

# Wyznaczanie szerokości przerwy energetycznej półprzewodnika metodą termiczną (termistor)

Informatyka – profil praktyczny, semestr II

Wydział Matematyki Stosowanej

Politechnika Śląska

Sekcja 5

Piotr Skowroński, Bartłomiej Pacia

Maj 2022

## 1 Wstęp teoretyczny

Półprzewodnikami nazywamy substancje, na których konduktywność można wpływać przez różne czynniki (najczęściej przez domieszkowanie lub zmianę temperatury). Jest to spowodowane posiadaniem przerwy energetycznej, ze specyficznego zakresu, między pasmem walencyjnym a przewodnictwa (gdzie w przewodnikach ta przerwa jest jeszcze mniejsza, a w izolatorach większa). Wyróżniamy następujące typy półprzewodników:

Samoistne — posiadają niezanieczyszczoną sieć krystaliczną (uporządkowane i symetryczne ułożenie atomów).

Domieszkowane – wprowadzenie do sieci krystalicznej elektronów swobodnych innego atomu. W zależności różnicy liczby elektronów domieszki od liczby elektronów półprzewodnika, domieszkowania dzielimy na:

Typ p – pobieranie elektronu z półprzewodnika i powstanie tzw. dziur elektronowych (naładowanie dodatnie).

Typ n – pobieranie elektronu z domieszki ułatwiając przechodzenie w stan swobodny (naładowanie ujemne).

Teoria pasmowa ciał stałych — jest to teoria opisująca przewodnictwo elektryczne. Pasmami energetycznymi nazywamy przedziały energetyczne, jakie osiągają elektrony w danym atomie. Przerwą energetyczną, nazywamy różnicę energii między dwoma pasmami energetycznymi. W elektronice najbardziej istotne są dwa pasma:

Walencyjne — przedział energetyczny elektronów walencyjnych.

Przewodnictwa — przedział energetyczny elektronów swobodnych, które stają się nośnikami prądu elektrycznego.

## 2 Pomiary

Podczas wykonywania doświadczenia w pracowni pomiary zapisywaliśmy ręcznie na kartce. Następnie przepisaliliśmy wyniki naszych pomiarów do pliku CSV, by umożliwić ich wykorzystanie w programie.

Użyliśmy języka Python w środowisku Jupyter Notebook. Wykorzystaliśmy biblioteki *numpy*, *pandas* i *matplotlib*.

## 3 Obliczenia

### Wykres $T(R_1)$ i $T(R_2)$ dla ogrzewania i ocieplania

0.01V - 1°C

Przyjmujemy niepewności dla użytych przez nas urządzeń:

