

Wydział MINI	Dzień/godz Data	Środa 14.15 2.04.2025r.	Nr zespołu 4
Nazwisko i Imię 1. Przeździecka Alicja 2. Skoczyła Katarzyna 3. Zieliński Miłosz	Ocena z przygotowania	Ocena z sprawozdania	Ocena końcowa
Prowadzący		Podpis	

1 Wstęp

Celem ćwiczenia jest zastosowanie statystyki Maxwella do opisu rozkładu prędkości i energii elektronów termicznych, doświadczalne zaobserwowanie zjawiska termoemisji, wyznaczenie rozkładu prędkości termoelektronów metodą pola hamującego oraz temperatury katody.

2 Opis matematyczny

Wykonanie ćwiczenia wymagało od nas zrozumienia mechanizmu rozkładu Maxwella prędkości oraz energii. Wzór opisujący ilość cząstek o prędkościach zawartych w przedziale $[v, v + dv]$ wygląda następująco:

$$dn_v = 4 \cdot \pi \cdot N \left(\frac{m}{2\pi \cdot kT} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot v^2 \cdot \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right) dv, \quad (1)$$

gdzie:

- N - ogólna liczba cząsteczek w rozpatrywanej objętości
- m - masa cząstki
- k - stała Boltzmanna
- T - temperatura w skali Kelvina.

Wzory statystyki Maxwella chociaż wyprowadzone dla gazu doskonałego, działają również w przypadku elektronów termicznych (wydzielanych na przykład w wyniku zjawiska termoemisji), ponieważ stężenie emitowanych elektronów jest znacznie niższe niż w metalu oraz oddziaływania pomiędzy nimi w porównaniu z energią kinetyczną są pomijalnie małe. Te cechy zapewniają podobieństwo z własnościami gazu doskonałego użytymi do wyprowadzenia wzorów.

Zjawisko termoemisji to zjawisko wykorzystane w tym ćwiczeniu do emisji elektronów. Pod wpływem nagrzania metalu (w naszym przypadku katoda lampy próżniowej) część elektronów jest na wyższych poziomach energetycznych, pokonuje siły wiążące oraz wydostaje się poza barierę potencjału. Elektrony posiadają energie kinetyczne i docierają do anody wywołując przepływ prądu anodowego. W przypadku przyłożenia napięcia hamującego można zaobserwować spadek prądu anodowego w obwodzie. Świadczy to o różnych energiach kinetycznych elektronów i część z nich o niższych energiach nie jest w stanie pokonać ujemnego napięcia i nie dociera do anody. Na tej podstawie posługując się pomiarami napięcia hamującego i prądu anodowego będziemy wyznaczać rozkład prędkości elektronów termicznych opisywanych przez statystykę Maxwella. Chociaż statystyki Maxwella są wyznaczone dla gazu doskonałego, to jak wspominaliśmy powyżej możemy z dobrym przybliżeniem zastosować je również w tym przypadku.

Wzór opisujący liczbę elektronów osiągających anodę o energii większej od E przechodzących przez powierzchnię jednostkową jest postaci:

$$\gamma(E) = N \sqrt{\frac{1}{2\pi \cdot kT}} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right). \quad (2)$$

Powyższe równanie można zapisać analogicznie:

$$I_a = I_{a0} \cdot \exp\left(-\frac{eU_a}{kT}\right), \quad (3)$$

gdzie:

- I_a - natężenie prądu anodowego
- U_a - napięcie anodowe
- I_{a0} - natężenie prądu anodowego przy zerowym napięciu anodowym.
- k - stała boltzmanna
- e - ładunek elementarny

Wyznaczenie temperatury na podstawie pomiarów wielokrotnych wyżej wymienionych wielkości jest możliwe między innymi po nałożeniu logarytmu naturalnego na obie strony równania w następującej kolejności:

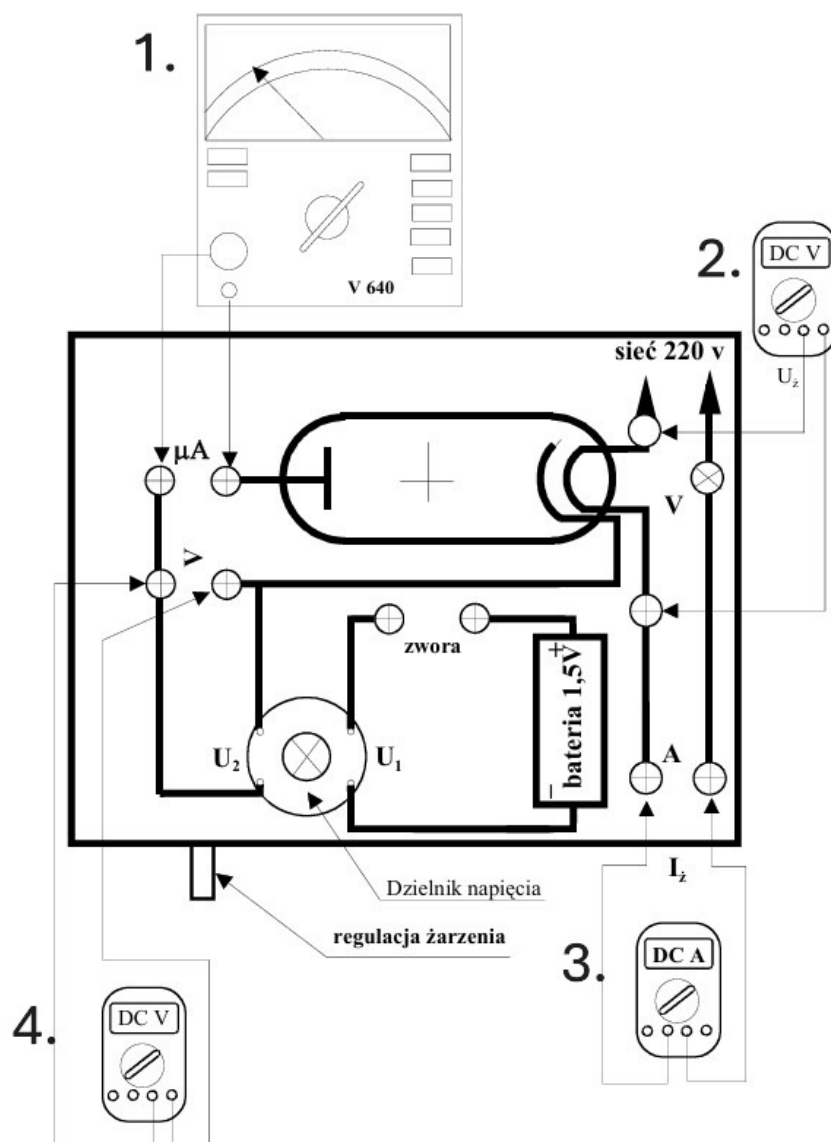
$$\frac{I_a}{I_{a0}} = \exp\left(-\frac{eU_a}{kT}\right) \implies \ln\left(\frac{I_a}{I_{a0}}\right) = -\frac{eU_a}{kT} \implies \ln\left(\frac{I_a}{I_{a0}}\right) = -\frac{e}{kT} \cdot U_a \quad (4)$$

