



Ćwiczenie nr 2

Charakterystyka prądowo-napięciowa złącza p-n

I. Zagadnienia do samodzielnego przygotowania

- Budowa złącza p-n, symbol diody, polaryzacja,
- Pojęcia: warstwa zubożona złącza, napięcie dyfuzyjne, nośniki prądu
- Model pasmowy złącza p-n w równowadze i dla różnych polaryzacji.
- Charakterystyka I-U oraz wzór Shockley'a – interpretacja.
- Efekty występujące w rzeczywistym złączu p-n,
- Wyprowadzenie wzoru na współczynnik doskonałości złącza (ze wzoru Shockley'a).
-

II. Program zajęć

- Pomiar charakterystyki I-U diod wykonanych z różnych półprzewodników
- Wyznaczanie parametrów diody półprzewodnikowej

III. Literatura

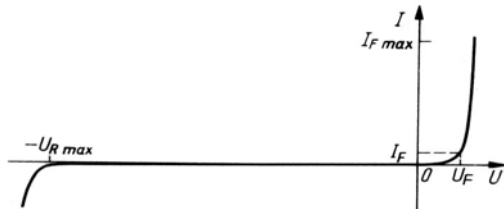
1. W. Marciniak - Przyrządy półprzewodnikowe i układy scalone
2. A. Świt, J. Pułtorak - Przyrządy półprzewodnikowe
3. T. Ohly, Z. Radzimski - Elementy elektroniczne (skrypt do laboratorium)

Wykonując pomiary **PRZESTRZEGAJ** przepisów BHP związanych z obsługą urządzeń elektrycznych.

1 Wiadomości wstępne

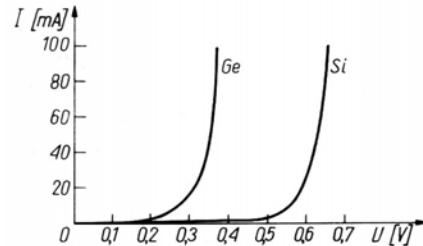
1.1 Charakterystyka prądowo-napięciowa półprzewodnikowego złącza p-n

Typowe charakterystyki prądowo-napięciowe diod półprzewodnikowych przedstawiono poniżej:



Charakterystyka I-U diody półprzewodnikowej przy polaryzacji przewodzenia i zaporowej.

W ćwiczeniu zajmujemy się dokładniejszą analizą ich przebiegu oraz pomiarami wybranych parametrów diod.



Charakterystyki I-U diody germanowej i krzemowej przy polaryzacji przewodzenia.

Natężenie prądu płynącego przez **idealne złącze p-n** w funkcji napięcia polaryzacji złącza definiuje wzór Shockley'a opisujący dyfuzyjny mechanizm przepływu nośników prądu:

$$I = I_s \left(\exp \frac{qU}{kT} - 1 \right) \quad \text{czyli} \quad I = I_s \exp \frac{qU}{kT} - I_s \quad (1)$$

$$\text{gdzie: } I_s = qS \left(\frac{D_n n_p}{L_n} + \frac{D_p p_n}{L_p} \right) \quad - \quad \text{tzw. prąd nasycenia złącza} \quad (2)$$

U – napięcie polaryzacji, T – temperatura [K], S – powierzchnia złącza,

D_p, D_n – stałe dyfuzji dziur i elektronów, L_n, L_p – drogi dyfuzji elektronów i dziur,

n_p, p_n – koncentracje nośników mniejszościowych,

$k=8,62 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$ – stała Boltzmanna, $q=1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ – ładunek elementarny.

W przypadku **rzeczywistych złącz p-n** wartość płynącego przez nie wypadkowego prądu zależy dodatkowo od kilku czynników:

- rezystancji szeregowej
- zjawisk rekombinacyjno-generacyjnych (w tym przebicia) w obszarze złącza
- zjawisk powierzchniowe

Przy polaryzacji złącza rzeczywistego w kierunku przewodzenia oprócz prądu dyfuzyjnego należy uwzględnić prąd rekombinacji (związany z rekombinacją nośników prądu w obszarze ładunku przestrzennego) oraz – szczególnie przy dużych wartościach prądu – spadek napięcia przede wszystkim na rezystancji półprzewodnika poza ładunkiem przestrzennym i na innych elementach konstrukcyjnych diody (kontakt metal-półprzewodnik, doprowadzenia, elementy oprawki).