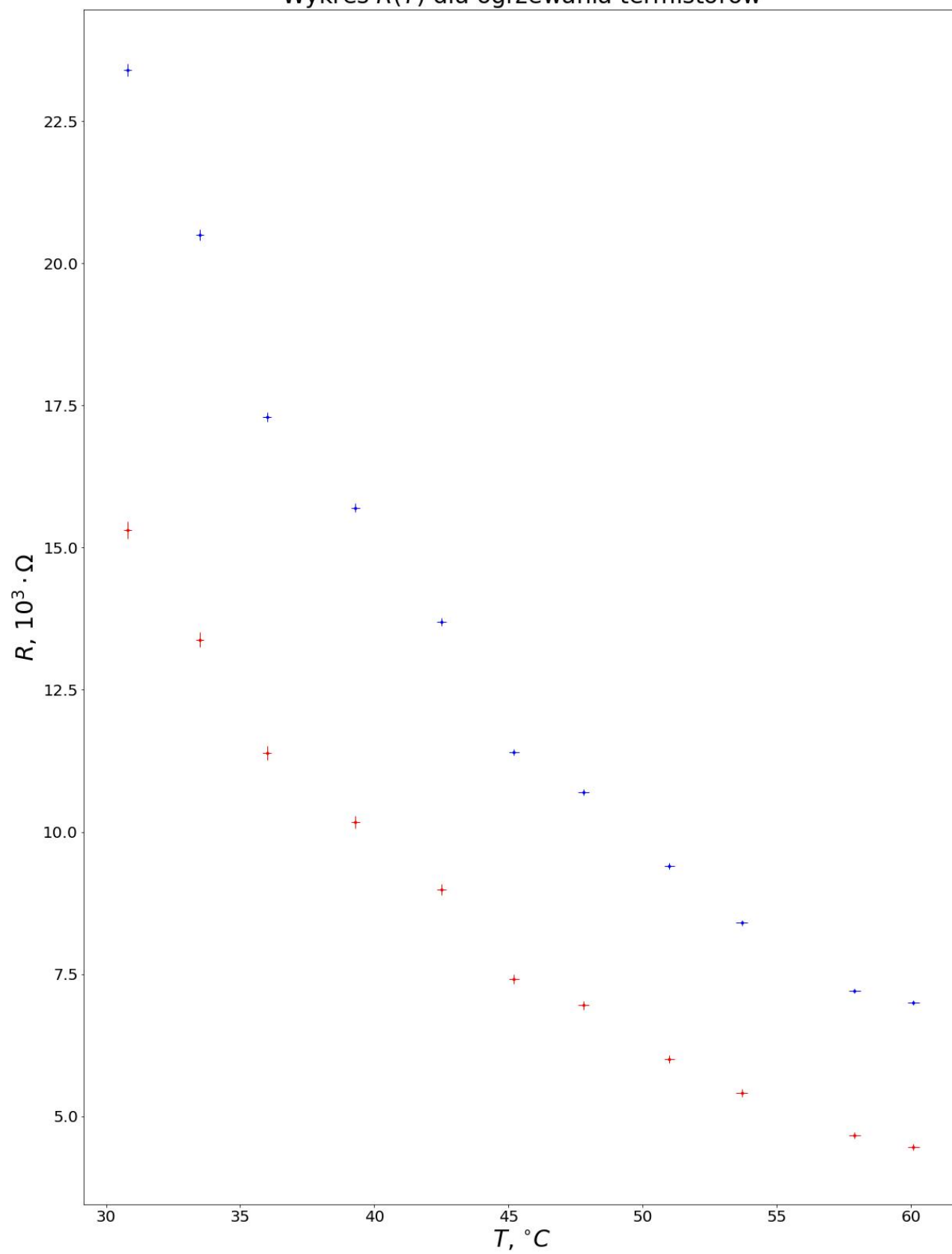
$$\begin{aligned}u(U) &= \frac{0.5\% \cdot U + 1 \cdot 0.001}{\sqrt{3}} \\u(R_1) &= \frac{1.5\% \cdot R_1 + 3 \cdot 0.01}{\sqrt{3}} \\u(R_2) &= \frac{0.8\% \cdot R_2 + 1 \cdot 0.01}{\sqrt{3}}\end{aligned}$$

Tabela z danymi. Lp. 1-11 ocieplanie, 12-22 ochładzanie:

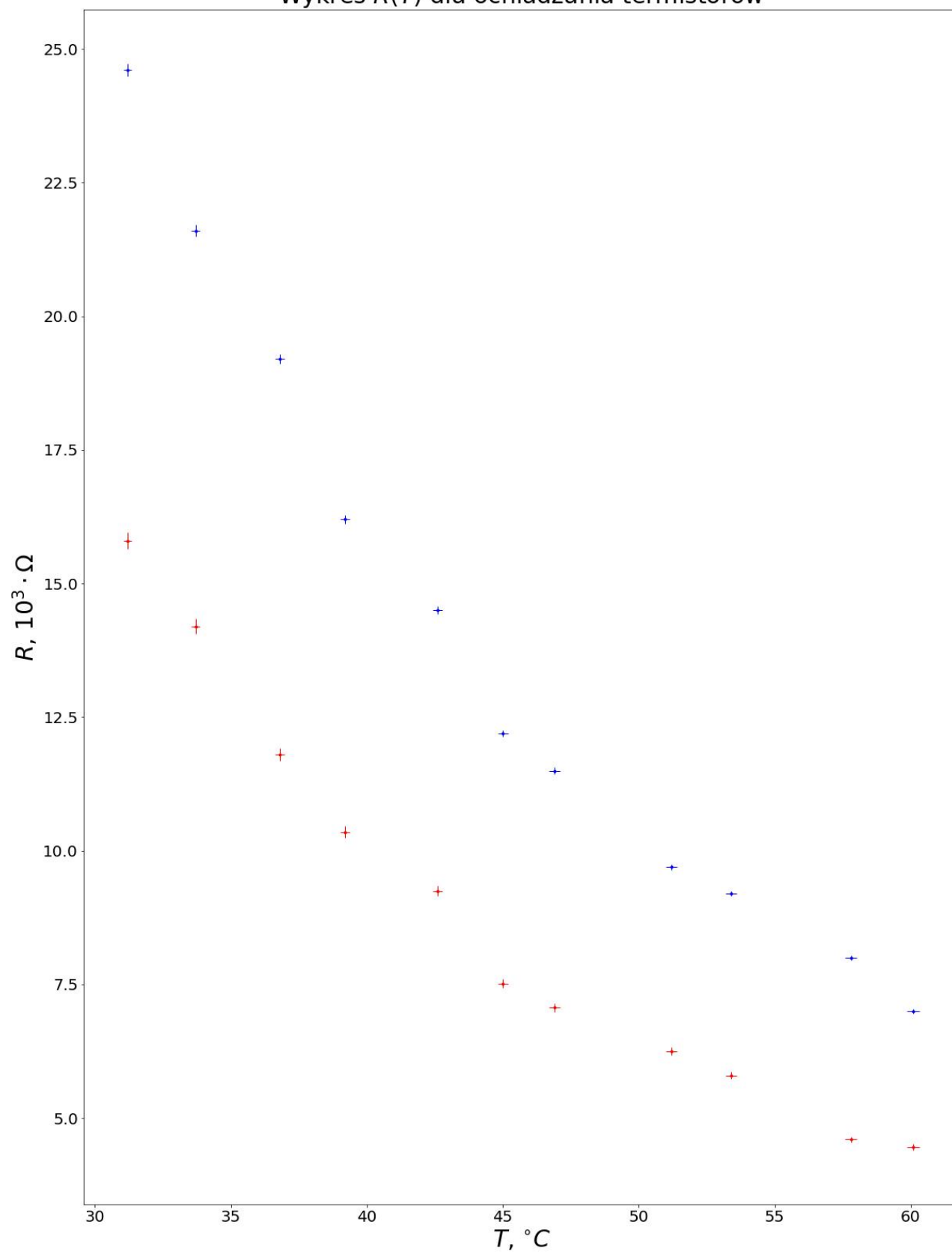
Lp.	$U$ , V	$u(U)$ , V	$R_1$ , k $\Omega$	$R_2$ , k $\Omega$	$u(R_1)$ , k $\Omega$	$u(R_2)$ , k $\Omega$
1.	0.3080	0.0015	15.30	23.40	0.15	0.11
2.	0.3350	0.0015	13.40	20.50	0.13	0.10
3.	0.3600	0.0016	11.40	17.300	0.12	0.086
4.	0.3930	0.0017	10.20	15.700	0.11	0.078
5.	0.4250	0.0018	8.990	13.700	0.095	0.068
6.	0.4520	0.0019	7.410	11.400	0.081	0.058
7.	0.4780	0.0020	6.950	10.700	0.078	0.055
8.	0.5100	0.0020	6.010	9.400	0.069	0.049
9.	0.5370	0.0021	5.410	8.400	0.064	0.045
10.	0.5790	0.0022	4.660	7.200	0.058	0.039
11.	0.6010	0.0023	4.460	7.000	0.056	0.038
12.	0.6010	0.0023	4.460	7.000	0.056	0.038
13.	0.5780	0.0022	4.600	8.000	0.057	0.043
14.	0.5340	0.0021	5.800	9.200	0.068	0.048
15.	0.5120	0.0021	6.250	9.700	0.071	0.051
16.	0.4690	0.0019	7.070	11.500	0.079	0.059
17.	0.4500	0.0019	7.520	12.200	0.082	0.062
18.	0.4260	0.0018	9.250	14.500	0.097	0.073
19.	0.3920	0.0017	10.35	16.200	0.11	0.081
20.	0.3680	0.0016	11.80	19.200	0.12	0.094
21.	0.3370	0.0016	14.20	21.60	0.14	0.11
22.	0.3120	0.0015	15.80	24.60	0.15	0.12

Wykresy na następnych stronach

Wykres  $R(T)$  dla ogrzewania termistorów



Wykres  $R(T)$  dla ochładzania termistorów



## Wykres $f(\frac{1}{T}) = \ln(R)$ dla ocieplania i ochładzania i regresja liniowa

Niepewności z prawa przenoszenia niepewności:

$$u(\frac{1}{T}) = \frac{u(T)}{T^2}, u(\ln(R)) = \frac{u(R)}{R}.$$

Aby policzyć współczynniki kierunkowe prostych i wyrazy wolne skorzystamy ze wzorów:

$$a = \frac{nS_{xy} - S_x S_y}{nS_{xx} - S_x^2}, b = \frac{S_{xx} S_y - S_x S_{xy}}{nS_{xx} - S_x^2}$$