Z ostatniej postaci możemy zauważyć postać prostej $y = ax$, gdzie $y = \ln(\frac{I_a}{I_{a0}})$, $x = U_a$, a współczynnik kierunkowy $a = -\frac{e}{kT}$. Możemy znaleźć współczynnik kierunkowy przy użyciu metody najmniejszych kwadratów (MNK). Następnie przekształcając wzór do postaci:

$$T = -\frac{e}{ka} \quad (5)$$

możemy wyznaczyć interesującą nas temperaturę T .

3 Układ pomiarowy



Rysunek 1: Schemat układu pomiarowego. [1]

Rysunek 1 przedstawia schemat pomiarowy, który posłużył do zbadania zjawiska termoemisji. W czasie pomiarów wykorzystano mierniki:

1. miernik analogowy MERATRONIK V640 o klasie 1,5% na zakresach $0,15\mu\text{A}$, $1,5\mu\text{A}$, $15\mu\text{A}$ i $0,15\text{mA}$ do pomiaru prądu anodowego
2. miernik cyfrowy METEX M-3800, wskazania nie były uwzględniane w czasie pomiarów
3. miernik cyfrowy METEX M-3800 o klasie $\pm 1,2\% \text{ rdg} \pm 1 \text{ dgt}$ na zakresie 2A do pomiaru prądu żarzenia
4. miernik cyfrowy METEX M-3800 o klasie $\pm 0,3\% \text{ rdg} \pm 1 \text{ dgt}$ na zakresie 200 mA do pomiaru napięcia hamującego

4 Dane eksperymentalne

Wykonano 3 serie pomiarów, każda z nich była przy innym prądzie żarzenia. Dla poszczególnych serii natężenie żarzące wynosiło:

1. $I_{\dot{z}.1} = 0,395A$
2. $I_{\dot{z}.2} = 0,427A$
3. $I_{\dot{z}.3} = 0,528A$

Nr	$I_a [\mu A]$	Zakres $I_a [\mu A]$	$U_a [mV]$	Zakres $U_a [mV]$
1	0,55	1,5	0,0	200
2	0,55	1,5	-4,0	200
3	0,45	1,5	-18,0	200
4	0,35	1,5	-38,6	200
5	0,30	1,5	-54,7	200
6	0,25	1,5	-74,1	200
7	0,20	1,5	-112,1	200
8	0,125	0,15	-127,1	200
9	0,120	0,15	-135,1	200
10	0,110	0,15	-140,9	200
11	0,095	0,15	-153,2	200
12	0,080	0,15	-165,9	200
13	0,065	0,15	-180,3	200
14	0,060	0,15	-189,0	200
15	0,055	0,15	-196,3	200

Tabela 1: Tabela wartości pomiarów serii 1.

Nr	$I_a [\mu A]$	Zakres $I_a [\mu A]$	$U_a [mV]$	Zakres $U_a [mV]$
1	4,5	15	0,0	200
2	4,0	15	-6,8	200
3	3,5	15	-17,8	200
4	3,0	15	-28,0	200
5	2,5	15	-42,0	200
6	2,0	15	-60,2	200
7	1,5	15	-82,6	200
8	1,0	1,5	-92,9	200
9	0,95	1,5	-97,4	200
10	0,90	1,5	-104,6	200
11	0,85	1,5	-110,5	200
12	0,80	1,5	-120,5	200
13	0,70	1,5	-130,4	200
14	0,65	1,5	-142,2	200
15	0,60	1,5	-151,3	200

Tabela 2: Tabela wartości pomiarów serii 2.

Nr	I_a [mA]	Zakres I_a [mA]	U_a [mV]	Zakres U_a [mV]
1	0,120	0,15	-0,5	200
2	0,115	0,15	-10,7	200
3	0,110	0,15	-19,8	200
4	0,105	0,15	-26,7	200
5	0,100	0,15	-35,5	200
6	0,095	0,15	-45,5	200
7	0,090	0,15	-53,8	200
8	0,080	0,15	-71,1	200
9	0,075	0,15	-81,3	200
10	0,070	0,15	-92,9	200
11	0,060	0,15	-113,0	200
12	0,055	0,15	-125,4	200
13	0,050	0,15	-141,9	200
14	0,045	0,15	-153,0	200
15	0,040	0,15	-167,1	200
16	0,035	0,15	-182,3	200

Tabela 3: Tabela wartości pomiarów serii 3.

