

Ćwiczenie nr 43

Prawo Ohma dla prądu stałego

1 Wstęp teoretyczny

1.1 Przewodnictwo elektryczne w metalach i półprzewodnikach

W metalach nośnikami prądu elektrycznego są elektrony swobodne, tworzące tzw. gaz elektronowy. Ich koncentracja jest stała i niezależna od temperatury (Ling et al., 2018). W półprzewodnikach samoistnych nośnikami są elektrony w paśmie przewodnictwa oraz dziury w paśmie walencyjnym, powstające w wyniku generacji termicznej. Koncentracja nośników w półprzewodnikach silnie zależy od temperatury oraz obecności domieszek (półprzewodniki typu n i p) (wst, 2025).

1.2 Natężenie prądu i prawo Ohma

Natężenie prądu elektrycznego I definiuje się jako stosunek ładunku dQ przepływającego przez poprzeczny przekrój przewodnika do czasu dt :

$$I = \frac{dQ}{dt}$$

Jednostką natężenia w układzie SI jest amper (A). Dla przewodników metalicznych w stałej temperaturze obowiązuje prawo Ohma, stwierdzające proporcjonalność natężenia prądu do przyłożonego napięcia U :

$$I = \frac{1}{R}U = GU$$

gdzie R to opór elektryczny, a G to konduktancja (Ling et al., 2018).

1.3 Opór elektryczny i jego zależność od temperatury

Opór elektryczny R jest miarą przeciwstawiania się elementu przepływowi prądu. Jednostką oporu jest om (Ω). Dla metali opór rośnie wraz ze wzrostem temperatury w przybliżeniu liniowo:

$$R(T) = R_0[1 + \alpha(T - T_0)]$$

Wynika to ze wzrostu amplitudy drgań sieci krystalicznej, co zwiększa prawdopodobieństwo rozpraszania elektronów. W półprzewodnikach opór maleje wykładniczo ze wzrostem temperatury:

$$R(T) = A \exp\left(\frac{E_g}{2kT}\right)$$

Jest to spowodowane gwałtownym wzrostem koncentracji nośników ładunku, który dominuje nad efektem spadku ich ruchliwości (wst, 2025).

1.4 Model pasmowy

Właściwości elektryczne ciał stałych wyjaśnia teoria pasmowa, zakładająca istnienie dozwolonych pasm energetycznych (walencyjnego i przewodnictwa) rozdzielonych pasmem wzbronionym o szerokości E_g .

- **Metale:** Pasma walencyjne zachodzi na pasmo przewodnictwa lub pasmo przewodnictwa jest tylko częściowo wypełnione. Brak przerwy energetycznej ($E_g = 0$).
- **Półprzewodniki:** Istnieje niewielka przerwa energetyczna ($E_g < 2\text{ eV}$). W $T = 0\text{ K}$ pasmo przewodnictwa jest puste.
- **Izolatory:** Szeroka przerwa energetyczna ($E_g > 3\text{ eV}$) uniemożliwia przeskok elektronów do pasma przewodnictwa w temperaturze pokojowej (Ling et al., 2018).

1.5 Charakterystyki prądowo-napięciowe

Charakterystyka $I(U)$ obrazuje zależność prądu płynącego przez element od przyłożonego napięcia.

- **Opór drutowy:** Charakterystyka liniowa, zgodna z prawem Ohma. Nachylenie prostej odpowiada konduktancji $1/R$.
- **Żarówka:** Element nieliniowy. Wraz ze wzrostem napięcia rośnie temperatura włókna, co powoduje wzrost oporu i wolniejszy przyrost prądu (charakterystyka o malejącym nachyleniu).
- **Dioda półprzewodnikowa:** Przewodzi prąd głównie w jedną stronę (polaryzacja przewodzenia). Zależność opisuje równanie Shockleya:

$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{eU}{nkT}\right) - 1 \right]$$

W kierunku zaporowym płynie jedynie pomijalnie mały prąd nasycenia I_s (wst, 2025).

- **Termistor:** Półprzewodnikowy rezystor czuły na temperaturę. Płynący prąd powoduje wydzielanie ciepła Joule'a, co zmienia jego rezystancję (zazwyczaj maleje dla termistorów NTC), prowadząc do nieliniowej charakterystyki $I(U)$.

1.6 Reżimy pracy zasilacza

Zasilacz laboratoryjny może pracować w dwóch podstawowych trybach (ins, 2025):

- **CV (Constant Voltage):** Stabilizacja napięcia. Zasilacz utrzymuje stałe napięcie wyjściowe niezależnie od obciążenia (dopóki pobór prądu nie przekroczy ustawionego limitu).
- **CC (Constant Current):** Stabilizacja prądu. Zasilacz utrzymuje stały prąd wyjściowy, dostosowując napięcie do rezystancji obciążenia. Tryb ten aktywuje się po przekroczeniu ustawionego limitu prądowego.

