

BADANIE CHARAKTERYSTYK DIODY I TRANZYSTORA METODĄ OSCYLOSKOPOWĄ

- I. Cel ćwiczenia:** wyznaczenie charakterystyki diody Zenera, charakterystyk tranzystora p-n-p oraz n-p-n w układzie WE, zapoznanie się z podstawowymi właściwościami tranzystora i oscyloskopową metodą badania charakterystyk prądowo-napięciowych
- II. Przyrządy:** płytki montażowa, transformator regulowany TRP 200, zasilacz stabilizowany, dzielnik napięcia DNa-18, multimetr cyfrowy, mikroamperomierz i miliwoltomierz prądu stałego, oscyloskop STD 501XY lub HM 303 (lub inny dwukanałowy), miernik parametrów tranzystorów MTD-1.
- III. Literatura:**
1. W. Marciniak Przyrządy półprzewodnikowe i układy scalone, WNT, Warszawa 1984.
 2. R. Śledziwski Elektronika dla fizyków, PWN, Warszawa 1982.
 3. I. Rydzewski Oscyloskop elektroniczny, WKŁ, Warszawa 1982.
 4. M. Rusek, R. Ćwirko, W. Marciniak Przewodnik po elektronice, WNT, Warszawa 1986.

IV. Wprowadzenie

IV.1 Półprzewodnik

Powszechnie stosowanym kryterium klasyfikacji pierwiastków (ciał stałych) jako przewodników, półprzewodników i izolatorów jest kryterium wynikające z modelu pasmowego ciała stałego. Według tego kryterium szerokość pasma zabronionego E dla półprzewodników spełnia warunek $E < 2eV$, a dla izolatorów warunek $E > 2eV$. W przewodnikach natomiast pasma przewodnictwa i walencyjne zachodzą na siebie. Podstawowym półprzewodnikiem jaki wykorzystuje obecnie elektronika jest krzem, w mniejszym stopniu - german. Krzem i german to pierwiastki należące do IV grupy układu okresowego o szerokości pasma zabronionego wynoszącej odpowiednio 1,1eV i 0,7eV.

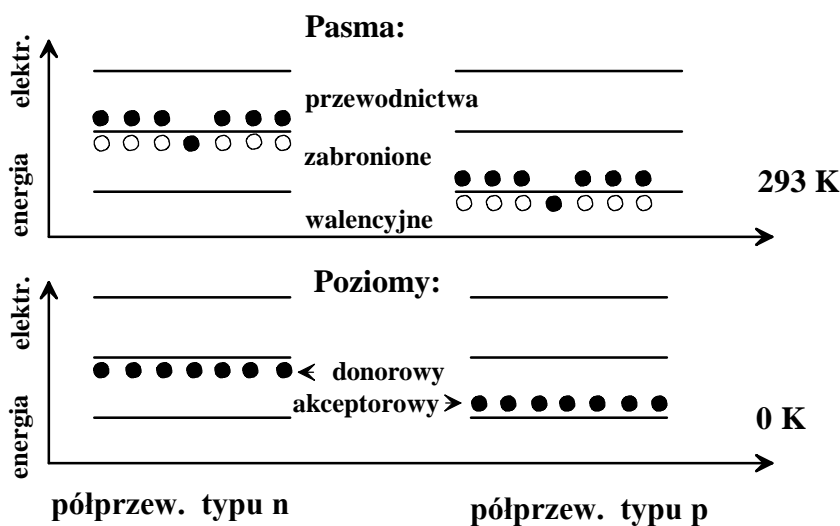
Idealnie czysty, bez domieszek i defektów sieci krystalicznej półprzewodnik to tzw. półprzewodnik samoistny. Elektrony walencyjne w półprzewodniku samoistnym mogą, np. dzięki energii drgań cieplnych przechodzić do pasma przewodnictwa. W wyniku takiego przejścia w monokryształe krzemu czy też germanu powstaje para swobodnych nośników ładunku: elektron w paśmie przewodnictwa i dziura - czyli opuszczone przezeń miejsce w wiązaniu kowalencyjnym, posiadające właściwość swobodnego ładunku dodatniego. Liczby elektronów i dziur w jednostce objętości (koncentracje) półprzewodnika samoistnego są zawsze takie same w przeciwieństwie do półprzewodników domieszkowanych.

Domieszki dzielimy na donorowe i akceptorowe. Jako domieszek donorowych używa się pierwiastków z grupy V -tej : fosforu, arsenu, antymonu posiadających elektrony na poziomach energetycznych, leżących w paśmie zabronionym półprzewodnika samoistnego w pobliżu granicy pasma przewodnictwa. W przypadku krzemu z domieszką fosforu wystarczy dostarczyć elektronowi walencyjnemu fosforu zaledwie 0,044eV dodatkowej energii, aby stał się on elektronem przewodnictwa. Powstająca wówczas w poziomie donorowym (rys.1) dziura nie posiada właściwości ładunku swobodnego i w tak domieszkowanym półprzewodniku koncentracja elektronów

swobodnych jest większa od koncentracji swobodnych dziur - półprzewodnik taki nazywamy półprzewodnikiem typu n.

Wprowadzając w siatkę krystaliczną krzemu atomy pierwiastków z III grupy, np. boru czy glinu o poziomie akceptorowym w pobliżu granicy pasma walencyjnego i zabronionego otrzymujemy półprzewodnik typu p o większej w porównaniu z elektronami przewodnictwa koncentracji swobodnych dziur. Elektrony przewodnictwa w takim półprzewodniku nazywamy nośnikami mniejszościowymi, zaś dziury nośnikami większościowymi. W temperaturze pokojowej energia drgań cieplnych jest wystarczająca, aby większość elektronów przeszła z poziomów donorowych do pasma przewodnictwa, a poziom akceptorowy został częściowo zapełniony przez elektrony walencyjne półprzewodnika podstawowego.