5 Opracowanie pomiarów oraz analiza niepewności pomiarów

5.1 Niepewności pomiarowe

Niepewności pomiarowe dla prądu żarzenia zmierzonego na mierniku cyfrowym zostały wyliczone w następujący sposób:

$$u(I_z) = \frac{\Delta I_z}{\sqrt{3}} = \frac{c_1 I_z + c_2 z}{\sqrt{3}}, \quad (6)$$

gdzie I_z to wartość zmierzona, z zakres pomiarowy, a c_1 i c_2 to parametry zależne od klasy – przyjmujące wartości $c_1 = 1,2\%$ oraz $c_2 = 1$.

Stąd po podstawieniu wartości dostajemy:

$$u(I_{z.1}) = 0,0015A \quad (7)$$

$$u(I_{z.2}) = 0,0015A \quad (8)$$

$$u(I_{z.3}) = 0,0016A \quad (9)$$

W ten sam sposób obliczyliśmy niepewności napięcia anodowego U_a . Wszystkie z nich mierzyliśmy na tym samym zakresie, więc korzystaliśmy ze wzoru

$$u(U_a) = \frac{\Delta U_a}{\sqrt{3}} = \frac{c_1 U_a + c_2 z}{\sqrt{3}}, \quad (10)$$

gdzie U_a to wartość zmierzona, z zakres pomiarowy, a c_1 i c_2 to parametry zależne od klasy – przyjmujące wartości $c_1 = 0,3\%$ oraz $c_2 = 1$.

Niepewności prądu anodowego, który odczytywaliśmy z miernika analogowego obliczaliśmy w następujący sposób

$$\Delta U = \frac{\text{klasa} \cdot \text{zakres}}{100}, \quad (11)$$

Wartości dla pomiarów na różnych zakresach wynoszą odpowiednio:

dla zakresu $1,5 \mu A$:

$$u(I_a) = 0,032 \mu A \quad (12)$$

dla zakresu $15 \mu A$:

$$u(I_a) = 0,32 \mu A \quad (13)$$

dla zakresu $0,15 \mu A$:

$$u(I_a) = 0,0032 \mu A \quad (14)$$

dla zakresu 0,15 mA:

$$u(I_a) = 0,0032 \text{ mA} = 3,2 \mu A \quad (15)$$

W celu narysowania wykresu zależności prądu anodowego unormowanego do I_{a0} od napięcia anodowego U_a musieliśmy także obliczyć niepewności $\ln(\frac{I_a}{I_{a0}})$. Skorzystaliśmy z metody propagacji niepewności

$$u\left(\ln\left(\frac{I_a}{I_{a0}}\right)\right) = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln(\frac{I_a}{I_{a0}})}{\partial I_a} u(I_a)\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln(\frac{I_a}{I_{a0}})}{\partial I_{a0}} u(I_{a0})\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{I_a} u(I_a)\right)^2 + \left(\frac{1}{I_{a0}} u(I_{a0})\right)^2}, \quad (16)$$

Wyniki wszystkich niepewności dla każdego z pomiarów znajdują się poniżej w Tabelach 4,5,6.

Nr	I_a [μA]	$u(I_a)$ [μA]	U_a [mV]	$u(U_a)$ [mV]	$\ln(\frac{I_a}{I_{a0}})$	$u(\ln(\frac{I_a}{I_{a0}}))$
1	0,550	0,032	0,000	0,058	0,000	0,081
2	0,550	0,032	-4,000	0,057	0,000	0,081
3	0,450	0,032	-18,000	0,027	-0,201	0,091
4	0,350	0,032	-38,60	0,12	-0,452	0,107
5	0,300	0,032	-54,70	0,15	-0,606	0,120
6	0,250	0,032	-74,10	0,19	-0,788	0,139
7	0,150	0,032	-112,20	0,25	-1,299	0,219
8	0,1250	0,0032	-127,10	0,28	-1,482	0,063
9	0,1200	0,0032	-135,10	0,29	-1,522	0,063
10	0,1100	0,0032	-140,90	0,30	-1,609	0,064
11	0,0950	0,0032	-153,20	0,32	-1,756	0,067
12	0,0800	0,0032	-165,90	0,35	-1,928	0,070
13	0,0650	0,0032	-180,30	0,37	-2,136	0,075
14	0,0600	0,0032	-189,00	0,39	-2,216	0,078
15	0,0550	0,0032	-196,30	0,40	-2,303	0,081

Tabela 4: Tabela wartości pomiarów serii 1 wraz z niepewnościami.

Nr	I_a [μA]	$u(I_a)$ [μA]	U_a [mV]	$u(U_a)$ [mV]	$\ln(\frac{I_a}{I_{a0}})$	$u(\ln(\frac{I_a}{I_{a0}}))$
1	4,50	0,32	0,000	0,058	0,000	0,099
2	4,00	0,32	-6,800	0,070	-0,12	0,11
3	3,50	0,32	-17,800	0,089	-0,25	0,11
4	3,00	0,32	-28,00	0,11	-0,41	0,13
5	2,50	0,32	-42,00	0,13	-0,59	0,14
6	2,00	0,32	-60,20	0,16	-0,81	0,17
7	1,50	0,32	-82,60	0,20	-1,10	0,22
8	1,000	0,032	-92,90	0,22	-1,504	0,077
9	0,950	0,032	-97,40	0,23	-1,555	0,078
10	0,900	0,032	-104,60	0,24	-1,609	0,079
11	0,850	0,032	-110,50	0,25	-1,667	0,080
12	0,800	0,032	-120,50	0,27	-1,727	0,081
13	0,700	0,032	-130,40	0,28	-1,861	0,084
14	0,650	0,032	-142,20	0,30	-1,935	0,086
15	0,600	0,032	-151,30	0,32	-2,015	0,088

Tabela 5: Tabela wartości pomiarów serii 2 wraz z niepewnościami.

