

Wydział WFIS	Imię i nazwisko 1. Mateusz Kulig 2. Przemysław Ryś		Rok 2022	Grupa 3	Zespół 1
<b>PRACOWNIA FIZYCZNA WFIS AGH</b>	Temat: Stosunek ładunku elektronu do stałej Boltzmanna				Nr ćwiczenia 125
Data wykonania 20.03.2022	Data oddania	Zwrot do popr.	Data oddania	Data zaliczenia	OCENA

W sprawozdaniu wyznaczyliśmy za pomocą obwodu pomiarowego z termostatem wartość stosunku ładunku elementarnego do stałej Boltzmanna. Dokonaliśmy szeregu pomiarów dla trzech różnych temperatur do momentu przekroczenia wartości prądu na skali. Następnie za ich pomocą utworzyliśmy wykresy zależności otrzymanej z przekształcenia wzoru na prąd dyfuzyjny, a potem pozyskaliśmy nachylenia owych prostych za pomocą których mogliśmy otrzymać szukany związek. Wartość otrzymana eksperymentalnie pokrywa się z wartością tablicową w granicach niepewności rozszerzonej dla  $k = 2$ .

## 1. Wstęp teoretyczny

Półprzewodnikami nazywamy klasę substancji o specyficznych właściwościach elektrycznych. Nośnikami prądu w półprzewodnikach są elektrony i dodatnio naładowane kwazicząstki zwane dziurami. Mieszając ze sobą odpowiednie pierwiastki (np. fosfor i krzem) możemy otrzymać półprzewodnik n, czyli taki który posiada więcej elektronów. Dodając z kolei atomy innego pierwiastka (np. boru) otrzymujemy półprzewodnik typu p a więc taki w którym dominują dziury. Łatwo zauważyć że złącze p-n jest po prostu połączeniem dwóch półprzewodników, a elementem elektronicznym wykorzystującym jedno złącze nazywamy dioda półprzewodnikowa. Charakteryzuje się ona tym, że łatwo przepuszcza prąd w jednym kierunku (kierunek przewodzenia), natomiast prąd płynący w drugą stronę ma bardzo małe natężenie (kierunek zaporowy).

Jednym z najprostszych modeli złącza p-n jest model dyfuzyjny. Bierze pod uwagę fakt, że elektrony i dziury zachowują się jak gazy o średniej energii kinetycznej  $\frac{3}{2} T k_B$ . Przemieszczające się w stronę obszaru mniejszej koncentracji elektrony i dziury powodują powstanie obszaru zubożonego w którym jest bardzo mało nośników. Strumień większościowych ładunków tworzy prąd dyfuzyjny, który działa podobnie jak strumień molekuł w zjawisku dyfuzji w gazach. Ilościową zależność prądu dyfuzji od wysokości bariery potencjału określa czynnik wynikający z rozkładu Boltzmanna

$$I_{dyf} = const \exp\left(\frac{eU}{T k_B}\right). \quad (1)$$

Z powyższego wzoru wynika, że do wyznaczenia stosunku ładunku elementarnego do stałej Boltzmanna za pomocą złącza półprzewodnikowego wystarczy zdjąć charakterystykę prądowo-napięciową dowolnej diody. Niestety, pojawi się wtedy błąd systematyczny, spowodowany tym że prąd dyfuzyjny nie jest jedynym prądem występującym w złączu p-n. oprócz niego na prąd całkowity składa

się prąd wsteczny, prąd powierzchniowy i prąd związany z generacją i rekombinacją nośników w warstwie zaporowej. Jednak za pomocą tranzystora można pozbyć się tego problemu i mierząc napięcie  $U_{EB}$ , czyli różnicę potencjałów pomiędzy emiterem a bazą. Otrzymujemy wówczas zależność

$$I_k = \text{const} \exp\left(\frac{eU_{EB}}{Tk_B}\right). \quad (2)$$

W powyższej formule  $I_k$  oznacza prąd płynący z emitera do kolektora. Logarytmując obustronnie wzór (2) otrzymamy liniową zależność

$$\ln I_k = \text{const} \frac{e}{Tk_B} U_{EB}. \quad (3)$$

Tak więc dokonując pomiarów natężenia prądu i różnicy potencjałów, możemy wyznaczyć stosunek ładunku elementarnego do stałej Boltzmanna jako współczynnik nachylenia prostej opisanej formułą (3) pomnożony przez wartość temperatury.

## 2. Aparatura

W celu wykonania doświadczenia użyliśmy następujących przedmiotów:

- Termostat – składający się z dwóch koncentrycznie oddzielonych naczyń.
- Termometr – mierzy temperaturę kąpieli olejowej.
- Mieszadło.
- Obwód pomiarowy składający się z zasilacza regulowanego, potencjometru, woltomierza cyfrowego i mikroamperomierza lusterkowego.

