i emitera  $I_C \approx I_E = U_{wy}/R_2$ .
- 4) Wzmocnienie kanału CH1 i położenie wykresu w poziomie ustawić tak, aby na ekranie mieścił się cały zakres napięcia piłokształtnego 0 - 10 V. Czulość w kanale CH2 (oś pionowa) najwygodniej jest ustawić na 20 mV (lub 50 mV) na działkę, wtedy dla opornika w obwodzie emitera o wartości 20 Ω jedna działka skali ekranu odpowiada prądowi emitera o wartości 1 mA (lub 2.5 mA). Przesunąć wykres w pionie tak, by dla prądu  $I_C = 0$  mA wykres pokrywał się z najniższą kratką podziałki ekranu oscyloskopu.

Zaobserwować powstające na ekranie oscyloskopu charakterystyki tranzystora (zależności prądu kolektor-emiter  $I_C$  od napięcia kolektor-emiter  $U_{CE}$ ) dla różnych wartości prądu bazy w zakresie  $I_B = 0 - 70 \mu\text{A}$ . Taki zakres prądów bazy  $I_B$  uzyskuje się dla napięć stałych  $U_b$  z zasilacza z zakresu ok.  $0 - 20 \text{ V}$ . Uzyskane wykresy dla różnych wartości  $I_B$  powinny być podobne do przedstawionych na rys. 3, przedstawionym we wstępie.

- 5) Zmieniając napięcie zasilacza polaryzującego bazę tranzystora w zakresie  $U_b = 0 - 20 \text{ V}$ , zebrać dane umożliwiające wykreślenie zależności prądu kolektora  $I_C$  w obszarze płaskim (jak na rys. 3 dla  $U_{CE} > 1 \text{ V}$ ) od prądu bazy  $I_B$ . Ze względu na duże wzmocnienie tranzystora można przyjąć, że prąd kolektora  $I_C$  jest równy prądowi w obwodzie emitera  $I_E = U_{R2}/R_2$  (pominąć prąd bazy). Wartości prądów bazy  $I_B$  odczytywać z mikroamperomierza. Między bazą i emiterem tranzystora  $T_1$  podłączyć z użyciem chwytaków woltomierz napięcia stałego. Zmierzyć wartość napięcia stałego baza-emiter  $U_{BE}$  dla każdej użytej wartości  $U_b$ . Pomiary najwygodniej jest robić ustawiając takie wartości  $U_b$ , przy których obszar płaski charakterystyki  $I_C(U_{CE})$  pokrywa się z kolejnymi działkami na ekranie oscyloskopu – w ten sposób można łatwo zebrać dane co np.  $1 \text{ mA}$  (lub  $2.5 \text{ mA}$ ) prądu kolektora  $I_C$ .
- 6) Wyznaczyć współczynnik wzmocnienia prądowego  $\beta$  tranzystora rysując zależność odczytanych z oscyloskopu wartości prądu kolektora (z obszaru płaskiego  $I_C(U_{CE})$ ) w funkcji prądu bazy  $I_B$  - wykres zależności  $I_C = f(I_B)$  z dopasowaną linią prostą. Wykonać także wykres prądu kolektora  $I_C$  w funkcji napięcia stałego  $U_{BE}$ , wykreślając prąd  $I_C$  w skali logarytmicznej. Czy otrzymany wykres  $I_C(U_{BE})$  pokazuje zależność jak z rysunku 1 oraz jak dla diody z ćwiczenia C1?

### Część druga - badanie własności wzmacniacza

- 7) Chcemy znaleźć optymalny punkt pracy tranzystora dla obwodu wzmacniacza o wspólnym emiterze, zasilanego napięciem  $E = 10 \text{ V}$ , przy wartości oporu w obwodzie kolektora  $R_L = 1,5 \text{ k}\Omega$ . Odpowiada to sytuacji, w której napięcie na kolektorze będzie równe połowie napięcia zasilania  $E/2 = 5 \text{ V}$ . Wtedy na oporniku  $R_L$  również będzie  $5 \text{ V}$ , a więc płynął będzie prąd  $I_C = 5\text{V}/1,5 \text{ k}\Omega = 3,3 \text{ mA}$ . Dla  $\beta = 165$  przez bazę będzie płynął prąd  $I_B = I_C/\beta = 20 \mu\text{A}$ . Takie warunki wstępnej polaryzacji tranzystora napięciami stałymi będą stosowane w układzie wzmacniacza, który wykonamy w drugiej części ćwiczenia.