Przepływ prądu przez półprzewodnik polegać może zarówno na unoszeniu elektronów i dziur w polu elektrycznym (prąd unoszenia) jak i na dyfuzji nośników ładunku wywołanej nierównomiernym rozkładem ich koncentracji (prąd dyfuzyjny). Występuje również zjawisko rekombinacji elektronów i dziur czyli zanikania swobodnych nośników ładunku.



Rys.1 Poziomy donorowe i akceptorowe w temperaturze zera bezwzględnej i w temperaturze pokojowej.

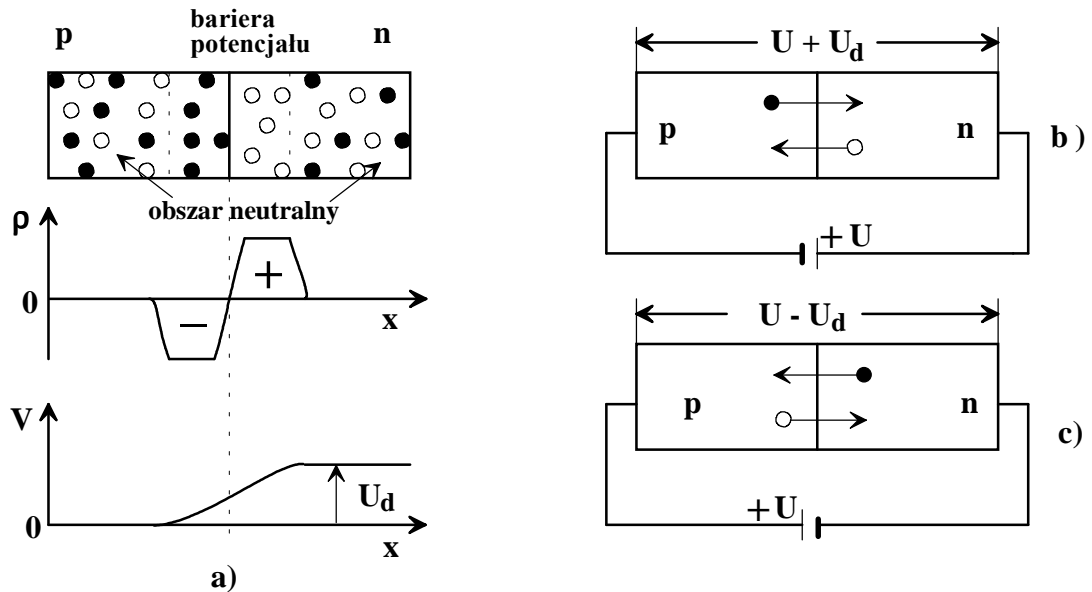
IV.2 Złącze p-n

Monokrystaliczną próbkę półprzewodnika utworzoną przez dwie warstwy półprzewodników typu p i n nazywamy złączem p-n. Złącze takie wraz z wyprowadzeniami elektrycznymi i obudową tworzy diodę półprzewodnikową. Możemy wyróżnić trzy podstawowe stany elektryczne złącza p-n.

IV.2.1 Złącze niespolaryzowane

Jeżeli do złącza nie jest przyłożone napięcie zewnętrzne, to przez złącze płynie prąd dyfuzyjny - elektrony z warstwy n przechodzą do warstwy p, a dziury dyfundują z warstwy p do n. Gdyby elektrony i dziury były cząstkami obojętnymi elektrycznie, to proces ten musiałby doprowadzić do wyrównania się koncentracji w półprzewodniku. W rzeczywistości nieskompensowane ładunki przestrzenne, powstające wskutek dyfuzji powodują wytworzenie różnicy potencjałów, nazwanej napięciem dyfuzyjnym lub barierą potencjału (rys.2a). Napięcie dyfuzyjne zapobiega wyrównaniu się koncentracji - przez złącze płynie prąd unoszenia o takim samym natężeniu, jak natężenie prądu

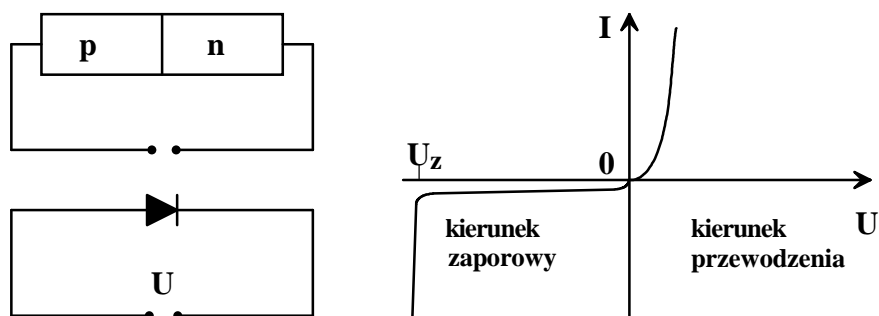
dyfuzyjnego, ale przeciwnym kierunku. Całkowite natężenie prądu płynącego przez złącze jest równe zero.



Rys.2 Złącze niespolaryzowane a): ρ - gęstość ładunków nieskompensowanych, V - potencjał, U_d - napięcie dyfuzyjne; złącze spolaryzowane zaporowo b); złącze spolaryzowane w kierunku przewodzenia c).