## 3. Metodyka doświadczenia

Przeprowadzenie doświadczenia polegało na wyznaczeniu stosunku ładunku elektronu do stałej Boltzmanna. W tym celu należało przeprowadzić pomiary przepływu prądu dla trzech różnych temperatur: pokojowej, w temperaturze 0 °C oraz 40 °C. Dla każdej opcji przebieg doświadczenia był analogiczny. Uruchomiliśmy układ elektroniczny, zestawiliśmy układ według schematu pokazanego na rysunku z opisu doświadczenia. Włączyliśmy zasilanie woltomierza cyfrowego i oświetliliśmy skalę amperomierza unikając przy tym oświetlenia termometru, gdyż mogłoby to zaburzyć pomiary. Ustawiliśmy pokrętkę na początkową wartość napięcia wynoszącą 0,3 [V] i sukcesywnie zmieniając jego wartość ze skokiem 0,02 [V] zbieraliśmy odpowiadające im dane pomiarowe. Dla każdej serii zbieraliśmy je do momentu płynięcia prądu.

#### 4. Analiza danych

Dane pomiarowe zebrane w wyniku przeprowadzonego doświadczenia zebrane zostały w poniższych tabelach.

W poniższej analizie przyjmuję poniższe wartości tablicowe odpowiednich stałych:

$$e = 1,602177 \cdot 10^{-19} \text{ [C]} \quad [1]$$

$$k = 1,380649 \cdot 10^{-23} \left[ \frac{\text{J}}{\text{K}} \right] \quad [2]$$

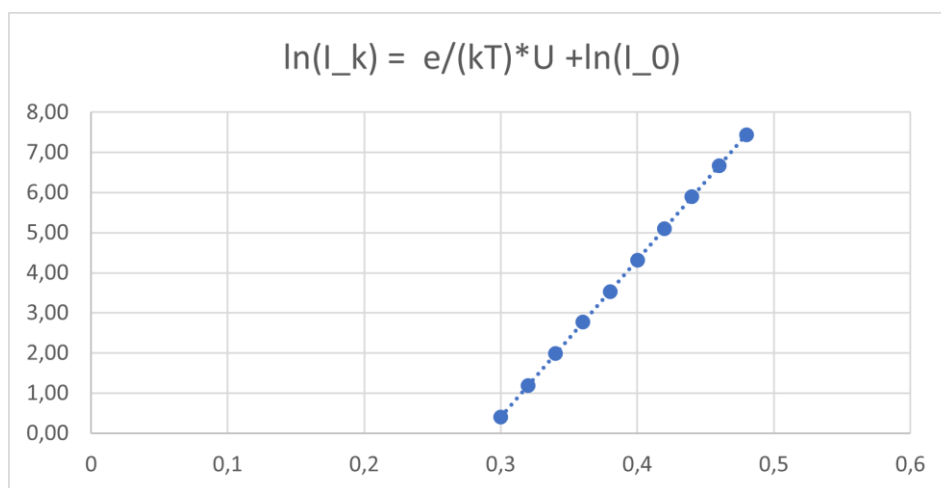
$$T = t + 273,15 \text{ [K]} \quad [3]$$

Obliczając wartość poszukiwanego stosunku  $\frac{e}{k}$  za pomocą stałych tablicowych otrzymujemy, iż jest on równy:

$$X_0 = \frac{e}{k} = 11604,52 \left[ \frac{\text{C} \cdot \text{K}}{\text{J}} \right].$$

**Tab. 1.** Tabela danych napięć i natężeń prądu dla przypadku pokojowej temperatury ( $t = 23 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

U [V]	0,3	0,32	0,34	0,36	0,38	0,4	0,42	0,44	0,46	0,48
I [ $\mu\text{A}$ ] (seria 1)	1,48	3,27	7,36	16	34	75	165	362	776	1700
I [ $\mu\text{A}$ ] (seria 2)	1,51	3,26	7,24	16	34	75	165	363	790	1704
I [ $\mu\text{A}$ ] (średnie)	1,495	3,265	7,3	16	34	75	165	362,5	783	1702
ln(I)	0,4	1,18	1,99	2,77	3,53	4,32	5,11	5,89	6,66	7,44

