

Nazwisko .....

Data .....

Nr na liście .....

Imię .....

Wydział .....

Dzień tyg. ....

Godzina .....

## Ćwiczenie 241

Wyznaczanie ładunku elektronu na podstawie  
charakterystyki złącza p-n (diody półprzewodnikowej)

---

Opór opornika  $R$  .....  $\Omega$ Temperatura w pomieszczeniu  $T$  ..... K

Położenie pokrętki	Napięcie na diodzie, $U$ [V]	Napięcie na oporniku, $U_I$ [V]	Natężenie prądu przez diodę $I$ [mA]	Logarytm naturalny natężenia prądu, $\ln I$
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

Obliczony ładunek elektronu,  $q_e = \dots \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Oszacowana niepewność pomiarowa,  $\Delta q_e = \dots \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Wartość tablicowa ładunku elektronu,  $q_{e,tabl} = \dots \cdot 10^{-19} \text{ C}$

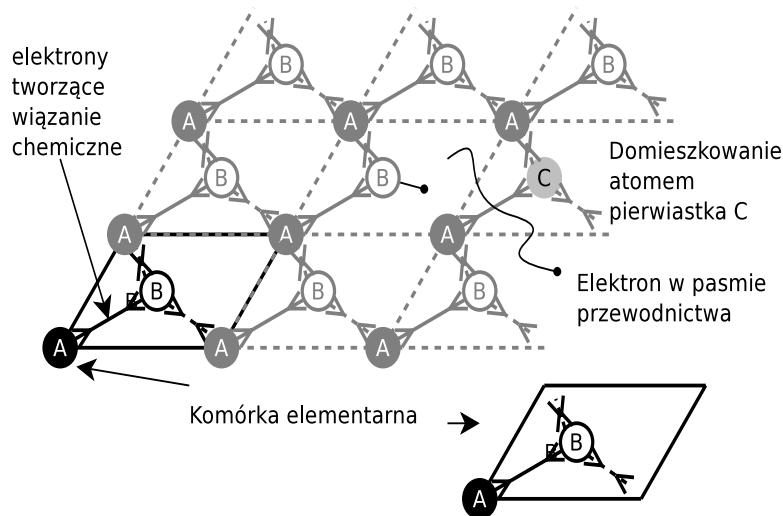
## Ćwiczenie 241. Wyznaczanie ładunku elektronu na podstawie charakterystyki złącza p-n (diody półprzewodnikowej)

### CEL

Celem ćwiczenia <dioda> jest pomiar charakterystyki prądowo–napięciowej  $I(U)$  dla diody półprzewodnikowej w wybranym zakresie napięć i wyznaczenie na tej podstawie wartości bezwzględnej ładunku elektronu  $q_e$ , czyli tzw. **ładunku elementarnego**.

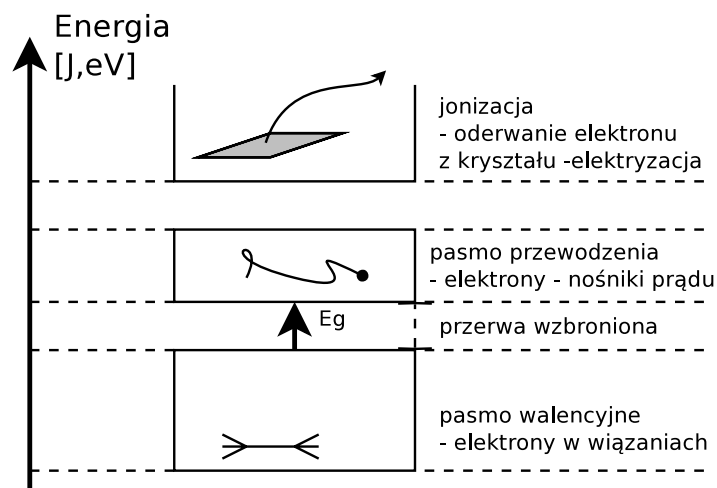
### TEORIA

**Kryształ** jest to układ wielu jąder atomowych ułożonych w regularną sieć, pomiędzy którymi znajdują się elektrony, tworzące **wiązania chemiczne (kowalencyjne, jonowe lub metaliczne)**.



Rysunek 1. Kryształ.

**Struktura pasmowa energii** – elektrony nie mogą przybierać dowolnej energii całkowitej, a jedynie energie z pewnych zakresów zwanych **pasmami**.