IV.2.2. Złącze spolaryzowane w kierunku zaporowym

W tym przypadku napięcie zewnętrzne jest zgodne co do znaku z napięciem dyfuzyjnym, a różnica potencjałów obu warstw jest równa sumie obu napięć (rys 2b). Przez złącze płynie prąd unoszenia nośników mniejszościowych w przybliżeniu niezależny od przyłożonego napięcia (prąd nasycenia rys 3).



Rys.3 Charakterystyka prądowo - napięciowa złącza p-n; U_z - napięcie Zenera dla diody Zenera

IV.2.3 Złącze spolaryzowane w kierunku przewodzenia

Jeżeli wartość bezwzględna zewnętrznej różnicy potencjałów jest większa od wartości bezwzględnej napięcia dyfuzyjnego, a znaki obu napięć są przeciwne, to przez złącze płynie prąd

unoszenia nośników większościowych o natężeniu znacznie większym od natężenia prądu unoszenia nośników mniejszościowych w przypadku polaryzacji złącza w kierunku zaporowym (rys 3).

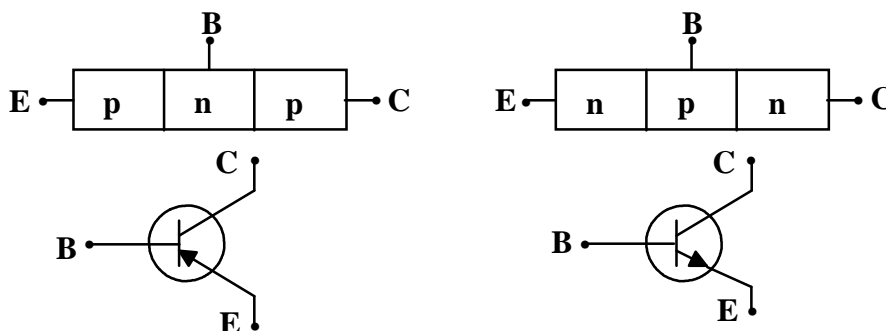
IV.2.4 Zjawisko Zenera i przebicie lawinowe

Przebicciem złącza nazywamy zjawisko gwałtownego wzrostu natężenia prądu po przekroczeniu pewnej wartości napięcia polaryzującego złącza w kierunku zaporowym. Przebicie złącza może mieć charakter lawinowy, gdy wzrost natężenia jest spowodowany lawinową generacją par elektron-dziura przez dostatecznie szybko poruszające się nośniki ładunku lub też może być następstwem zjawiska Zenera polegającego na wyrwywaniu elektronów z wiązań kowalencyjnych w polu elektrycznym o dostatecznie wysokim natężeniu.

Przebicie złącza może prowadzić do jego zniszczenia, o ile ilość wydzielonego w złączu ciepła jest zbyt duża. Oba rodzaje przebiccia - Zenera i lawinowe znalazły powszechne zastosowanie w elektronice. Ponieważ zjawisko Zenera występuje w diodzie o odpowiedniej konstrukcji przy ściśle określonym napięciu (dla danej temperatury), dlatego diody Zenera stosowane są jako wzorce napięcia, jako elementy zabezpieczające układy elektroniczne przed uszkodzeniami, mogącymi wynikać z powodu przekroczenia dopuszczalnego dla nich napięcia oraz jako elementy stabilizujące napięcie.

IV.3 Tranzystor bipolarny

Najpowszechniej stosowanym dziś tranzystorem jest tranzystor bipolarny o dwuzłączowej strukturze p-n-p lub n-p-n, w którym poszczególne obszary, różniące się stopniem i rodzajem domieszkania noszą nazwę emitera, bazy i kolektora (rys.4). Zasadniczym przeznaczeniem tranzystora jest wzmacnianie sygnałów zarówno prądu stałego jak i zmiennego, przy czym tzw. normalny zakres aktywny pracy tranzystora, jako wzmacniacza polega na spolaryzowaniu złącza emiter-baza w kierunku przewodzenia, a złącza baza-kolektor w kierunku zaporowym. Większościowe nośniki ładunku pod wpływem pola elektrycznego przechodzą z emitera do bazy, by następnie wskutek dyfuzji przejść do kolektora. Natężenie prądu płynącego przez złącze baza - kolektor praktycznie nie zależy od różnicy potencjałów między bazą a kolektorem (U), natomiast jest w pierwszym przybliżeniu wprost proporcjonalne do liczby nośników ładunków większościowych (dla emitera) dopływających do bazy. Włączenie w obwód kolektora dużej oporności daje możliwość uzyskania b. dużego wzmocnienia napięciowego, gdyż małe zmiany prądu sterującego powodują wówczas b. duże zmiany napięcia wyjściowego.



Rys. 4 Schematyczne przedstawienie tranzystora p-n-p i n-p-n: E - emiter, B - baza, C - kolektor.