Prąd rekombinacji I_{rek} zależy od koncentracji centrów rekombinacji w obszarze ładunku przestrzennego i może być przedstawiony w postaci:

$$I_{rek} = I' \left(\exp \frac{qU}{2kT} - 1 \right) \quad (3)$$

gdzie I' jest analogicznym czynnikiem jak I_s w zależności (1).

Prąd ten dodaje się do prądu dyfuzyjnego złącza p-n (ze wzoru Shockley'a). Wypadkowy prąd złącza w kierunku przewodzenia I_F („F” – ang. „forward”) daje się przedstawić za pomocą wzoru:

$$I_F = I + I_{rek} = I_S \left(\exp \frac{qU}{kT} - 1 \right) + I' \left(\exp \frac{qU}{2kT} - 1 \right) \quad (4)$$

Wzór ten jest podstawą modelu dwu-diodowego złącza p-n (złącze modelowane jest przez dwie diody połączone równolegle, opisane charakterystykami I-U odpowiednio do składników równania (4)).

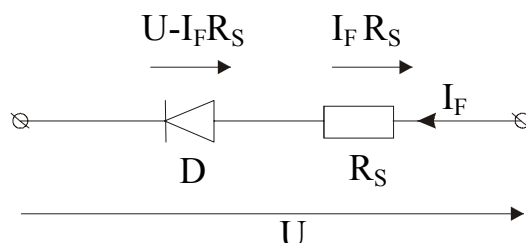
Zwykle I_F można obliczyć ze wzoru przybliżonego:

$$I_F = I'_S \left(\exp \frac{qU}{nkT} - 1 \right) \quad (5) \quad \text{ i upraszczając dalej dla } U > 100 \text{ mV: } I_F \cong I'_S \left(\exp \frac{qU}{nkT} \right) \quad (6)$$

Prąd I'_S jest pewnym zastępczym „prądem nasycenia”, a wartość współczynnika doskonałości złącza n zależy od udziału składowej dyfuzyjnej i rekombinacyjnej w prądzie płynącym przez złącze. Teoretycznie n powinno się zawierać między 1 (tylko prąd dyfuzji) i 2 (tylko prąd rekombinacji).

Analiza efektu rezystancji szeregowej w diodzie rzeczywistej:

Aby uwzględnić spadek napięcia na elementach diody poza obszarem ładunku przestrzennego zwykle wprowadza się pojęcie rezystancji szeregowej. Wiąże się to z założeniem, że ten spadek napięcia jest proporcjonalny do prądu płynącego przez złącze. Tak więc najprostszy model diody dla prądu stałego w kierunku przewodzenia wygląda jak na rysunku 1.



Rys. 1. Model diody spolaryzowanej w kierunku przewodzenia

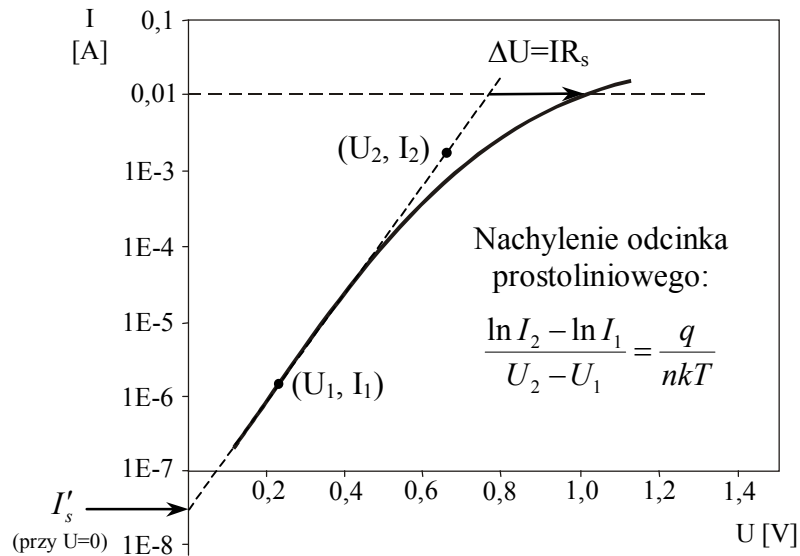
Dioda idealna D ma charakterystykę opisaną wzorem (5 lub 6), tylko zamiast napięcia U należy we wzorach podstawić wartość $(U - I_F R_S)$. Tak więc wypadkowa charakterystyka diody rzeczywistej może być opisana wzorem:

$$I_F = I'_S \left(\exp \frac{q(U - I_F R_S)}{nkT} - 1 \right) \quad (7)$$

lub, upraszczając dla większych wartości napięć:

$$I_F = I'_S \left(\exp \frac{q(U - I_F R_S)}{nkT} \right) \quad (8)$$

Jeśli tę ostatnią charakterystykę (8) narysować w układzie współrzędnych, na którym oś prądu (I_F) ma podziałkę logarytmiczną, a oś napięcia (U) jest liniowa (układ współrzędnych log-lin), otrzymamy wykres jak na rysunku 2.



Rys. 2. Charakterystyka prądowo-napięciowa diody półprzewodnikowej w układzie współrzędnych $\log(I) - U$ przy polaryzacji przewodzenia.

Po wykonaniu takiego wykresu można obliczyć z części liniowej wartość I'_s oraz n , a z części nieliniowej R_s . Odpowiednie wzory powinien wyprowadzić wykonujący ćwiczenie (dla ułatwienia – w części liniowej wykresu można pominąć rezystancję szeregową R_s).

Przy polaryzacji złącza p-n w kierunku zaporowym oprócz prądu wynikającego ze wzoru (1) należy uwzględnić prąd generacji (prąd związany z generacją nośników w obszarze ładunku przestrzennego), prąd upływu oraz zjawisko przebicia.

Przy polaryzacji zaporowej ($U < -100$ mV) prąd wynikający ze wzoru (1) jest prądem nasycenia (unoszenie nośników mniejszościowych w polu elektrycznym złącza):

$$I = I_s \left(\exp \frac{qU}{kT} - 1 \right) \cong -I_s \quad (9)$$

Prąd generacji zależy od szerokości obszaru ładunku przestrzennego i od koncentracji centrów rekombinacji. W przeciwieństwie do I_s , który nie zależy od polaryzacji, wartość prądu generacji rośnie w miarę zwiększania napięcia na złączu spolaryzowanym w kierunku zaporowym. Dla złącz p-n wykonanych z materiału o średniej i dużej wartości przerwy zabronionej (krzem, GaAs) prąd generacji dominuje i jest o kilka rzędów większy od prądu nasycenia.

Trzecia składowa prądu w kierunku zaporowym związana jest ze zjawiskiem upływu po powierzchni złącza i po defektach wewnętrznych. Ta składowa zwykle jest proporcjonalna do przyłożonego napięcia i modeluje się ją rezystancją równoległą (rezystancją upływu).

Podsumowując, prąd diody spolaryzowanej zaporowo (ale nie w zakresie przebicia) I_R („R” – ang. „reverse”) składa się z trzech składowych:

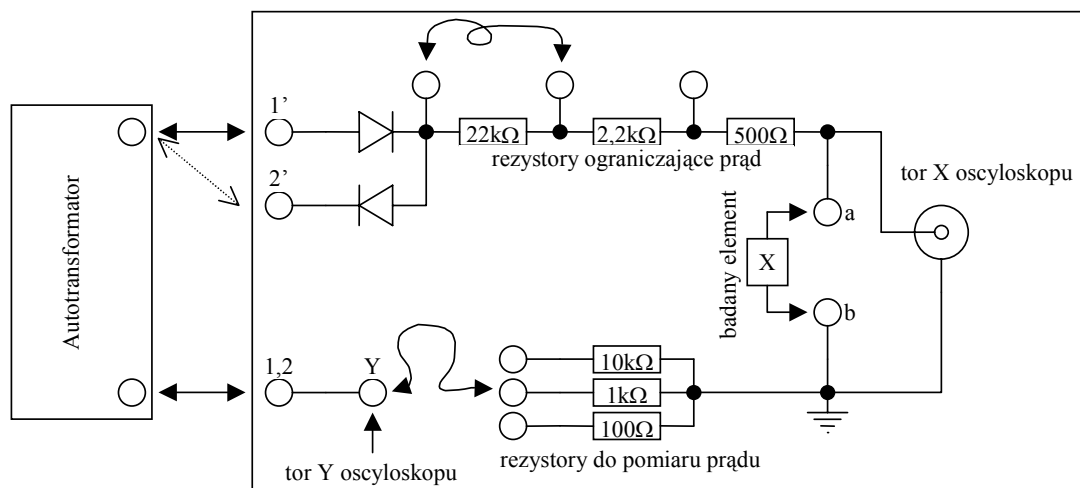
$$I_R = I_s + I_{gen} + I_{upl} \quad (10)$$

gdzie: I_s – prąd nasycenia,
 I_{gen} – prąd generacji,
 I_{upl} – prąd upływu.