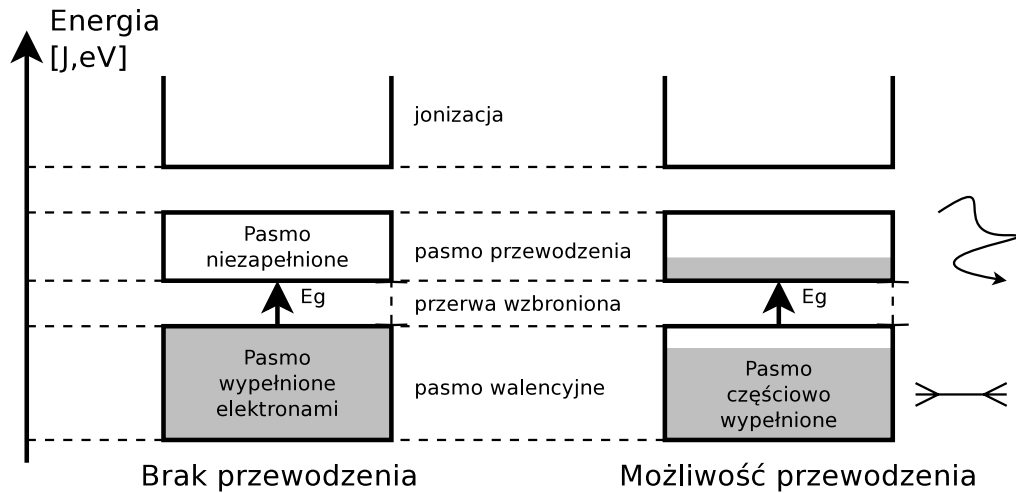
Rysunek 2. Pasma energetyczne w kryształach

Pasma energetyczne możemy podzielić na :

- **pasma walencyjne** - zakresy energii odpowiadające elektronom bardzo mocno związanym tylko z jednym atomem albo tworzącymi wiązania między atomami,

- **pasme przewodzenia** - zakresy energii odpowiadające elektronom, które mogą swobodnie poruszać się w kryształach.

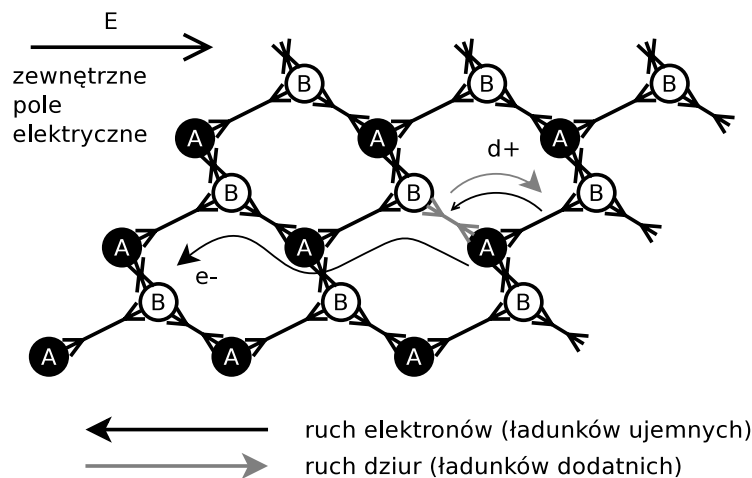
Pasma walencyjne i przewodzenia obejmują coraz wyższe zakresy energii. Pomiędzy pasmami występują zazwyczaj tzw. **przerwy wzbronione** - są to takie zakresy energii, które nie odpowiadają żadnym stanom elektronowym dozwolonym dla danego kryształu. Do przeprowadzenia elektronu z pasma walencyjnego do pasma przewodzenia (Rysunek 2) konieczna jest odpowiednia energia większa od szerokości przerwy wzbronionej  $E_g$ .