Nr	I_a [mA]	$u(I_a)$ [mA]	U_a [mV]	$u(U_a)$ [mV]	$\ln(\frac{I_a}{I_{a0}})$	$u(\ln(\frac{I_a}{I_{a0}}))$
1	0,1200	0,0032	-0,500	0,059	0,000	0,037
2	0,1150	0,0032	-10,700	0,076	-0,043	0,038
3	0,1100	0,0032	-19,800	0,092	-0,087	0,039
4	0,1050	0,0032	-26,7	0,1	-0,13	0,04
5	0,1000	0,0032	-35,50	0,12	-0,182	0,041
6	0,0950	0,0032	-45,50	0,14	-0,234	0,042
7	0,0900	0,0032	-53,80	0,15	-0,288	0,044
8	0,0800	0,0032	-71,10	0,18	-0,405	0,048
9	0,0750	0,0032	-81,3	0,2	-0,47	0,05
10	0,0700	0,0032	-92,90	0,22	-0,539	0,052
11	0,0600	0,0032	-113,00	0,25	-0,693	0,059
12	0,0550	0,0032	-125,40	0,27	-0,780	0,063
13	0,0500	0,0032	-141,9	0,3	-0,875	0,069
14	0,0450	0,0032	-153,00	0,32	-0,981	0,075
15	0,0400	0,0032	-167,10	0,35	-1,099	0,083
16	0,0350	0,0032	-182,30	0,37	-1,232	0,094

Tabela 6: Tabela wartości pomiarów serii 3 wraz z niepewnościami.

5.2 Wyznaczenie temperatur katody

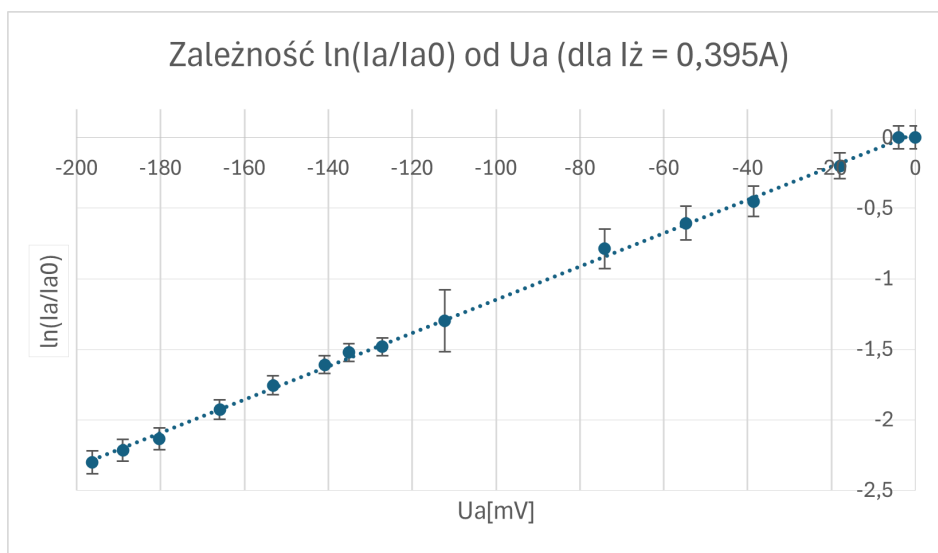
Dla wszystkich trzech serii pomiarowych temperatura została policzona przy użyciu wzoru (5). Wartość współczynnika a oraz jego błąd zostały policzone przy użyciu metody najmniejszych kwadratów. Błąd wyznaczonej temperatury został policzony przy zastosowaniu zasady propagacji.

$$u(T) = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial a} u(a)\right)^2} = \frac{e \cdot u(a)}{ka^2}, \quad (17)$$

gdzie e - ładunek elementarny, k - stała Boltzmana, a - współczynnik kierunkowy dopasowanej prostej, $u(a)$ - niepewność wartości współczynnika kierunkowego (wynikający z MNK).

Zależności wartości $\ln\left(\frac{I_a}{I_{a0}}\right)$ od napięcia hamującego U_a wraz z zaznaczoną prostą wynikającą z MNK i odpowiednimi niepewnościami przedstawione są na poniższych wykresach.

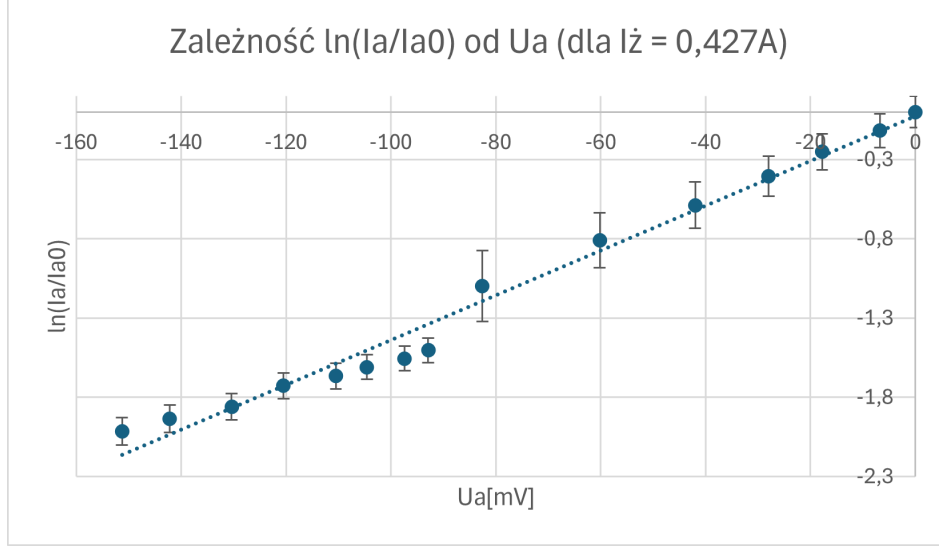
5.2.1 Temperatura katody przy prądzie żarzenia $I_{z.1} = 0,395A$