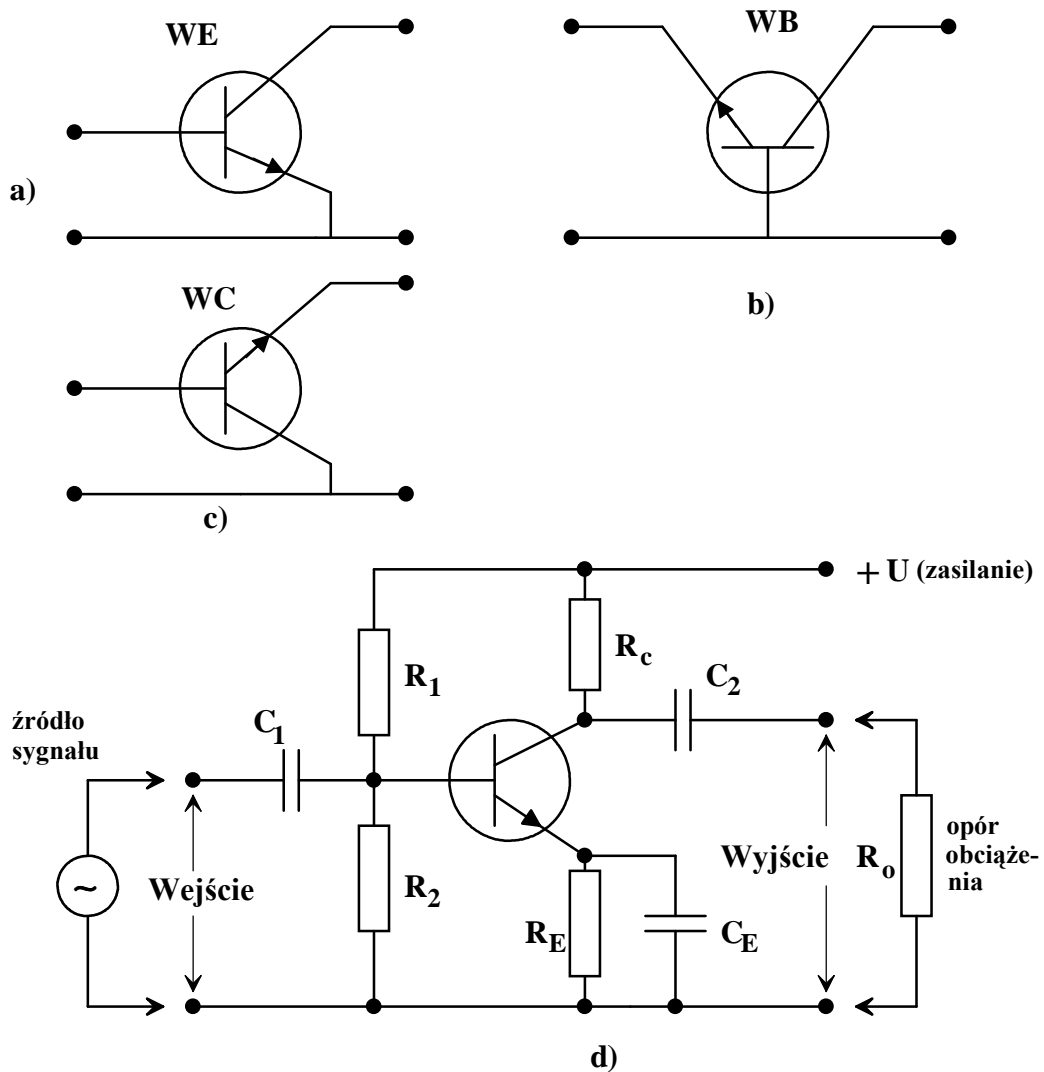
IV.3.1 Sposoby włączania tranzystora

Tranzystor bipolarny posiada trzy podstawowe wyprowadzenia elektryczne, niemniej włączony w dwuprzewodową linię przekazującą sygnały staje się czwórnikiem czyli układem o dwóch parach wyprowadzeń - parze wyprowadzeń wejściowych i parze wyprowadzeń wyjściowych (rys.5).

Wynika stąd wniosek, iż jedno z podstawowych wyprowadzeń elektrycznych tranzystora musi być wyprowadzeniem wspólnym dla wejścia i wyjścia tranzystora pełniące funkcję czwórnika.



Rys.5 Czwórnik: U_{we} - napięcie wejściowe, U_{wy} - napięcie wyjściowe, $K_u = \frac{U_{wy}}{U_{we}}$ - współczynnik wzmocnienia napięciowego, $K_i = \frac{I_{wy}}{I_{we}}$ - współczynnik wzmocnienia prądowego, R_{we} - oporność wejściowa (między zaciskami 1, 2), R_{wy} - oporność wyjściowa (pomiędzy zaciskami 3, 4).



Rys.6 Układ wspólnego emitera a), wspólnej bazy b) i wspólnego kolektora c), schemat najprostszego wzmacniacza zbudowanego na tranzystorze pracującym w układzie WE d).

W zależności od tego, czy jest to wyprowadzenie emitera, bazy lub kolektora układ nosi nazwę układu wspólnego emitera (WE rys.6a), wspólnej bazy (WB rys.6b), lub wspólnego kolektora (WC rys.6c). Schemat wzmacniacza napięciowego z tranzystorem n-p-n w układzie wspólnego emitera jest przedstawiony na rys.6d.

Właściwości poszczególnych układów są przedstawione w tabeli I.

Tabela I

Właściwości podstawowych układów tranzystora bipolarnego

Układ	Wzmocnienie prądowe K_i	Wzmocnienie napięciowe K_u	Impedancja wejściowa R_{we}	Impedancja wyjściowa
WE	duże	duże	mała	duża
WC	największe	małe	największa	najmniejsza
WB	małe	największe	najmniejsza	największa

IV.3.2 Charakterystyki statyczne tranzystora w układzie WE

Najbardziej istotnymi charakterystykami są : charakterystyka przejściowa $I_c = f(I_B)_{U_{CE} = const}$ czyli zależność natężenia prądu kolektora od prądu bazy przy stałym napięciu kolektor - emiter oraz charakterystyka wyjściowa $I_C = f(U_{CE})_{I_B = const}$ w postaci zależności prądu kolektora od napięcia kolektor - emiter przy stałym natężeniu bazy. Rodzina charakterystyk wyjściowych przedstawiona jest na rys.7.