**Rysunek 3.** Pasma energetyczne. Na rysunku przedstawiony jest uproszczony model – po jednym paśmie walencyjnym i przewodnictwa przedzielonym przerwą wzbronioną o szerokości  $E_g$

Elektrony znajdujące się na całkowicie wypełnionym paśmie nie mogą przewodzić prądu. Można ten efekt tłumaczyć tym, że nieduża zmiana energii wywołana zewnętrznym polem elektrycznym nie może przenieść elektronu na stan odpowiadający ruchowi w danym kierunku będący w danym paśmie, bo stan ten jest już zajęty. W celu uzyskania przewodnictwa pasmo należy częściowo opróżnić - można uzyskać na dwa sposoby:

1. przyłożenie odpowiednio dużego pola elektrycznego (czyli odpowiednio bardzo wysokiego napięcia) –tzw. **przebite izolatora**.
2. odpowiednie podgrzanie materiału – takie że elektron otrzyma porcję energii większą niż  $E_g$  i zostanie przeniesiony do pasma przewodnictwa.



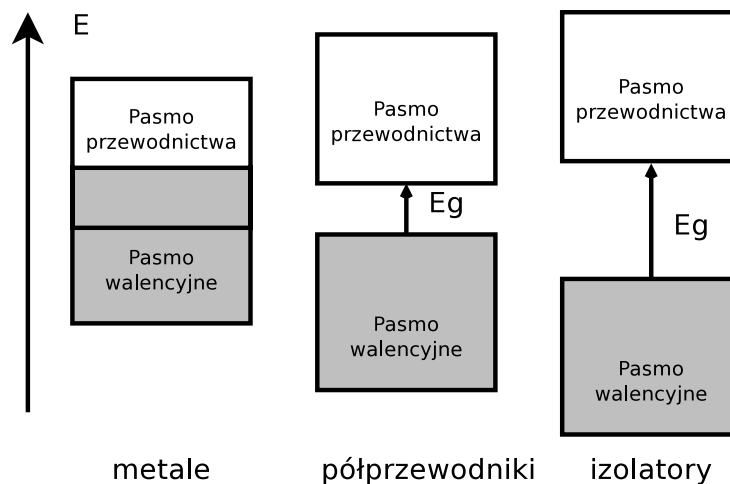
**Rysunek 4.** Prąd elektronowy i dziurowy

Elektrony w paśmie przewodnictwa poruszają się w kierunku przeciwnym do linii zewnętrznego pola elektrycznego  $\vec{E}$  i tworzą **prąd elektronowy** – patrz 4.

Puste miejsca po wiązaniach chemicznych w paśmie walencyjnym mogą się zapełniać elektronami z sąsiednich wiązań. Pod wpływem zewnętrznego pola elektrycznego wiązania zaczynają przeskakiwać do sąsiednich pustych miejsc. Dodatkowo naładowany obszar brakującego wiązania, zwany **dziurą**, przesuwa się zgodnie z kierunkiem pola  $\vec{E}$  (4) dając **prąd dziurowy**. Oba zjawiska dają prądy elektryczne (rozumiane zgodnie z konwencją jako ruch ładunków dodatnich) płynące zgodnie z polem  $\vec{E}$ .

Szerokość przerwy wzbronionej, podobnie jak energie poziomów i pasm i inne wielkości w fizyce atomowej wyraża się zwykle w **elektronowoltach (eV)**. Jest to wartość pracy potrzebna do przeniesienia ładunku  $q_e$  (jednego elektronu) pomiędzy elektrodami o napięciu 1 V, i wynosi

$$1eV = 1q_e \cdot 1V \approx 1.6 \cdot 10^{-19} J .$$



**Rysunek 5.** Podział krysztalów ze względu na szerokość przerwy energetycznej

Ze względu na szerokość przerwy energetycznej  $E_g$  krysztaly możemy podzielić na:

**metale**  $E_g = 0eV$ ,

**półprzewodniki** :  $0.1eV \leq E_g \leq 4eV$ ,

**izolatory**:  $4eV \leq E_g$

(patrz Rysunek 5). W przypadku metali pasma walencyjne i przewodnictwa pokrywają się. Elektron w metalu może zostać przeniesiony do pasma przewodnictwa bez wkładu energii. Powyższy podział wynika z porównania energii pasma wzbronionego ze **średnią energią termiczną**:

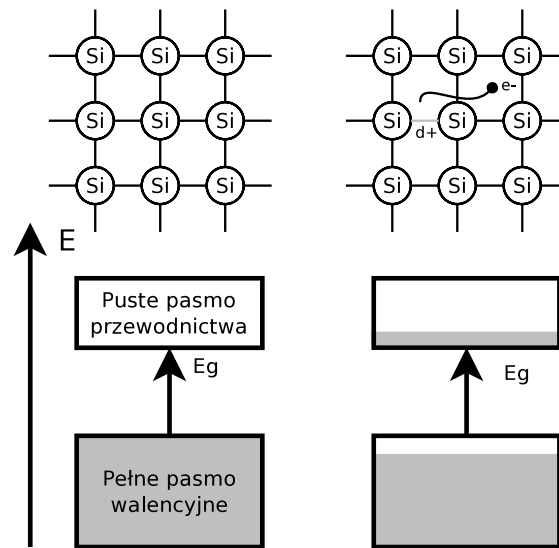
$$E_T = k_B T,$$

gdzie  $T$  – temperatura krysztalu w kelwinach,  $k_B = 1.38 \cdot 10^{-23} J / K$  – **stała Boltzmannna**.

Dla  $T=300 K$  (czyli ok  $27^\circ C$ ) temperatura termiczna wynosi około  $E_T = 0.0256eV$ .

Energia ta jest proporcjonalna do średniej energii drgań atomów. Im wyższa temperatura – tym wyższe prawdopodobieństwo przeniesienia elektronu z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa.

Przykładem tzw. **półprzewodnika samoistnego** jest czysty krzem (Si) –Rysunek 6. Atom krzemu posiada na ostatniej powłoce 4 elektrony które uczestniczą w tworzeniu wiązań.

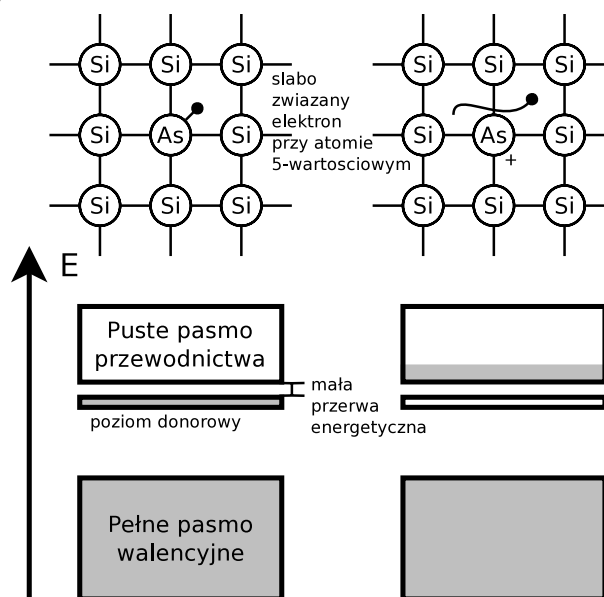


Rysunek 6. Półprzewodnik samoistny

Jeżeli w półprzewodniku samoistnym przeniesiemy elektron do pasma przewodnictwa, to w paśmie walencyjnym powstanie dziura. Wolne elektrony i dziury powstają w półprzewodnikach samoistnych w podobnych proporcjach. Prądy elektronowe i dziurowe na ogół nie są takie same – dziury są zazwyczaj mniej ruchliwe niż elektrony. W praktyce przerwa energetyczna dla samoistnych półprzewodników jest duża w porównaniu z energią termiczną w temperaturze pokojowej. Czysty krzem posiada przerwę energetyczną  $E_g \approx 1.1eV \gg E_T$ , dlatego bardzo słabo przewodzi prąd w warunkach normalnych.

Przewodnictwo półprzewodnika zmienia się gwałtownie przy dodaniu **domieszek**, czyli obcych atomów w miejscu krzemu w sieci krystalicznej – p. Rysunek 1, atom C. Wstawiony atom daje nam dodatkowe poziomy energetyczne pomiędzy pasmem walencyjnym a przewodnictwa, dodatkowo umieszczone bardzo blisko któregoś z tych pasm.

Jeżeli atom krzemu zastąpimy atomem 5-elektronowym (fosfor P, arsen As) – otrzymamy wypełniony elektronami **poziom donorowy** („dawca elektronów”) leżący zaraz pod pasmem przewodnictwa – patrz Rysunek 7.