Rysunek 2: Wykres przedstawiający zależność $\ln(\frac{I_a}{I_{a0}})$ od U_a dla $I_{z.1} = 0,395A$

$$a_1 = 11,08, \quad u(a_1) = 0,11 \quad T_1 = 983,1 \text{ K} \quad u(T_1) = 9,1 \text{ K} \quad (18)$$

5.2.2 Temperatura katody przy prądzie żarzenia $I_{z,2} = 0,427 \text{ A}$



Rysunek 3: Wykres przedstawiający zależność $\ln(\frac{I_a}{I_{a0}})$ od U_a dla $I_{z,2} = 0,427 \text{ A}$

$$a_{2,1} = 14,12, \quad u(a_{2,1}) = 0,5 \quad T_{2,1} = 821,9 \text{ K} \quad u(T_{2,1}) = 29,3 \text{ K} \quad (19)$$

Możemy zauważyć, że mimo zwiększenia się prądu żarzenia, temperatura w przypadku drugiej serii pomiarów jest mniejsza niż w przypadku pierwszej serii. Takie zjawisko nie powinno występować w idealnych warunkach, ponieważ zgodnie z teorią, wyższy prąd żarzenia powinien prowadzić do wyższej temperatury katody. Jednakże, zaobserwowana różnica może wynikać z różnych czynników, takich jak błędy pomiarowe, które mogły pojawić się podczas odczytu temperatury, lub kontaktowa różnica potencjałów, która może zakłócać prawidłowy pomiar.

W przypadku niektórych lamp charakterystyki logarytmu unormowanego prądu anodowego nie układają się w zależność prostoliniową w całym zakresie napięć anodowych, ale wykres składa się z dwóch odcinków prostoliniowych nachylonych pod różnym kątem. Jest to wynikiem obecności kontaktowej różnicy potencjałów pomiędzy anodą a katodą, która powstaje wskutek różnicy w pracy wyjścia pomiędzy materiałem katody a materiałem anody wykonanych z różnych materiałów.

Możemy zaobserwować to na Rysunku 3. Dlatego w przypadku drugiej serii pomiarów wyznaczyliśmy kontaktową różnicę potencjałów poprzez wyznaczenie punktu przecięcia dwóch prostych przybliżających przebieg zależności logarytmu unormowanego prądu anodowego od napięcia anodowego. Obie proste zostały wyznaczone przy zastosowaniu MNK kolejno z wykorzystaniem pierwszych 7 i kolejnych 8 pomiarów dla serii. Współrzędna po osi x punktu przecięcia tych prostych jest szukaną wartością napięcia kontaktowego. Na podstawie tych obliczeń określiliśmy, że wartość ta wynosi:

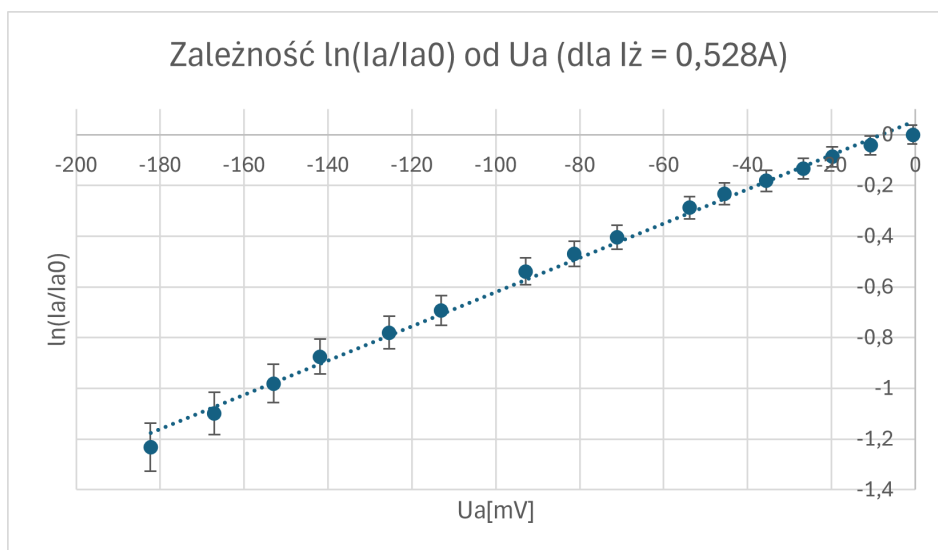
$$U_k = 152 \text{ mV} \quad (20)$$

Gdyby przy wyznaczaniu temperatury katody uwzględnić tylko drugą część pomiarów (od nr 8 do nr 15), to wyniki dla tej serii prezentowałyby się następująco:

$$a_{2,2} = 8,72, \quad u(a_{2,2}) = 0,26 \quad T_{2,2} = 1330,4 \text{ K} \quad u(T_{2,2}) = 39,1 \text{ K} \quad (21)$$

Wynik ten wydaje się być bardziej zgodny dla danego prądu żarzenia.