2 Stosowane metody pomiarowe

2.1 Charakterograf

Płytką charakterografu wykorzystywana jest do szybkiego zestawiania układów pomiaru charakterystyk prądowo-napięciowych elementów elektronicznych. Charakterystyka odczytywana jest z ekranu oscyloskopu pracującego w trybie X-Y. Schemat płytki charakterografu przedstawiono na rysunku 3:



Rys. 3: Schemat płytki charakterografu.

Charakterograf zasilany jest z autotransformatora. Podłączając autotransformator do jednej z dwu prostowniczych diod wejściowych wybiera się odpowiedni kierunek polaryzacji wyprowadzenia 'a' badanego elementu.

Trzy rezystory połączone szeregowo tworzą ogranicznik maksymalnego prądu, jaki będzie płynął przez badany element. Wartość wypadkowej rezystancji można zmieniać zwierając poszczególne rezystory przewodem z wtykami bananowymi.

Płytką wyposażoną jest w dwa gniazda bananowe do których dołącza się badany element. Równoległe ze złączem badanego elementu dołączone jest gniazdo BNC służące do podłączenia toru oscyloskopu, na którym obrazowane będzie napięcie odłożone na badanym elemencie (zwykle tor X).

Oscyloskop posiada jedynie wejścia napięciowe. Pomiar prądu musi się więc odbywać metodą pośrednią, przy użyciu rezystora pomiarowego. Prąd płynący przez ten rezystor wywołuje wynikający z prawa Ohma spadek napięcia, który można mierzyć oscyloskopem.

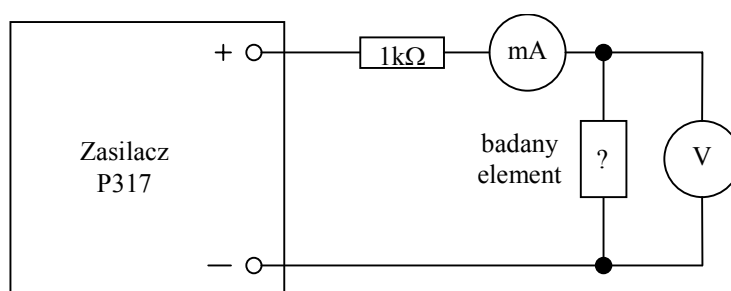
Płytką wyposażoną jest w trzy rezystory pomiarowe o wartościach rezystancji 100Ω , $1k\Omega$ i $10k\Omega$. Wyboru jednego z tych rezystorów dokonuje się łącząc odpowiednie gniazda przewodem z wtykami bananowymi. Tor oscyloskopu, na którym zobrazowany ma być prąd płynący przez badany element (zwykle tor Y), podłączany jest do punktu 'Y' przy pomocy przewodu koncentrycznego zakończonego wtykami bananowymi. Mierzmy spadek napięcia na rezystorze w stosunku do masy. Wystarczy podłączenie jedynie przewodu gorącego, ponieważ obwód masy jest zamknięty przez przewód podłączony do gniazda BNC. Przykładowo wybierając rezystor 100Ω przy przepływie prądu $1mA$ uzyskujemy spadek napięcia równy $100\Omega \cdot 1 \cdot 10^{-3} A = 0,1V$. Ustawiając czułość wejścia Y oscyloskopu na 50

mV/cm uzyskujemy odchylenie plamki w pionie o 2cm (2 działki). Wynikowa „czułość prądowa” wejścia Y w takiej konfiguracji wynosi 0,5 mA/cm.

2.2 Metoda techniczna pomiaru charakterystyk prądowo-napięciowych

Inną metodą wykorzystywaną do pomiaru charakterystyk prądowo-napięciowych jest metoda techniczna. Polega ona na wykonaniu szeregu pomiarów prądów i napięć w kolejnych punktach charakterystyki, a następnie naniesieniu wyników tych pomiarów na wykres.