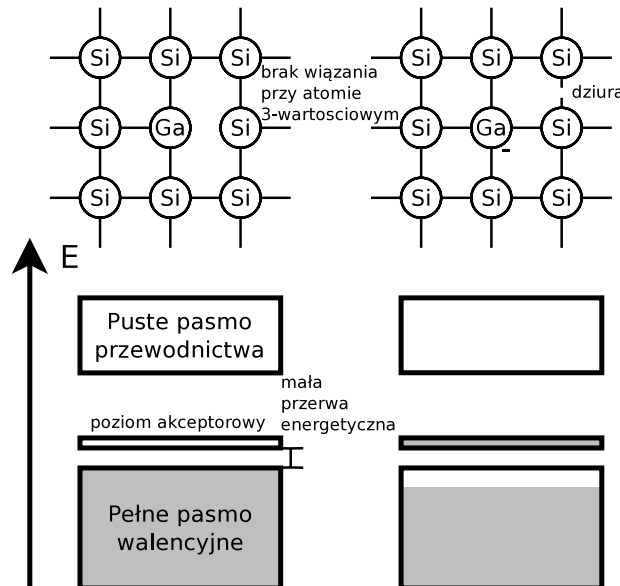
Rysunek 7. Półprzewodnik typu n

Z poziomu tego łatwo przenieść elektron do pasma przewodnictwa – wystarczy do tego energia

termiczna  $E_T$  w temperaturze pokojowej, bo przerwa energetyczna jest mała. Elektron ten będzie nośnikiem prądu elektronowego. Jest to tzw. **półprzewodnik *n*-domieszkowany (typu *n*)**.

Dominującymi nośnikami ładunku są w nim elektrony.

Analogicznie, jeżeli domieszkujemy atomem 3-elektronowym (glin Al, gal Ga) – dostajemy pusty **poziom akceptorowy** („biorca elektronów”) leżący tuż nad poziomem walencyjnym Rysunek 8. Do tego poziomu, z użyciem niewielkiej energii, można przenieść elektrony z poziomu walencyjnego i wytworzyć dziury. Jest to tzw. **półprzewodnik *p*-domieszkowany (typu *p*)**. Dominującymi nośnikami ładunku są w nim dziury.



Rysunek 8. Półprzewodnik typu *p*

### Złącze pn – dioda.

Jednym z podstawowych elementów układów elektronicznych jest **dioda półprzewodnikowa**.

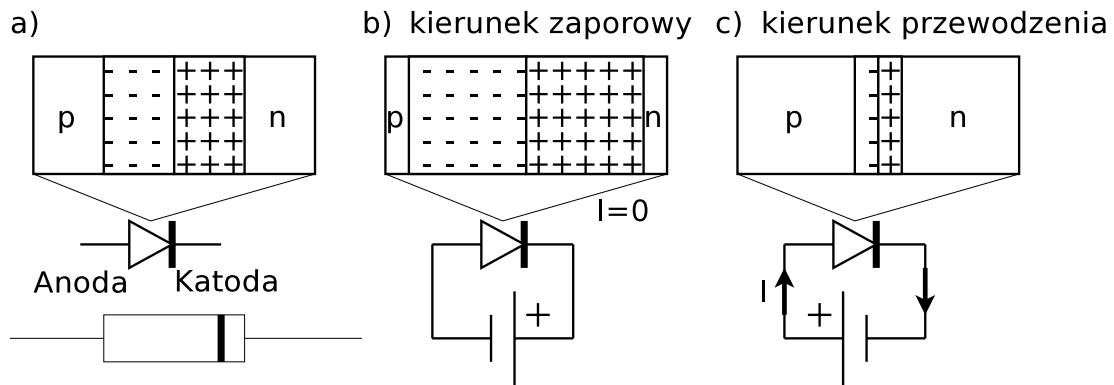
Posiada ona dwie elektrody: **anodę** i **katodę** – p.Rysunek9a, na dole.

Zwykle dioda posiada walcową obudowę, na której katoda jest oznaczana kreską.

Dioda półprzewodnikowa jest złączeniem półprzewodników dwóch różnych typów — typu *p* (anody) i typu *n* (katody). Jeżeli półprzewodnik typu *p* złączymy z półprzewodnikiem typu *n*, nastąpi przepływ elektronów z materiału typu *n* do materiału typu *p* oraz dziur w kierunku przeciwnym. W wyniku tego, na styku wytwarza się warstwa podwójnego, nieruchomego ładunku przestrzennego tzw. warstwa zaporowa, która przeciwdziała dalszemu przemieszczaniu się ładunków swobodnych, p.Rysunek9a, u góry.