Gdzie:

$$S_x = \sum_{i=1}^n x_i, S_y = \sum_{i=1}^n y_i, S_{xx} = \sum_{i=1}^n x_i^2, S_{xy} = \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i$$

Do obliczenia niepewności skorzystamy ze wzorów:

$$u(a) = \sqrt{\frac{n}{n-2} \cdot \frac{S_{\epsilon\epsilon}}{nS_{xx} - S_x^2}}, u(b) = \sqrt{\frac{1}{n-2} \cdot \frac{S_{xx} S_{\epsilon\epsilon}}{nS_{xx} - S_x^2}}$$

Gdzie:

$$S_{\epsilon\epsilon} = \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2, \text{ dla } \epsilon_i = y_i - ax_i - b$$

Współczynniki dla ocieplania termistorów:

$$a_1 = 4330 \text{ K}, a_2 = 4250 \text{ K},$$

$$b_1 = -11.5, b_2 = -10.8.$$

Niepewności współczynników:

$$u(a_1) = 180 \text{ K}, u(a_2) = 240 \text{ K},$$

$$u(b_1) = 0.57, u(b_2) = 0.74.$$

Postać końcowa współczynników:

$$a_1 = 4330(180) \text{ K}, a_2 = 4250(240) \text{ K},$$

$$b_1 = -11.50(57), b_2 = -10.80(74).$$

Współczynniki dla ochładzania termistorów:

$$a_1 = 4420 \text{ K}, a_2 = 4260 \text{ K},$$

$$b_1 = -11.8, b_2 = -10.8.$$

Niepewności współczynników:

$$u(a_1) = 110 \text{ K}, u(a_2) = 140 \text{ K},$$

$$u(b_1) = 0.34, u(b_2) = 0.43.$$

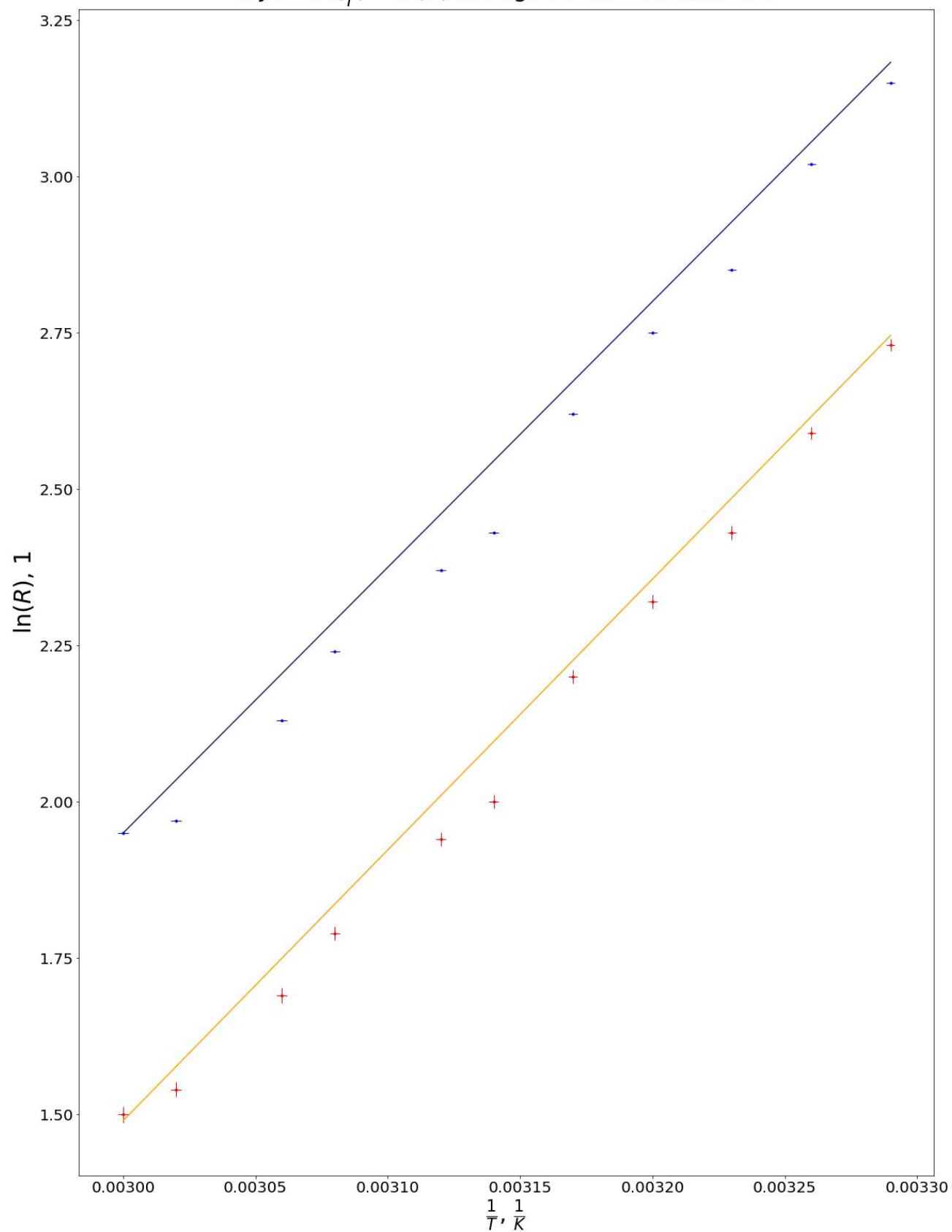
Postać końcowa współczynników:

$$a_1 = 4420(110) \text{ K}, a_2 = 4260(140) \text{ K},$$

$$b_1 = -11.80(34), b_2 = -10.80(43).$$

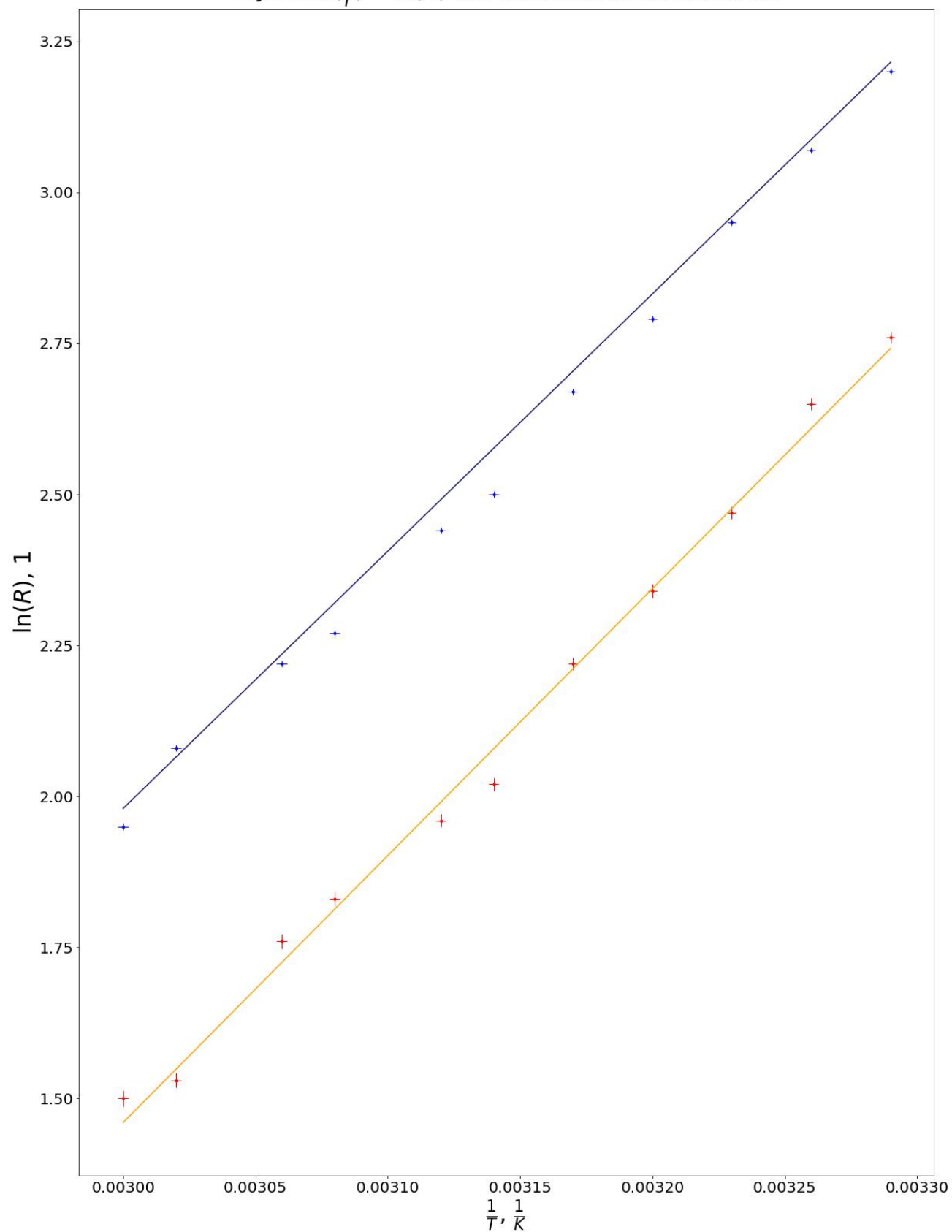
Wykresy na następnych stronach:

Wykres  $f(\frac{1}{T}) = \ln(R)$  dla ogrzewania termistorów





Wykres  $f(\frac{1}{T}) = \ln(R)$  dla ochładzania termistorów



## Wyznaczenie szerokości przerwy energetycznych $\Delta E$ dla obu termistorów

Ze wzoru  $\ln(R) = \frac{\Delta E}{2k} \cdot \frac{1}{T} + \ln R_0$  wyznaczamy współczynnik kierunkowy  $a = \frac{\Delta E}{2k}$

Zatem wzór na szerokość przerwy energetycznej ma postać:

$$\Delta E = 2ka$$

$$1\text{J} = 6.24 \cdot 10^{18}\text{eV}$$

Podczas ocieplania termistorów:

$$\Delta E_1 = 0.747 \text{ eV},$$

$$\Delta E_2 = 0.733 \text{ eV}.$$

Podczas chłodzenia termistorów:

$$\Delta E_1 = 0.762 \text{ eV},$$

$$\Delta E_2 = 0.734 \text{ eV}.$$

## Obliczenie niepewności szerokości przerwy energetycznej $u(\Delta E)$ korzystając z prawa przenoszenia niepewności

Niepewność  $u(\Delta E)$  wyznaczamy z prawa przenoszenia niepewności:

$$u(\Delta E) = 2k \cdot u(a).$$

Po obliczeniach dla ogrzewania termistorów:

$$u(\Delta E_1) = 0.031 \text{ eV},$$

$$u(\Delta E_2) = 0.041 \text{ eV}.$$

Po obliczeniach dla ochładzania termistorów:

$$u(\Delta E_1) = 0.019 \text{ eV},$$

$$u(\Delta E_2) = 0.024 \text{ eV}.$$

## Zapisanie wyników w odpowiednim formacie

Dla ogrzewania termistorów:

$$\Delta E_1 = 0.747(31) \text{ eV},$$

$$\Delta E_2 = 0.733(41) \text{ eV}.$$

Dla ochładzania termistorów:

$$\Delta E_1 = 0.762(19) \text{ eV},$$

$$\Delta E_2 = 0.734(24) \text{ eV}.$$

## Test zgodności dla obu termistorów

Liczymy niepewność rozszerzoną

$$U(x_1 - x_2) = k\sqrt{[u(x_1)]^2 + [u(x_2)]^2}.$$

W miejsce  $x$  i  $u(x)$  wstawiamy  $\Delta E$  i  $u(\Delta E)$ , przyjmujemy  $k = 2$

$$U(\Delta E_1 - \Delta E_2) = 2\sqrt{[u(\Delta E_1)]^2 + [u(\Delta E_2)]^2}.$$

Niepewność rozszerzona dla ocieplania termistorów

$$U(\Delta E_1 - \Delta E_2) = 0.10 \text{ eV}.$$

Niepewność rozszerzona dla ochładzania termistorów

$$U(\Delta E_1 - \Delta E_2) = 0.061 \text{ eV}.$$

Wyniki pomiaru uważa się za zgodne jeśli

$$|\Delta E_1 - \Delta E_2| < U(\Delta E_1 - \Delta E_2).$$

Dla naszych pomiarów

$$0.014 \text{ eV} < 0.103 \text{ eV},$$

$$0.028 \text{ eV} < 0.061 \text{ eV}.$$

Co pokazuje, że termistory są jednakowe.

## 4 Wnioski

Przy pomocy tego doświadczenia udało się wyznaczyć szerokości przerw energetycznej dla obu termistorów. Z wykresów widać, że wraz ze wzrostem temperatury opór maleje, co jest zgodne ze wzorem teoretycznym. Dodatkowo otrzymane szerokości przerw energetycznych dla obu termistorów spełniają test zgodności, co oznacza, że zostały one wykonane z tych samych materiałów.