

Wydział WFIIS	Imię i nazwisko 1. Mateusz Kulig 2. Przemysław Ryś		Rok 2022	Grupa 3	Zespół 1
PRACOWNIA FIZYCZNA WFIIS AGH	Temat: Stosunek ładunku elektronu do stałej Boltzmanna				Nr ćwiczenia 125
Data wykonania 03.04.2022	Data oddania	Zwrot do popr.	Data oddania	Data zaliczenia	OCENA

W sprawozdaniu wyznaczyliśmy za pomocą tranzystora wartość stosunku ładunku elementarnego do stałej Boltzmanna. Zdjęliśmy charakterystykę prądowo-napięciową dla różnicy potencjałów między emiterym a bazą. Metodę wyznaczenia pomiarów oparliśmy o fizykę półprzewodników. Wartość otrzymana eksperymentalnie pokrywa się z wartością tablicową w granicach niepewności rozszerzonej dla czynnika skalującego $k = 2$.

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. Mieszając z kolei atomy innego pierwiastka (np. boru i krzemu) 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. Tranzystor jest elementem elektronicznym złożonym z trzech elementów, są nimi: baza, emiter i kolektor. W stanie aktywnym złącze emiter-baza jest spolaryzowane w kierunku przewodzenia, a złącze baza-kolektor – w kierunku zaporowym. Napięcie baza-emiter powoduje przepływ nośników większościowych emitery przez to złącze do bazy (elektrony w tranzystorach n-p-n

lub dziury w tranzystorach p-n-p). Nośników przechodzących w przeciwną stronę, od bazy do emitera jest niewiele, ze względu na słabe domieszkowanie bazy. Nośniki „wstrzyknięte” z emitera do obszaru bazy dyfundują do obszarów mniejszej ich koncentracji w kierunku kolektora. Trafiają do obszaru złącza baza-kolektor, a tu na skutek pola elektrycznego w obszarze zubożonym są przyciągane do kolektora. W rezultacie, po przyłożeniu do złącza baza-emiter napięcia w kierunku przewodzenia, popłynie niewielki prąd między bazą a emiterem, umożliwiając przepływ dużego prądu między kolektorem a emiterem.

Za jego pomocą 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 dyfuzyjnego i różnicy potencjałów między emiterem, a bazą, 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:

- Dwa izolujące naczynia.
- Termometr – mierzy temperaturę kąpielii wodnej.
- Mieszadło.
- Obwód pomiarowy składający się z zasilacza regulowanego, potencjometru i woltomierza cyfrowego.

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 (tabeli 1, 2 oraz 3).

W dalszej analizie przyjmuję poniższe wartości tablicowe odpowiednich stałych:

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

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

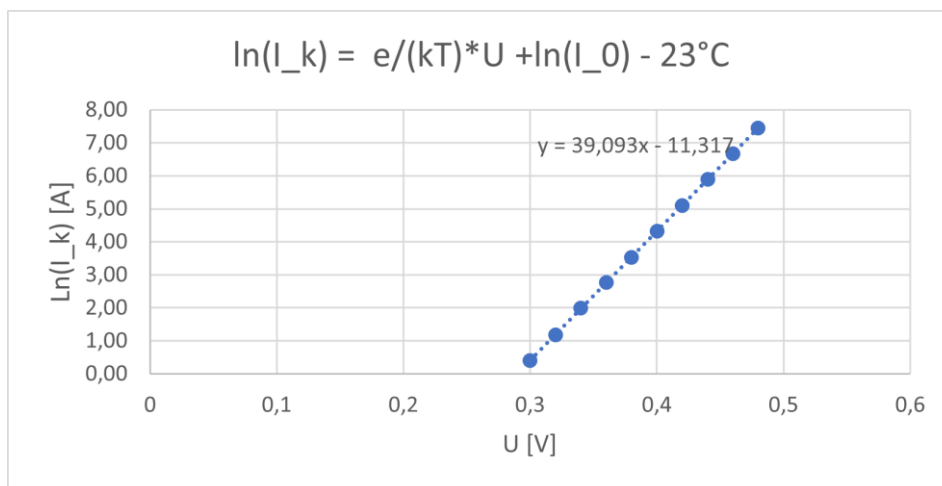
$$T = t + 273,15 \text{ [K]} \quad [3]$$

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 [μA] (seria 1)	1,48	3,27	7,36	16	34	75	165	362	776	1700
I [μA] (seria 2)	1,51	3,26	7,24	16	34	75	165	363	790	1704
I [μA] (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