Pole elektryczne w złączeniu *p-n* oznacza występowanie pomiędzy obszarami *p* i *n* różnicy potencjałów, zwanej **napięciem kontaktowym (złączowym)  $U_k$**  lub **barierą potencjału**.

Dla większości krzemowych bariera potencjału wynosi  $U_k = 0,7 \div 0,8$  V.



Rysunek 9. Działanie diody półprzewodnikowej - łącza  $p-n$

Jeżeli do złącza  $p-n$  zostanie przyłożone stałe napięcie, tak aby biegun dodatni baterii był podłączony do półprzewodnika typu  $n$ , a biegun ujemny do półprzewodnika typu  $p$  (Rysunek9b), dziury i elektrony będą odciągane od granicy złącza do wnętrza półprzewodników, w rezultacie czego, szerokość warstwy zaporowej wzrasta, wzrasta również jej opór. Taki kierunek polaryzacji złącza, zwany *kierunkiem zaporowym*, sprzyja przepływowi elektronów z półprzewodnika  $p$  do  $n$  i dziur w kierunku przeciwnym. Ponieważ elektrony w materiale typu  $p$  i dziury w materiale typu  $n$  są nośnikami mniejszościowymi, przez złącze może płynąć prąd o bardzo małym natężeniu.

Jeżeli spolaryzujemy złącze  $p-n$  w kierunku przeciwnym (Rysunek9c), szerokość warstwy podwójnego ładunku ulega zmniejszeniu, opór złącza maleje. Taki kierunek polaryzacji złącza zwany kierunkiem przewodzenia, sprzyja przepływowi nośników większościowych tzn. elektronów z materiału typu  $n$  do  $p$  i dziur z materiału  $p$  do  $n$ , co daje szybki wzrost natężenia prądu wraz ze wzrostem napięcia.

Dioda półprzewodnikowa przepuszcza prąd w jednym kierunku, w kierunku przeciwnym prąd praktycznie nie płynie.

Charakterystykę prądowo–napięciową diody, tzn. wykres zależności gęstości natężenia prądu (prąd na jednostkę przekroju przewodnika) od napięcia, dla realnej diody, pokazuje Rysunek 30.

**Równanie Shockley'a** przedstawia zależność prądowo-napięciową dla idealnej diody.

Równanie ma następującą postać:

$$I(U) = I_S \cdot \left[ \exp\left(\frac{q_e U}{k_B T}\right) - 1 \right]$$

gdzie:

$I$  – prąd płynący przez diodę,

$I_S$  – **prąd nasycenia** – płynący przy polaryzacji zaporowej,

$U$  – napięcie przyłożone do diody,

$q_e$  – ładunek elektronu, (oznaczany czasem  $e$ )

$k_B T$  – zdefiniowana wcześniej energia termiczna.

Zakładamy, że w badanym zakresie napięć badana dioda jest idealną diodą.

Diodę krzemową będziemy badali dla zakresu napięć od 0.3 V wzwyż, podczas gdy  $\frac{k_B T}{q_e}$  wynosi w

warunkach pokojowych około 0.0256 V, czyli ponad 10 razy mniej. Możemy zatem założyć, że

$\exp\left(\frac{q_e U}{k_B T}\right) \gg 1$  i używać przybliżonej postaci wzoru Shockley'a:

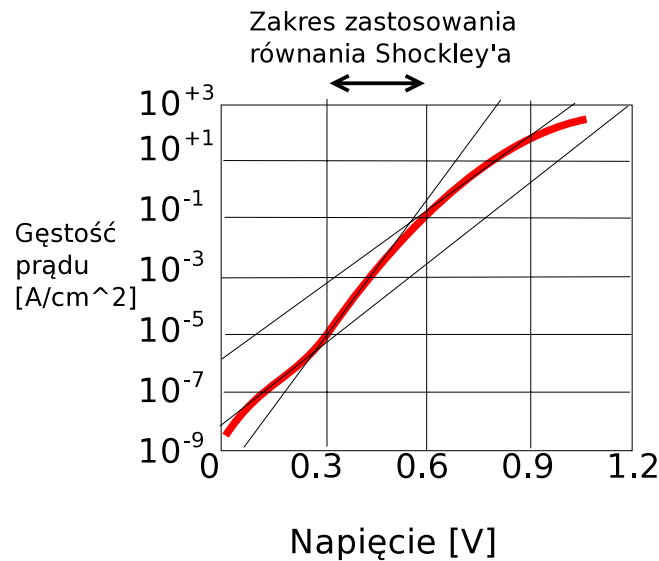
$$I(U) = I_S \cdot \exp\left(\frac{q_e U}{k_B T}\right).$$

Powyższe równanie, po zlogarytmowaniu obu stron, sprowadza się do postaci:

$$\ln I(U) = \frac{q_e}{k_B T} U + \ln I_S,$$

czyli do zależności liniowej  $y=ax+b$ , gdzie  $y=\ln I(U)$ ,  $x = U$ ,  $a = \frac{q_e}{k_B T}$ .