Rys. 5. Schemat wzmacniacza o wspólnym emiterze. Wzmacniacz jest zasilany napięciem stałym  $E = 10 \text{ V}$ . Do wejścia podłączymy sygnał sinusoidalnie zmienny z generatora o napięciu rzędu  $\text{mV}$ , zmienny sygnał wyjściowy będziemy obserwować oscyloskopem w modzie YT.

- 8) Obliczyć przewidywaną wartość oporu  $R_{BS}$  przy założeniu, że będzie on podłączony do napięcia  $U_b = 10 \text{ V}$ . Uwaga, w układzie na rys. 5. opór bazy składa się z dwóch oporników:  $R_{BS} = R_B + R_{B1}$ .  
Należy skorzystać z zależności:  $I_B = (E - 0,65 \text{ V})/R_{BS}$ , gdzie  $0,65 \text{ V}$  to przybliżona wartość napięcia na złączu baza-emiter,  $U_{BE}$ . Dokładna wartość  $U_{BE}$  dla optymalnego punktu pracy zostanie zmierzona w punkcie (11).
- 9) Zbudować wzmacniacz o wspólnym emiterze z rys. 5. Zasilanie wzmacniacza (napięcie stałe  $E = 10 \text{ V}$ ) należy podłączyć poprzez gniazda radiowe płytki montażowej i przewody z wtyczkami bananowymi. Wejście i wyjście układu łączymy poprzez gniazda BNC z kanałami CH1 i CH2 oscyloskopu.
- 10) Podać na wejście układu wzmacniacza sygnał sinusoidalny o częstotliwości  $1 \text{ kHz}$  i amplitudzie (pik-to-pik) około  $50 \text{ mV}$ . Porównać przebiegi sygnału wejściowego i wyjściowego. Jeśli przebieg wyjściowy jest zniekształconą sinusoidą, zmniejszyć amplitudę sygnału wejściowego. Zmieniając położenie suwaka potencjometru  $R_{B1}$  zaobserwować wpływ zmian punktu pracy tranzystora na kształt przebiegu wyjściowego.
- 11) Wyłączyć sygnał  $1 \text{ kHz}$  i zmierzyć za pomocą woltomierza napięcie kolektora tranzystora. Dobrać tak wartość oporności potencjometru (opornika regulowanego)  $R_{B1}$ , aby napięcie to wynosiło  $U_{CE} = E/2 = 5 \text{ V}$ . W ten sposób osiąga się optymalny punkt pracy tranzystora w tym wzmacniaczu. Zmierzyc napięcie bazy  $U_{BE}$ .  
Czy założenie z punktu (8), że  $U_{BE} \approx 0,65 \text{ V}$  jest spełnione? (niepewność  $\sigma = 0,05 \text{ V}$ )
- 12) Włączyć sygnał  $1 \text{ kHz}$ . Wyznaczyć charakterystykę amplitudową wzmacniacza  $U_{WY}(U_{WE})$  w całym zakresie amplitud wejściowych dających nieznkształcony sygnał wyjściowy.  $U_{WE}$  oraz  $U_{WY}$  oznaczają tutaj odpowiednio amplitudy (pik-pik) zmiennej składowej sygnału wejściowego i wyjściowego. Określić przedział amplitud  $U_{WE}$ , dla których wzmacniacz pracuje liniowo (nie zniekształca sygnału sinusoidalnego). Dla tego przedziału wyznaczyć wzmocnienie wzmacniacza  $K_U$ , dopasowując do danych doświadczalnych prostą typu  $U_{WY} = K_U \cdot U_{WE}$ .
- 13) Odlutować tranzystor i zmierzyć omomierzem ustawioną wartość oporu w układzie polaryzacji bazy (sumaryczną wartość oporności  $R_{BS} = R_B + R_{B1}$ ). Porównać ją z wartością wyznaczoną w części pierwszej ćwiczenia (punkt 8).

## Literatura

- 1) Wiesław Marciniak, "Przyrządy półprzewodnikowe i układy scalone", Wydawnictwa Naukowo-Techniczne
- 2) T. Stacewicz, A. Kotlicki, Elektronika w laboratorium naukowym, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1994

Wersja z dnia 22 IV 2023, K. Korona, R. Mirek, B. Piętka  
(na podst. materiałów z Prac. Fiz. i Elektronicznej, WF UW)