W tabeli II przedstawiono klasyfikację zakresów pracy tranzystora w zależności od rodzaju polaryzacji jego złącz.

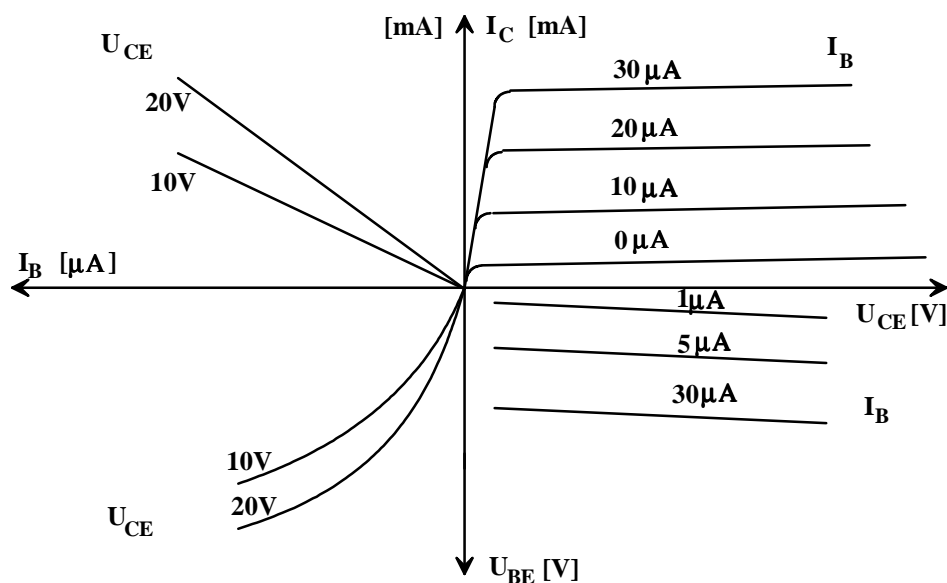
Tabela II

Polaryzacja złącza		Zakres pracy
E - B	B - C	
P	Z	aktywny normalny
P	P	nasycenia
Z	Z	zatkania
Z	P	aktywny inwersyjny

Symbole w tabeli oznaczają: P - polaryzację w kierunku przewodzenia, a Z - polaryzację w kierunku zaporowym. W normalnym zakresie pracy potencjały emitera, bazy i kolektora powinny spełniać warunek :

$$V_C > V_B > V_E \quad \text{dla tranzystora n-p-n} \quad \text{i} \quad V_C < V_B < V_E \quad \text{dla tranzystora p-n-p.}$$

Badanie charakterystyk za pomocą mierników i źródeł prądu stałego jest metodą pracochłonną (o ile nie korzysta się ze specjalnych mierników przeznaczonych wyłącznie do tego celu), a w dodatku może być mało dokładne ze względu na wzrost temperatury badanego tranzystora podczas długotrwałego pomiaru. Znacznie szybszą metodą jest pomiar specjalnym oscyloskopem, zwanym charakterografem lub też zwykłym oscyloskopem wyposażonym dodatkowo w odpowiedni układ pomocniczy.



Rys. 7 Charakterystyki tranzystora bipolarnego w układzie wspólnego emitera.

V. Pomiary

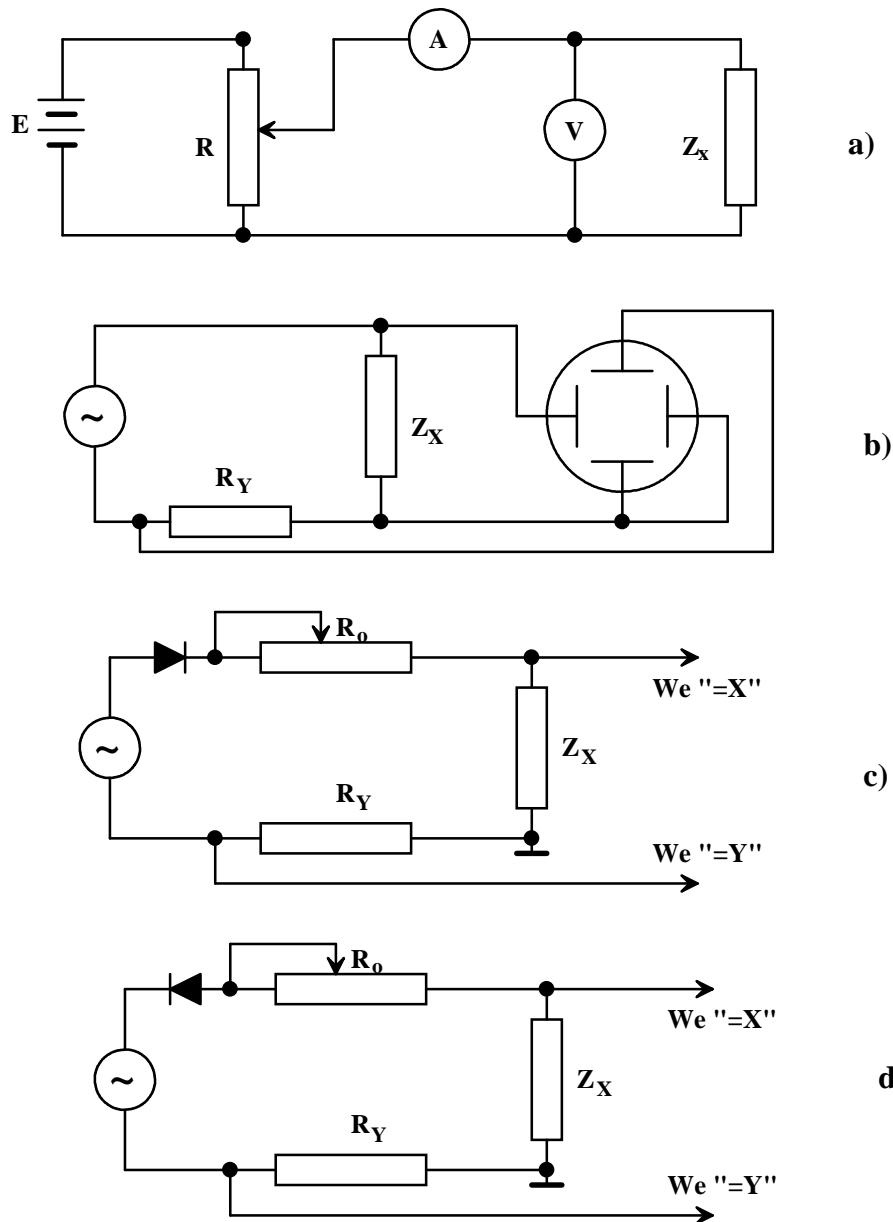
V.1 Sprawdzanie układu do wyznaczania charakterystyk prądowo-napięciowych