Metodą dopasowania prostej wyznaczmy współczynnik  $a$ , na podstawie którego wyznaczmy ładunek elektronu  $q_e$ , znając temperaturę i stałą  $k_B$ .



**Rysunek 30.** Charakterystyka prądowo-napięciowa dla realnej diody; w naszym przypadku będziemy badać diodę dla oznaczonego zakresu w którym spełnione jest równanie Shockleya (dla napięć 0.3-0.6 V)



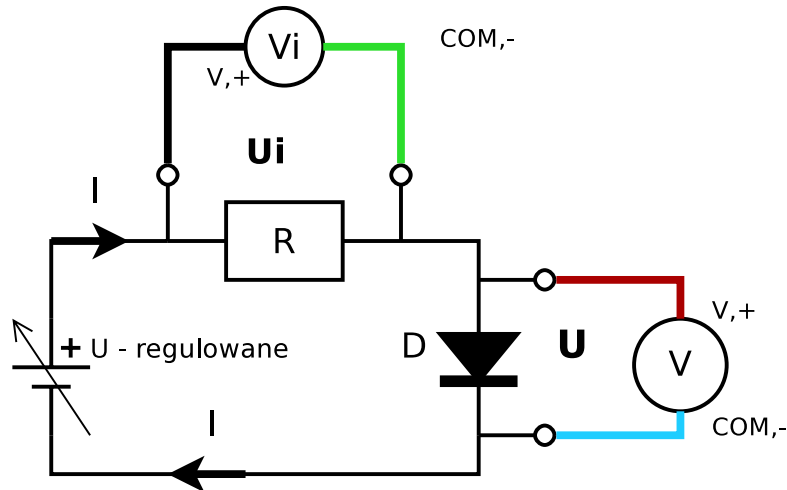
**WYKONANIE ĆWICZENIA**

1. Zestaw pomiarowy to pudełko z regulatorem napięcia i czterema wyprowadzeniami (na zdjęciu po prawej w dolnej części)
2. Zestaw składa się z regulowanego źródła napięcia stałego  $U$ , diody  $D$  i opornika  $R$ .

**UWAGA: POD ŻADNYM POZOREM****NIE PODŁĄCZAĆ DO UKŁADU****JAKIEGOKOLWIEK ZASILACZA****UŻYWANEGO DO INNYCH ĆWICZEŃ !!!**

3. Do układu podłączamy równolegle dwa mierniki uniwersalne ustawione jako **woltomierze napięcia stałego** – pozycja  $V=$ .  
**Ustawienie miernika jako amperomierza w tym przypadku grozi uszkodzeniem miernika i/lub układu !!!**
4. Końcówki mierników podłączamy:  
 $V,+$  od strony bieguna (+) zasilania – czyli od strony anody diody (czarny trójkąt),  
**COM,-** od strony bieguna (-) zasilania – czyli od strony katody diody (czarna kreska).

Jeśli połączenie będzie na odwrót to mierniki będą wskazywać ujemne napięcia – w tym ćwiczeniu znak nie jest istotny więc go pomijamy. Schemat układu jest pokazany na rysunku.



5. **Po zaakceptowaniu układu** przez prowadzącego zajęcia włączamy wtyczkę sieciową
6. Dla kolejnych położeń pokrętła regulującego napięcie zasilania zapisujemy napięcia  $U_i$  oraz  $U$
7. Odczytujemy z obudowy opór opornika  $R$  i zapisujemy go do tabeli.
8. Z termometru wskazanego przez prowadzącego odczytujemy temperaturę  $T$  i zapisujemy ją do tabeli.