Jako źródło zasilania układu pomiarowego używa się zasilacza laboratoryjnego z regulowanym napięciem wyjściowym, z możliwością ustawienia ograniczenia prądowego (np. zasilacz P317). Schemat układu pomiarowego, stosowanego w tej metodzie, przedstawiono na rysunku 4:



Rys. 4: Schemat układu pomiarowego przy pomiarze charakterystyki I-U metodą techniczną

Rezystor 1kΩ ułatwia wymuszenie przepływu przez badany element prądu o wymaganym natężeniu, zmniejsza też prawdopodobieństwo przypadkowych uszkodzeń wynikających z nieprawidłowości zestawionego układu pomiarowego.

Odpowiednią wartość natężenia prądu uzyskuje się przez regulację napięcia zasilacza laboratoryjnego. Wartość natężenia prądu płynącego w układzie będzie wynikała ze spadku napięcia na rezystorze 1kΩ. **Uwaga: nie wolno przekroczyć 1W mocy traconej w rezystorze.** Wiadomo, że dla rezystora:

$$P = I^2 R \Rightarrow I_{\max} = \sqrt{\frac{P_{\max}}{R}} = \sqrt{\frac{1W}{1000\Omega}} = 0,032 A \cong 30 mA.$$

Wynika z tego, że w czasie pomiarów konieczne jest ustawienie ograniczenia prądowego w zasilaczu na 30 mA, lub mniej, gdy badany element wymaga ograniczenia prądowego na niższym poziomie.

Jeżeli potrzebne jest zbadanie charakterystyki dla większych wartości prądów niż 30 mA, z układu usuwa się rezystor 1kΩ, a wymagane natężenie prądu uzyskuje przez odpowiednie ustawienie ograniczenia prądowego w zasilaczu pracującego stale w trybie ograniczenia prądowego.

2.3 Wykorzystanie multimetru VC-10T, 1321 lub 1331 jako źródła prądowego

Większość multimetrów cyfrowych (np. VC-10T, 1321, 1331) pracując w trybie pomiaru rezystancji mierzy i pokazuje na wyświetlaczu spadek napięcia na badanym elemencie wywołany przepływem prądu ze źródła prądowego wbudowanego w multimetr. Oprócz funkcji pomiaru rezystancji można tę cechę przyrządu wykorzystać do pomiaru charakterystyk prądowo-napięciowych dla bardzo małych prądów.

Multimetry VC-10T, 1321 i 1331 posiadają źródło prądowe o wydajności zależnej od wybranego zakresu pomiarowego:

Zakres	200 Ω	2 k Ω	20 k Ω	200 k Ω	1 M Ω	2 M Ω	20 M Ω
VC-10T	10 mA	1 mA	100 μ A	10 μ A	1 μ A		
1321	10 mA	1 mA	100 μ A	10 μ A		1 μ A	100 nA
1331	10 mA	1 mA	100 μ A	10 μ A		1 μ A	100 nA

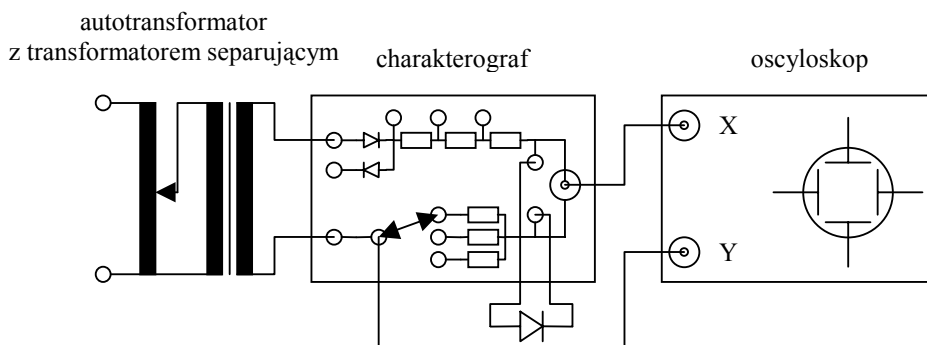
Badany element podłączany jest pomiędzy zaciski „HI” („W” w miernikach 1321, 1331) i „LO” („N”). Przepływający prąd wywołuje na badanym elemencie spadek napięcia o polaryzacji przeciwnej, niż wynikałoby to z oznaczeń złącz multimetru: + na złączu „LO” („N”), - na złączu „HI” („W”).