Metoda oscyloskopowa wyznaczania charakterystyk prądowo-napięciowych polega na zasilaniu obwodu napięciem okresowo zmiennym (dodatnim, ujemnym, przemiennym), przy czym napięcie powstające na badanym elemencie doprowadzane jest do toru odchyłania poziomego oscyloskopu, natomiast napięcie na oporniku włączonym w szereg z badanym elementem - do toru odchyłania pionowego (rys.8 i 11). Ponieważ to ostatnie napięcie jest proporcjonalne do natężenia prądu płynącego przez badany element, a ponadto posiada tą samą fazę co prąd - na ekranie oscyloskopu powstaje liniowe odwzorowanie wykresu $I = f(U)$ w skali jednoznacznie określonej przez wartości współczynników odchyłania torów X i Y oraz oporność opornika szeregowego R_Y .

Gdy badamy elementy półprzewodnikowe, to zawsze włączamy w obwód opór obciążenia R_o , ograniczając moc strat cieplnych w badanej diodzie czy tranzystorze. Dla typowych elementów oraz napięć nie przekraczających 24 V wartość oporu obciążenia nie powinna być mniejsza od 2 k Ω .

Podczas badania charakterystyki powinien być spełniony jeszcze jeden warunek. Otóż faza sygnału elektrycznego, doprowadzonego do wejścia Y oscyloskopu nie może ulec zmianie podczas przejścia przez tor odchyłania (w stosunku do sygnału, doprowadzonego do wejścia X). Innymi słowy oba tory odchyłania nie mogą wprowadzać dodatkowych przesunięć fazowych. Dlatego też podczas pomiarów oba wejścia oscyloskopu powinny być wejściami stałoprądowymi (" = ", "DC ") a jeśli oscyloskop wyposażony jest w ograniczniki pasma przenoszenia - to ograniczenia powinny być takie same dla wejść X i Y.

W celu sprawdzenia układu pomocniczego należy w pierwszej kolejności wyznaczyć (multimetrem cyfrowym - omomierzem) oporność opornika szeregowego R_Y , dołączonego do zacisku przeznaczonego dla emitera tranzystora (rys.9).

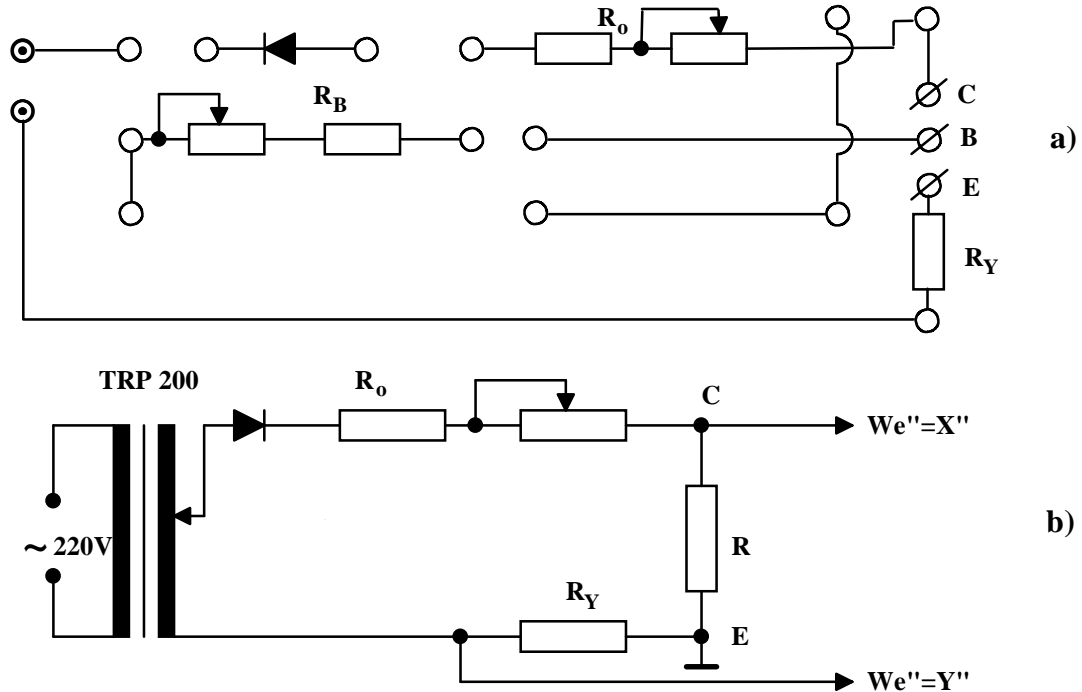


Rys.8 Wyznaczanie charakterystyki prądowo-napięciowej elementu Z_X metodą "punkt po punkcie" (a), metodą oscyloskopową napięciem przemiennym (b), napięciem dodatnim (c) i napięciem ujemnym (d).