5.2.3 Temperatura katody przy prądzie żarzenia $I_{z,3} = 0,528A$



Rysunek 4: Wykres przedstawiający zależność $\ln(\frac{I_a}{I_{a0}})$ od U_a dla $I_{z,3} = 0,528A$

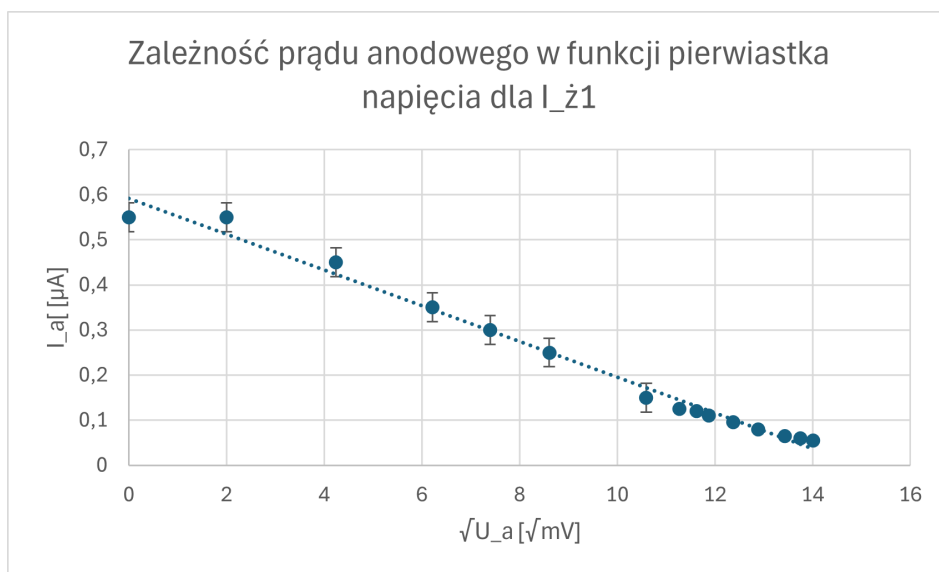
$$a_3 = 6,74, \quad u(a_3) = 0,12 \quad T_3 = 1720,5 \text{ K} \quad u(T_3) = 29,3 \text{ K} \quad (22)$$

5.3 Charakter zjawiska termoemisji

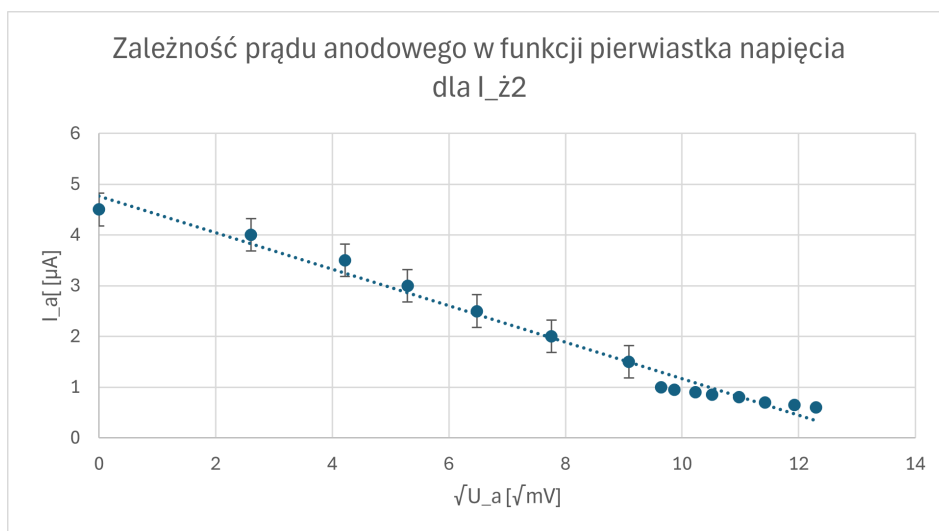
Następnym krokiem było zbadanie zależności prądu anodowego od pierwiastka napięcia hamującego (tutaj napięcie hamujące podstawiamy w wartości bezwzględnej, ponieważ energia kinetyczna jest dodatnia $E = e \cdot |U_a|$). Elektrony docierające do anody muszą mieć energię kinetyczną ($\frac{mv^2}{2}$) większą od eU_a oraz liczba docierających elektronów jest wprost proporcjonalna do I_a . Oznacza to, że tylko elektrony o prędkości $\geq \sqrt{\frac{2eU_a}{m}}$ będą docierać do anody (oznaczymy v_{min}) i wpływać na zmiany prądu anodowego. Zgodnie ze wzorem (1) informującym o rozkładzie prędkości elektronów licząc elektrony o prędkościach $\geq v_{min}$ otrzymujemy wzór:

$$\int_{v_{min}}^{\infty} \gamma(v) dv \quad (23)$$

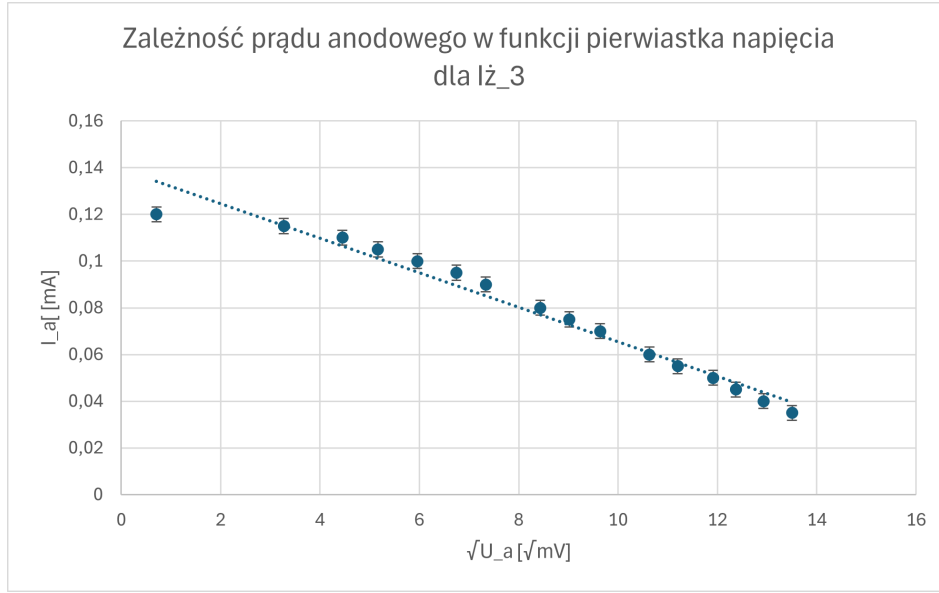
, który po przekształceniu jest proporcjonalny do pierwiastka napięcia hamującego. Poniżej znajdują się wykresy odpowiednich zależności dla trzech prądów żarzenia.



Rysunek 5: Wykres zależności prądu anodowego w funkcji pierwiastka napięcia hamującego dla pierwszej serii pomiarów.



Rysunek 6: Wykres zależności prądu anodowego w funkcji pierwiastka napięcia hamującego dla drugiej serii pomiarów.



Rysunek 7: Wykres zależności prądu anodowego w funkcji pierwiastka napięcia hamującego dla trzeciej serii pomiarów.

Liniowe zależności otrzymane na wykresach potwierdzają charakter zjawiska termoemisji. Następnie powyższe wykresy zostały graficznie zróżniczkowane. Zastosowaliśmy do tego metodę różnic centralnych. Polega ona na tym, że dla każdego punktu pomiarowego i (z wyjątkiem pierwszego i ostatniego punktu) oblicza się pochodną w następujący sposób:

$$\frac{dI_a}{d\sqrt{U_a(i)}} = \frac{I_a(i+1) - I_a(i-1)}{\sqrt{U_a(i+1)} - \sqrt{U_a(i-1)}}. \quad (24)$$

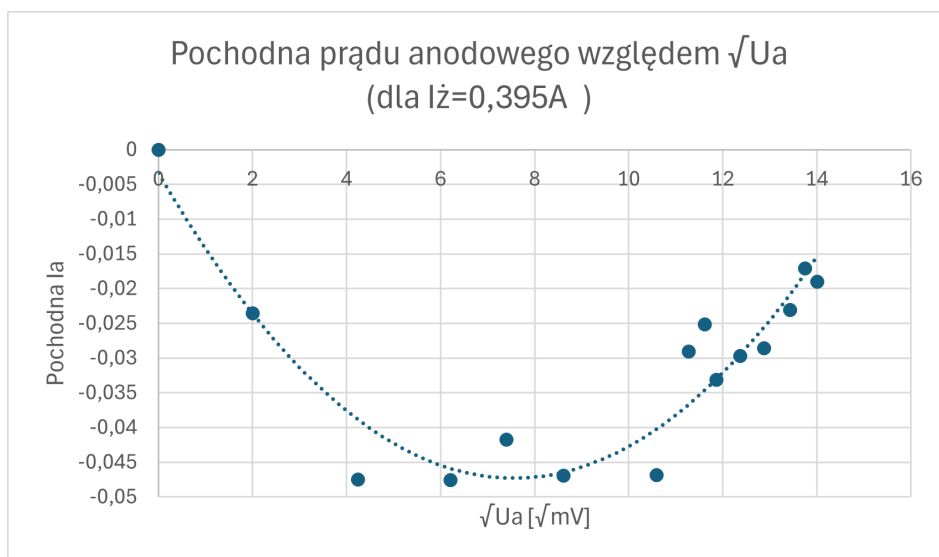
Dla punktów na krańcach wykresu zastosowaliśmy różnice jednostronne. Dla pierwszego punktu

$$\frac{dI_a}{d\sqrt{U_a(1)}} = \frac{I_a(2) - I_a(1)}{\sqrt{U_a(2)} - \sqrt{U_a(1)}} \quad (25)$$

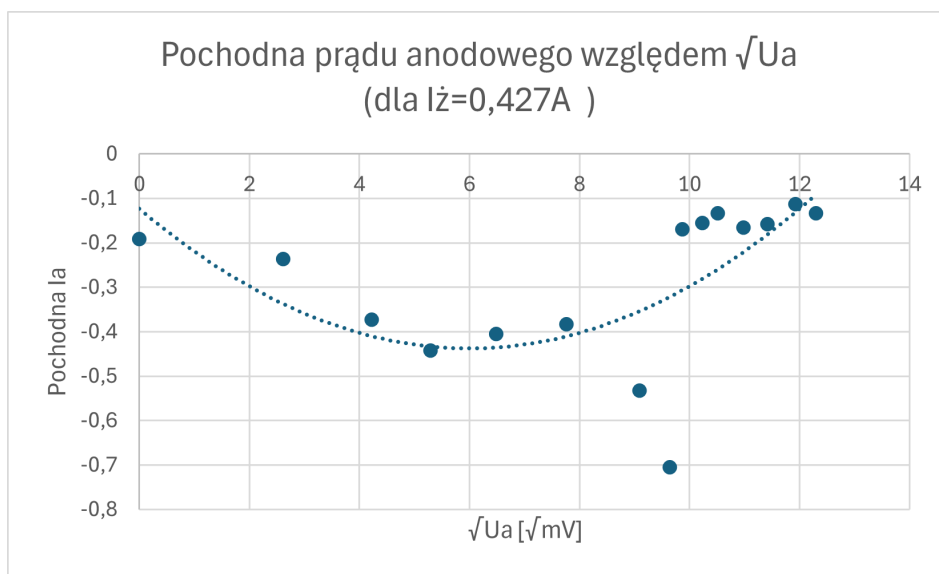
oraz dla ostatniego

$$\frac{dI_a}{d\sqrt{U_a(n)}} = \frac{I_a(n) - I_a(n-1)}{\sqrt{U_a(n)} - \sqrt{U_a(n-1)}}. \quad (26)$$