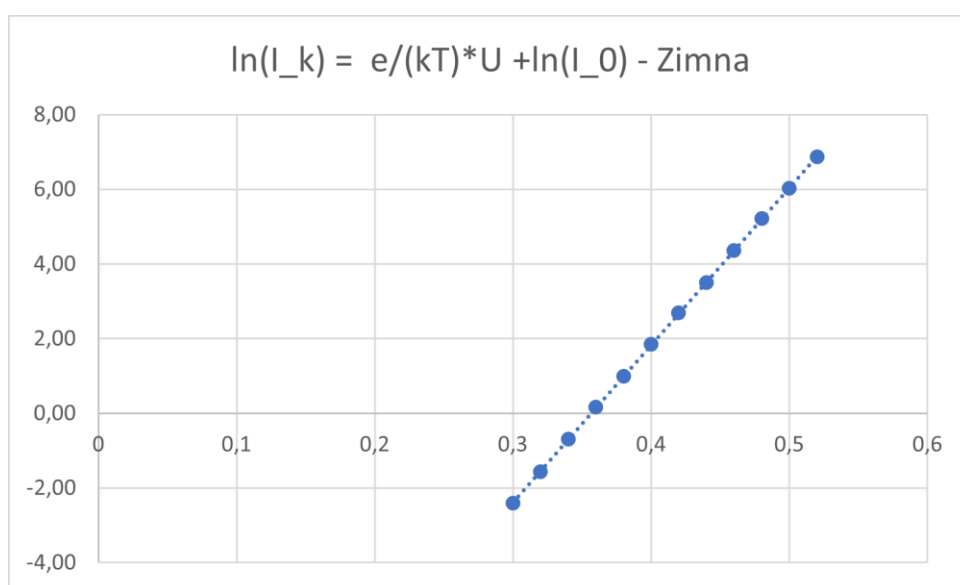


**Rys. 1.** Wykres przedstawiający zależność logarytmu naturalnego z natężenia zależącego od zmiennego napięcia dla przypadku pokojowej temperatury ( $t = 23 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Współczynnik nachylenia powyższej prostej uzyskany metodą prostej regresji funkcją „REGLINP()” w programie „Excel” wynosi  $a = 39,09 \left[ \frac{C}{J} \right]$ .

**Tab. 2.** Tabela danych napięć i natężeń prądu dla przypadku temperatury 3 °C.

U [V]	0,3	0,32	0,34	0,36	0,38	0,4	0,42	0,44	0,46	0,48	0,5	0,52
I [μA] (seria 1)	0,09	0,21	0,51	1,2	2,76	6,49	14,84	34	79	185	417	975
I [μA] (seria 2)	0,09	0,21	0,49	1,16	2,67	6,32	14,55	33	77	182	420	965
I [μA] (średnie)	0,09	0,21	0,5	1,18	2,715	6,405	14,695	33,5	78	183,5	418,5	970
ln(I)	-2,41	-1,56	-0,69	0,17	1,00	1,86	2,69	3,51	4,36	5,21	6,04	6,88

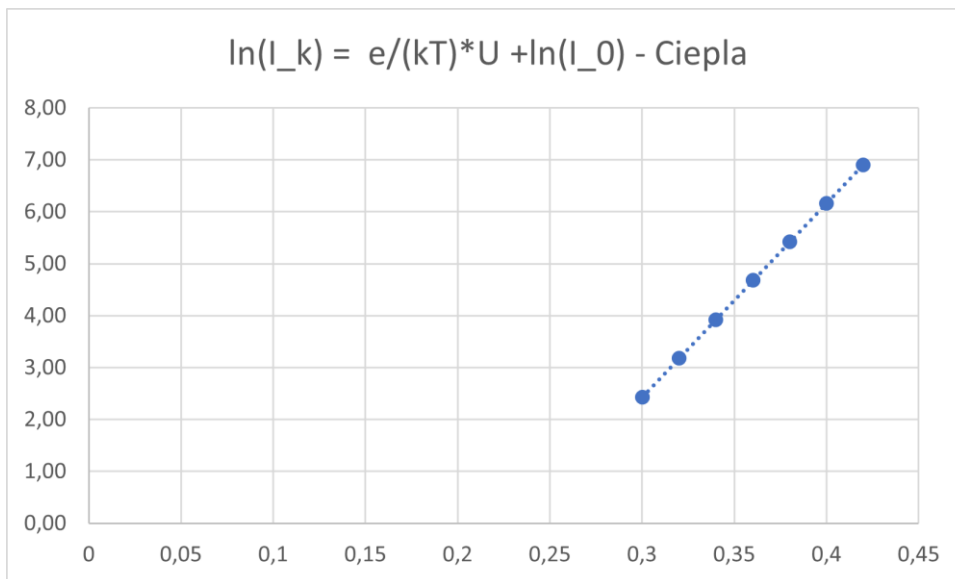


**Rys. 2.** Wykres przedstawiający zależność logarytmu naturalnego z natężenia zależącego od zmiennego napięcia dla przypadku temperatury 3 °C.