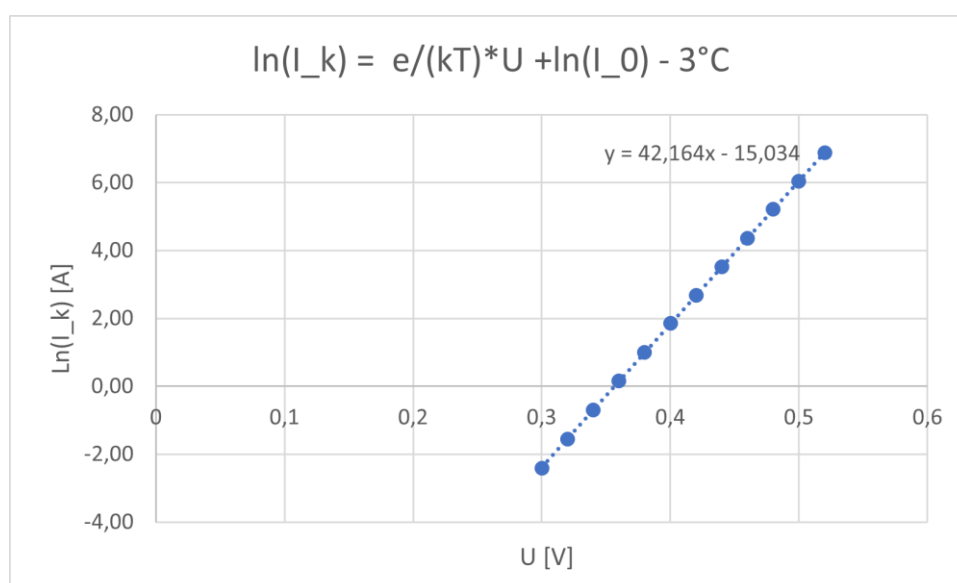


Rys. 1. Wykres przedstawiający zależność logarytmu naturalnego z natężenia zależącego od zmiennego napięcia dla przypadku pokojowej temperatury ($t = 23^\circ\text{C}$).

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

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

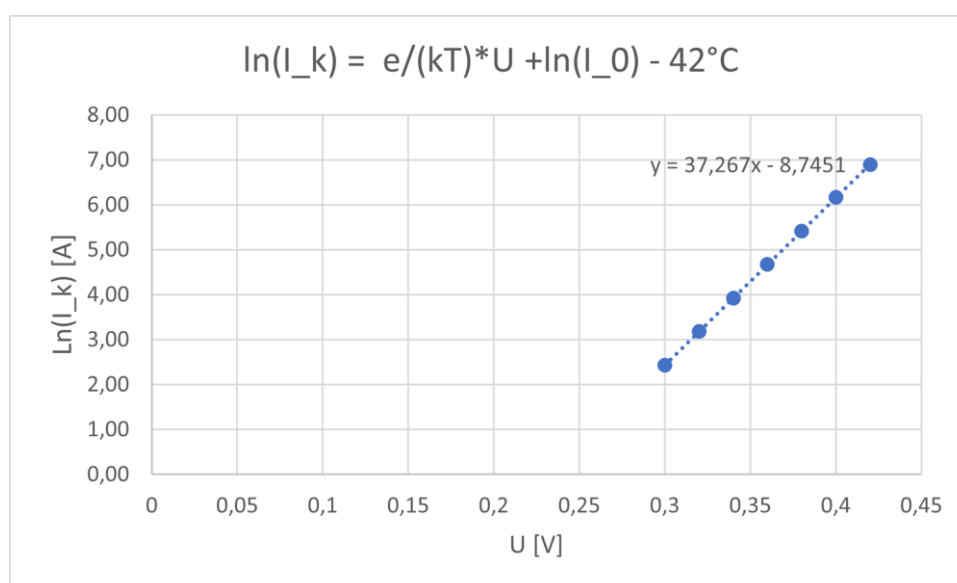


Rys. 2. Wykres przedstawiający zależność logarytmu naturalnego z natężenia zależącego od zmiennego napięcia dla przypadku temperatury 3 °C.

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 $a = 37,27 \left[\frac{C}{J} \right]$.

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:

$$u(\bar{X}) = 49 \left[\frac{\text{C} \cdot \text{K}}{\text{J}} \right].$$

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

$$\frac{e}{k} = (11655 \pm 98) \left[\frac{\text{C} \cdot \text{K}}{\text{J}} \right].$$

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 $\frac{e}{k} = (11655 \pm 98) \left[\frac{\text{C} \cdot \text{K}}{\text{J}} \right]$. Dla sprawdzenia poprawności wyniku porównujemy go do wartości tablicowej $11605 \left[\frac{\text{C} \cdot \text{K}}{\text{J}} \right]$. 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 - 20.03.2022 r.
- [2.] https://pl.wikipedia.org/wiki/Stała_Boltzmannna - 20.03.2022 r.
- [3.] https://pl.wikipedia.org/wiki/Zero_bezwzględne - 20.03.2022 r.