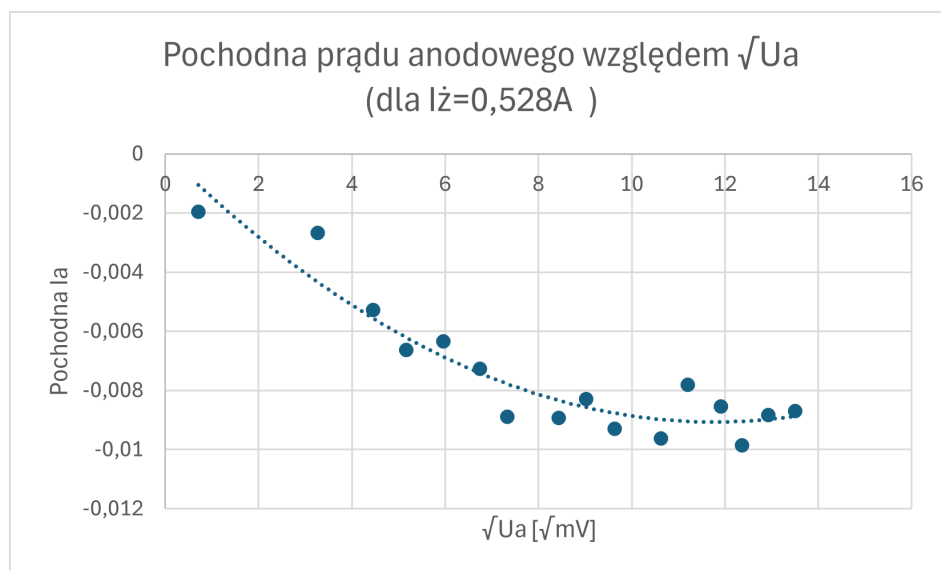
Do otrzymanych punktów dopasowaliśmy wielomian drugiego stopnia. Uzyskaliśmy w ten sposób funkcję rozkładu prędkości elektronów emitowanych z katody.



Rysunek 8: Wykres zależności pochodnej prądu anodowego względem pierwiastka z napięcia hamującego $\frac{dI_a}{d\sqrt{U_a(i)}}$ dla pierwszej serii pomiarów.



Rysunek 9: Wykres zależności pochodnej prądu anodowego względem pierwiastka z napięcia hamującego $\frac{dI_a}{d\sqrt{U_a(i)}}$ dla drugiej serii pomiarów.



Rysunek 10: Wykres zależności pochodnej prądu anodowego względem pierwiastka z napięcia hamującego $\frac{dI_a}{d\sqrt{U_a(i)}}$ dla trzeciej serii pomiarów.

Z powyższych wykresów (Rysunek 8, 9, 10) wynika, że dla mniejszych napięć na anodzie następuje bardziej zauważalny wzrost prądu anodowego. Taki kształt wykresu może być związany ze zjawiskiem nasycenia emisji elektronów, które zachodzi przy wyższych wartościach napięcia na anodzie.

6 Wyniki

Wyznaczone temperatury katody wraz z niepewnościami dla poszczególnych prądów żarzenia wynoszą:

$$\begin{aligned}
 I_z &= 0,395 \text{ A} & T_1 &= 983,1 \text{ K}, & u(T_1) &= 9,1 \text{ K} \\
 I_z &= 0,427 \text{ A} & T_{2.1} &= 821,9 \text{ K}, & u(T_{2.1}) &= 29,3 \text{ K} \\
 I_z &= 0,427 \text{ A} & T_{2.2} &= 1330,4 \text{ K}, & u(T_{2.2}) &= 39,1 \text{ K} \\
 I_z &= 0,528 \text{ A} & T_3 &= 1720,5 \text{ K}, & u(T_3) &= 29,3 \text{ K}
 \end{aligned}$$

7 Podsumowanie

W doświadczeniu zbadano rozkład energii elektronów emitowanych z katody w wyniku emisji termicznej. Na podstawie charakterystyki prądowo-napięciowej wyznaczono temperaturę katody. Otrzymane wyniki częściowo pokrywają się z teoretycznym rozkładem Maxwella. Zauważono jednak pewne odchylenia, mogące wynikać z błędów pomiarowych lub kontaktowej różnicy potencjałów.

Literatura

- [1] Autor nieznany. Badanie właściwości statystycznych elektronów emitowanych z katody lampy próżniowej. *Centralne Laboratorium Fizyki*.

8 Wkład poszczególnych osób w wykonanie ćwiczenia:

1. Katarzyna Skoczyła: opracowanie niepewności pomiarów, charakter termoemisji (zróżniczkowana graficznie zależność prądu od pierwiastka napięcia)
2. Alicja Przeździecka: Wstęp, opis matematyczny, charakter termoemisji (część dotycząca zależności prądu od pierwiastka napięcia)
3. Miłosz Zieliński: Układ pomiarowy, dane eksperymentalne, wyznaczenie temperatur katody