Współczynnik nachylenia powyższej prostej uzyskany metodą prostej regresji funkcją „REGLINP()” w programie „Excel” wynosi  $a = 42,16 \left[ \frac{C}{J} \right]$ .

**Tab. 3.** Tabela danych napięć i natężeń prądu dla przypadku temperatury 42 °C.

U [V]	0,3	0,32	0,34	0,36	0,38	0,4	0,42
I [μA] (seria 1)	11,58	24	51	107	226	473	991
I [μA] (seria 2)	11,25	24	50	108	225	481	993
I [μA] (średnie)	11,415	24	50,5	107,5	225,5	477	992
ln(I)	2,43	3,18	3,92	4,68	5,42	6,17	6,9



**Rys. 3.** Wykres przedstawiający zależność logarytmu naturalnego z natężenia zależącego od zmiennego napięcia dla przypadku temperatury 42 °C.

Współczynnik nachylenia powyższej prostej uzyskany metodą prostej regresji funkcją „REGLINP()” w programie „Excel” wynosi  $a = 37,27 \left[ \frac{\text{C}}{\text{J}} \right]$ .

Otrzymany współczynnik nachylenia powinien być równy wartości wyrażenia  $\frac{e}{k \cdot T}$ , gdzie  $e$  jest ładunkiem elementarnym,  $k$  jest stałą Boltzmanna, a  $T$  temperaturą bezwzględną, których wartości umieszczone zostały na początku tego punktu.

$$T_1 = 273,15 + 23 = 296,15 \text{ [K]},$$

$$T_2 = 273,15 + 3 = 276,15 \text{ [K]},$$

$$T_3 = 273,15 + 42 = 315,15 \text{ [K]}.$$

Poszukiwany stosunek ładunku elementarnego do stałej Boltzmanna otrzymamy mnożąc współczynnik nachylenia prostej przez temperaturę bezwzględną, w której owa seria danych została otrzymana, a zatem:

$$X_1 = a \cdot T_1 = 11577,52 \left[ \frac{\text{C} \cdot \text{K}}{\text{J}} \right],$$

$$X_2 = a \cdot T_2 = 11643,48 \left[ \frac{\text{C} \cdot \text{K}}{\text{J}} \right],$$

$$X_3 = a \cdot T_3 = 11744,77 \left[ \frac{\text{C} \cdot \text{K}}{\text{J}} \right].$$

Średnia wartość trzech powyższych wyników pomiarów wynosi:

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3} = 11655,25 \left[ \frac{\text{C} \cdot \text{K}}{\text{J}} \right].$$

Odchylenie standardowe średniej wyznaczone metodą niepewności typu A dla owych trzech pomiarów wynosi:

$$u(\bar{X}) = 48,64 \left[ \frac{\text{C} \cdot \text{K}}{\text{J}} \right].$$

Korzystając z metody niepewności rozszerzonej o czynnik skalujący  $k = 2$  otrzymuję eksperymentalnie wyznaczony stosunek owych stałych:

$$\frac{e}{k} = (11655,25 \pm 97,28) \left[ \frac{\text{C} \cdot \text{K}}{\text{J}} \right].$$

## 5. Podsumowanie

W wyniku przeprowadzonego eksperymentu oraz metodą prostej regresji udało się otrzymać stosunek ładunku elementarnego do stałej Boltzmanna, wraz z niepewnością rozszerzoną o czynnik skalujący  $k = 2$ , równy  $(11655,25 \pm 97,28) \left[ \frac{\text{C} \cdot \text{K}}{\text{J}} \right]$ . Dla sprawdzenia poprawności wyniku porównujemy go do wartości tablicowej  $11604,52 \left[ \frac{\text{C} \cdot \text{K}}{\text{J}} \right]$ . Wartość tablicowa zawiera się w przedziale wyznaczonym przez niepewność rozszerzoną otrzymanego eksperymentalnie wyniku, co utwierdza nas w przekonaniu o poprawności wyniku.

## 6. Literatura

1. [https://pl.wikipedia.org/wiki/Ładunek\\_elektryczny\\_elementarny](https://pl.wikipedia.org/wiki/Ładunek_elektryczny_elementarny) - 20.03.2022 r.
2. [https://pl.wikipedia.org/wiki/Stała\\_Boltzmanna](https://pl.wikipedia.org/wiki/Stała_Boltzmanna) - 20.03.2022 r.
3. [https://pl.wikipedia.org/wiki/Zero\\_bezwzględne](https://pl.wikipedia.org/wiki/Zero_bezwzględne) - 20.03.2022 r.