Następnie ustalamy określoną wartość oporu obciążenia R_o pamiętając, iż nie może być ona mniejsza o $2k\Omega$. Kolejną czynnością jest sprawdzenie, czy oscyloskop nie wprowadza dodatkowych przesunięć fazowych. W tym celu do zacisków E i C (rys. 9) dołączamy opornik o wyznaczonej poprzednio oporności i budujemy obwód, przedstawiony schematycznie na rys.9b. Na podstawie obrazu otrzymanego na ekranie oscyloskopu należy ocenić, czy oscyloskop nie wprowadza przesunięć fazowych (w przypadku braku przesunięcia fazowego na ekranie pojawia się odcinek linii prostej; jeśli przesunięcie fazowe istnieje, pojawia się elipsa - rys.10), jaki jest kierunek włączenia diody prostowniczej, a ponadto obliczyć oporność badanego opornika i porównać ją z wartością wyznaczoną za pomocą omomierza cyfrowego.

UWAGA !

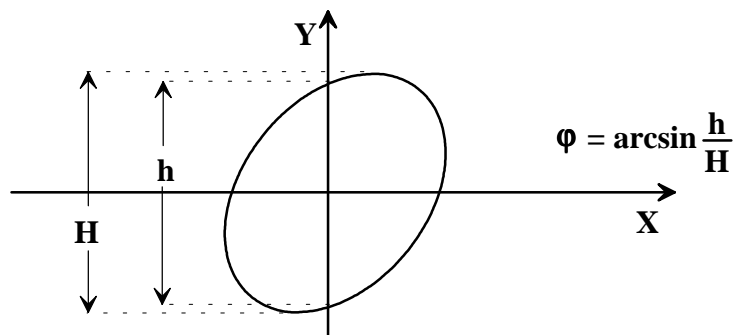
Dołączenie elementu znajdującego się pod napięciem do wejścia omomierza grozi jego uszkodzeniem. Podczas pomiaru oporności elementu wchodzącego w skład układu, układ ten musi być odłączony od zewnętrznych źródeł napięcia, a badany element nie może wchodzić w skład obwodu zamkniętego.



Rys.9 Schemat połączeń wewnętrznych płytki montażowej (a) schemat obwodu przeznaczony do sprawdzania układu pomiarowego metodą wyznaczania charakterystyki prądowo-napięciowej opornika R_o : \odot - gniazdka radiowe izolowane, \bullet - gniazdka radiowe, \emptyset - zaciski.

Wartości elementów płytki montażowej:

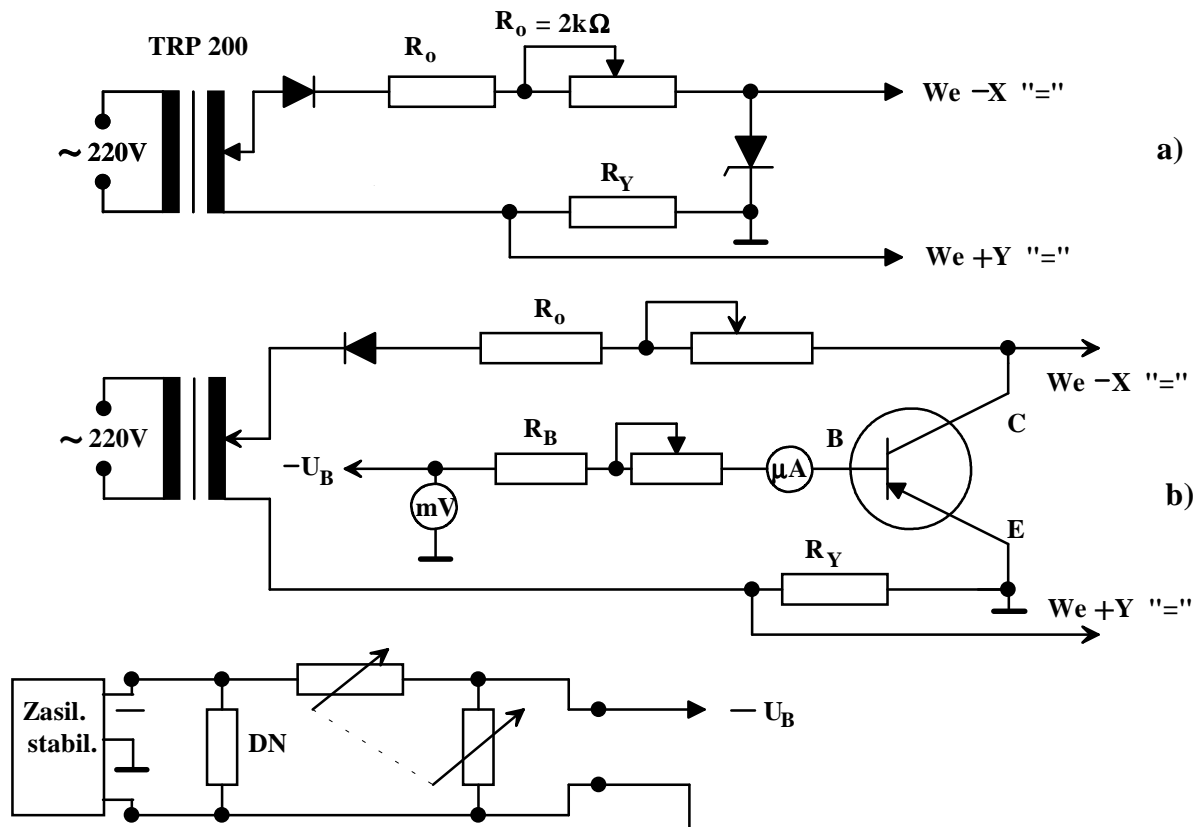
$R_o = 2k\Omega$ (w obwodzie kolektora), połączony z nim szeregowo potencjometr - 0 - 4 $k\Omega$; $R_B = 5,4 k\Omega$ (w obwodzie bazy), połączony z nim szeregowo 10- cio obrotowy potencjometr 10 $k\Omega$; $R_y = 210 \Omega$, (w obwodzie emitera).