**ANALIZA DANYCH I RACHUNEK BŁĘDU**

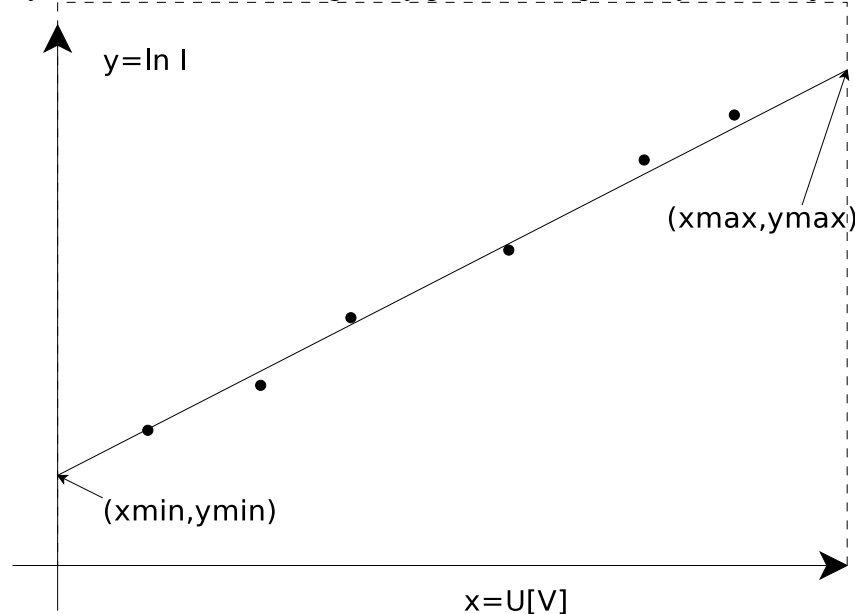
1. Dla wszystkich 10 pomiarów wykonujemy następujące obliczenia:

a. Prąd płynący przez diodę :  $I = \frac{U_i}{R}$

b. **Logarytm naturalny** prądu  $I$ :  $\ln I$ 

– obliczenia wykonujemy używając funkcji [**ln**] z kalkulatora naukowego, **nie używać** logarytmu dziesiętnego [**log**].

2. Rysujemy zależność  $\ln I$  od  $U$  – punkty pomiarowe powinny leżeć na jednej linii:



3. Dopasujemy do punktów pomiarowych funkcję liniową  $y=ax+b$  (czyli prostą)

w celu znalezienia współczynnika  $a$ . Tutaj  $y=\ln I$ ,  $x=U$ ,  $a = \frac{q_e}{kT}$ .

Robimy to graficznie – dopasowując prostą „na oko” z użyciem przezroczystej linijki.

4. Na prostej wybieramy dwa punkty: jeden dla możliwie małej wartości  $U$ , drugi dla możliwie dużej wartości  $U$ . Dla obu punktów odczytujemy z wykresu odpowiednio: wartości  $x_{min}$  i  $y_{min}$  oraz  $x_{max}$  i  $y_{max}$ . Nachylenie prostej, czyli wartość współczynnika  $a$  obliczamy ze wzoru:

$$a = (y_{max} - y_{min}) / (x_{max} - x_{min})$$

5. Z wyznaczonej wartości współczynnika  $a$ , temperatury  $T$  i stałej Boltzmana  $k_B$  obliczamy ładunek elektronu:

$$q_e = a \cdot k_B \cdot T$$

6. Obliczamy jaki wpływ na dokładność pomiaru ładunku elektronu mają niedokładności stosowanych mierników (błąd względny):  $\frac{\Delta q_e}{q_e} = \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta T}{T} = 2 \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta T}{T}$ .

Przyjmujemy, że dokładności względne przy pomiarach napięcia  $\Delta U/U$  to 1%, temperatury  $\Delta T/T$  to 1%, a dla oporu opornika  $\Delta R/R$  znamy z dokładnością 5%.

7. Porównujemy obliczony ładunek elektronu (z uwzględnieniem jego błędu  $\frac{\Delta q_e}{q_e}$ ) z wartością tablicową (podaj źródło wartości tablicowej!).

### Pytania do wniosków:

- Czy znaleziony ładunek elementarny jest zgodny z wartością tablicową (tzn. czy mieści się w odległości  $\Delta q_e$  od wartości tablicowej) ?

- Jakie przybliżenia, zastosowane w tej metodzie pomiarowej, mają wpływ na uzyskany wynik?