Liczba wyświetlana przez multimetr odpowiada napięciu mierzonemu na badanym elemencie, wyrażonemu w miliwoltach, przy czym należy brać pod uwagę jedynie cyfry, a nie przecinek, np. wartość 12,34 oznacza, że spadek napięcia na badanym elemencie, przy prądzie wynikającym z wybranego zakresu pomiarowego, wynosi 1234 mV. Ponieważ dla tych multimetrów, pracujących w trybie pomiaru rezystancji, zakres prawidłowo wskazywanych napięć wynosi 0-2,999V, nadają się one do pomiaru spadków napięcia na przewodzących złączach półprzewodnikowych. Przekroczenie zakresu wskazań woltomierza (2999mV) oznacza, że źródło prądowe **nie zapewnia ustalonej dla danego zakresu wartości prądu**.

3 Pomiary

3.1 Pomiar charakterystyk I-U diod półprzewodnikowych w liniowym układzie współrzędnych przy pomocy charakterografu

Zestawić układ pomiarowy z wykorzystaniem płytki charakterografu. **Nie zwierać rezystorów ograniczających prąd** (patrz rys. 3) , a jako rezystor pomiarowy wybrać 100 Ω .



Rys. 5: Schemat układu do pomiaru charakterystyk I-U diod półprzewodnikowych w kierunku przewodzenia

Oscyloskop pracuje w trybie X-Y. Łącząc charakterograf z wejściem Y oscyloskopu można podłączyć jedynie wtyczkę bananową przewodu gorącego. Obwód masy jest już zamknięty kablem koncentrycznym podłączonym do wejścia X.

3.1.1 Pomiar charakterystyki I-U w kierunku przewodzenia

Ustawić wstępnie odpowiednie czułości torów oscyloskopu, np.: X=0,2 V/cm, Y=0,1 V/cm. W układzie jak na rysunku 5 zmierzyć na ekranie oscyloskopu i odrysować na jednym wykresie charakterystyki diod krzemowej i germanowej oraz diody LED z płytki z diodami. **Uwaga! Zmiany połączeń można dokonywać tylko po zmniejszeniu napięcia autotransformatora do minimum.**

Odczytać napięcie U_F dla każdej z diod dla wartości prądu $I_F = 1$ mA (lub 5 mA)

3.1.2 Pomiar charakterystyki I-U w kierunku zaporowym

ZmieniĆ kierunek polaryzacji diod. Ustawić wstępnie odpowiednie czułości torów oscyloskopu, np.: $X=5 \text{ V/cm}$, $Y=0,1 \text{ V/cm}$.

Mierzyć napięcia przebicia diod krzemowych – diody uniwersalnej i diody Zenera.

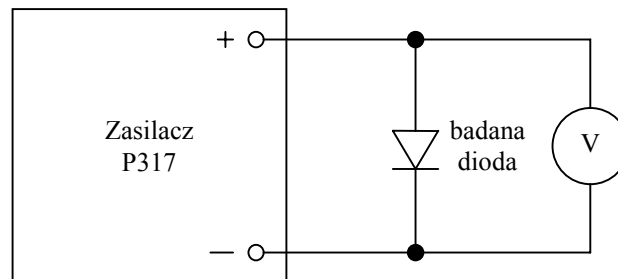
3.2 Pomiar charakterystyk I-U diod półprzewodnikowych w układzie współrzędnych log-lin

Do pomiarów wybrać jedną z dostępnych diod, wskazaną przez prowadzącego. Odczytać z danych katalogowych maksymalny dopuszczalny prąd I_F dla badanej diody.

Charakterystyka I-U dla zakresów małych prądów mierzona jest przy użyciu multimetru cyfrowego, jak opisano w punkcie 2.3. Wyniki pomiarów nanosić od razu na wykres (taki, jak na rys. 2).

Dla zakresu prądów $10\text{mA} \div 0,5I_{F\text{max}}$ charakterystyka mierzona jest przy użyciu zasilacza pracującego w trybie ograniczenia prądu. Układ pomiarowy na Rys.6.

Nie przekraczać 50% dopuszczalnego prądu przewodzenia diody!!!



Rys. 6: Układ do pomiaru charakterystyki I-U diody

Z wykresu wyznaczyć rezystancję szeregową diody, R_S , współczynnik n oraz wartość prądu I_S' (patrz rys. 2).