Rys. 10 Sposób określania różnicy faz (przesunięcia fazowego) dwóch sinusoidalnie zmieniających w czasie sygnałów elektrycznych doprowadzonych do układów odchylenia poziomego i pionowego lampy oscyloskopowej.

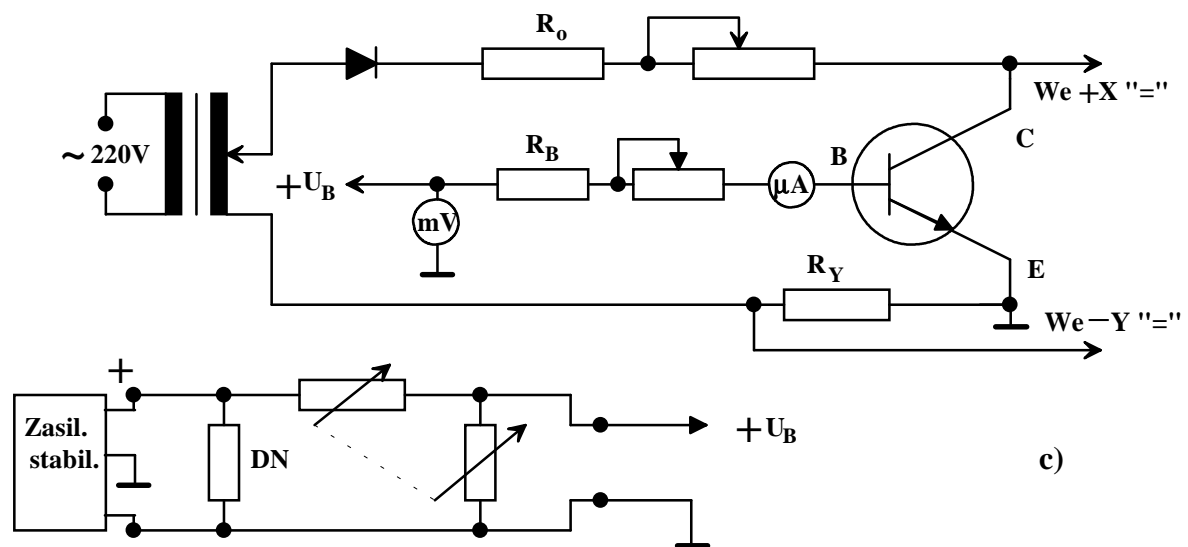
V.2 Wyznaczanie charakterystyki diody Zenera i tranzystora

- 1▪ Wyznaczyć charakterystykę diody Zenera w kierunku przewodzenia, w kierunku zaporowym oraz w obu kierunkach jednocześnie. Zmierzyć dokładnie wartość napięcia Zenera.
- 2▪ Sprawdzić za pomocą omomierza, które z zacisków dzielnika napięć są połączone bezpośrednio ze sobą (opornością bliską zera) niezależnie od stopnia podziału napięcia wejściowego. Zaciski te powinny być uziemione podczas zasilania obwodu bazy z zasilacza stabilizowanego przez dzielnik (rys.11).



Rys. 11 Schemat układu do badania: a) charakterystyki diody Zenera w kierunku przewodzenia, b) tranzystora p-n-p.

- 3▪ Za pomocą miernika MTD określić typ badanego tranzystora i sprawdzić, czy nie jest on uszkodzony. Czynności te wykonać według osobnej instrukcji, dostępnej na pracowni.
- 4▪ Wyznaczyć charakterystyki wyjściowe $I_C = f(U_{CE})$ tranzystora p-n-p, a następnie n-p-n dla minimum pięciu wartości natężenia prądu bazy i tego samego, znanego oporu obciążenia R_o .
- 5▪ Po zakończeniu pomiarów sprawdzić, jaki wpływ na charakterystyki wywiera zmiana oporu obciążenia.



Rys.11c Schemat układu do badania charakterystyki tranzystora n-p-n .

VI. Opracowanie wyników

- 1▪ Wykreślić otrzymane charakterystyki prądowo-napięciowe z podaniem typu elementu i wartości oporu obciążenia, a w przypadku diody Zenera podać wartość napięcia Zenera wraz z oceną błędów. Oszacować wartość oporności dynamicznej diody $R_d = dU/dI$ oraz oporności statycznej $R_s = U/I$, gdzie U jest spadkiem potencjału na diodzie, natomiast I natężeniem płynącego przez nią prądu.
- 2▪ Dla każdego z badanych tranzystorów wykreślić charakterystykę $I_C = f(I_E)_{CE=const}$ (przejściową) i obliczyć wartość współczynnika wzmocnienia prądowego $\beta = I_C/I_B|_{U_{CE}=const}$.
- 3▪ Przeprowadzić dyskusję wyników.