2 Opis doświadczenia

Układ pomiarowy zasilano zasilaczem ZT-980-2M pracującym w trybie stabilizacji napięcia lub prądu.

1. **Drut oporowy:** Zasilacz ustawiono w trybie regulacji napięcia (CV). Zmierzono zależność natężenia prądu od napięcia w zakresie $0 - 1,5\text{ V}$ z krokiem co ok. 100 mV .
2. **Dioda prostownicza:** Zasilacz przełączono w tryb regulacji prądu (CC) w celu ochrony elementu przed uszkodzeniem. Wykonano pomiary w kierunku przewodzenia do natężenia 200 mA .
3. **Żarówka:** Pomiary wykonano w trybie CC, zmieniając natężenie prądu w zakresie $0 - 200\text{ mA}$.

Termistor został pominięty w badaniach. Niepewności pomiarowe oszacowano na podstawie ostatniej cyfry znaczącej wyświetlanej na miernikach cyfrowych.

3 Wyniki pomiarów

W poniższych tabelach zestawiono wyniki pomiarów dla poszczególnych elementów.

Tabela 1: Wyniki pomiarów dla drutu oporowego (Zadanie 1).

$U\text{ [V]}$	$I\text{ [A]}$
0,0001	0,01
0,1092	0,02
0,1985	0,03
0,2902	0,04
0,4029	0,06
0,5119	0,07
0,6001	0,08
0,6920	0,09
0,8000	0,10
0,9000	0,11
1,0090	0,12
1,1000	0,13
1,2000	0,14
1,3000	0,15
1,3990	0,16
1,5000	0,17

Tabela 2: Wyniki pomiarów dla diody prostowniczej (Zadanie 2).

U [V]	I [A]	U [V]	I [A]
0,5699	0,0001	0,9139	0,1002
0,6744	0,0050	0,9314	0,1100
0,7296	0,0101	0,9501	0,1200
0,8083	0,0200	0,9699	0,1299
0,8788	0,0300	0,9904	0,1398
0,8797	0,0400	0,9150	0,1503
0,8199	0,0501	0,9270	0,1603
0,8406	0,0600	0,9370	0,1699
0,8600	0,0702	0,9490	0,1803
0,8705	0,0800	0,9610	0,1902
0,8973	0,0900	0,9720	0,1999

Tabela 3: Wyniki pomiarów dla żarówki (Zadanie 3).

U [V]	I [A]	U [V]	I [A]
0,0150	0,0002	0,9960	0,1104
0,0345	0,0101	1,1670	0,1198
0,0713	0,0200	1,3690	0,1303
0,1125	0,0303	1,5740	0,1404
0,1580	0,0401	1,7830	0,1501
0,2149	0,0500	2,0100	0,1602
0,3020	0,0600	2,2350	0,1698
0,4179	0,0701	2,4880	0,1801
0,5811	0,0803	2,7430	0,1901
0,7472	0,0900	3,0030	0,2000
0,9242	0,1001		

4 Opracowanie wyników

4.1 Wyznaczenie oporu drutu oporowego

Znaleziono równanie prostej dla oporu drutowego metodą regresji liniowej. Przyjęto zależność $I(U) = GU + b$, gdzie G to konduktancja. Na podstawie danych z Tabeli 1:

$$I(U) = 0,1072 \cdot U + 0,0120$$

Opór elektryczny R wyznaczono jako odwrotność współczynnika kierunkowego $G = 0,1072$ S:

$$R = \frac{1}{G} \approx 9,33 \Omega$$

Niepewność oporu $u(R)$ obliczono w oparciu o błąd standardowy dopasowania prostej:

$$u(R) = 0,14 \Omega$$

4.2 Wyznaczenie oporu różniczkowego żarówki

Wyznaczono opór różniczkowy R_d żarówki dla napięcia bliskiego 600 mV. Wykorzystano dwa punkty pomiarowe: $(U_1, I_1) = (0,5811 \text{ V}, 0,0803 \text{ A})$ oraz $(U_2, I_2) = (0,7472 \text{ V}, 0,0900 \text{ A})$.

$$R_d = \frac{dU}{dI} \approx \frac{U_2 - U_1}{I_2 - I_1} = \frac{0,7472 - 0,5811}{0,0900 - 0,0803} = \frac{0,1661}{0,0097} \approx 17,1 \Omega$$

Niepewność $u(R_d)$ oszacowano metodą różniczki zupełnej, uwzględniając niepewności odczytu napięcia ($u(U) = 0,0001 \text{ V}$) i prądu ($u(I) = 0,0001 \text{ A}$):

$$u(R_d) = 2,5 \Omega$$

5 Wnioski

- **Drut oporowy:** Charakterystyka jest liniowa, co potwierdza zgodność z prawem Ohma dla metali w stałej temperaturze. Wyznaczona wartość rezystancji wynosi:

$$R = 9,33 \Omega, \quad u(R) = 0,14 \Omega$$

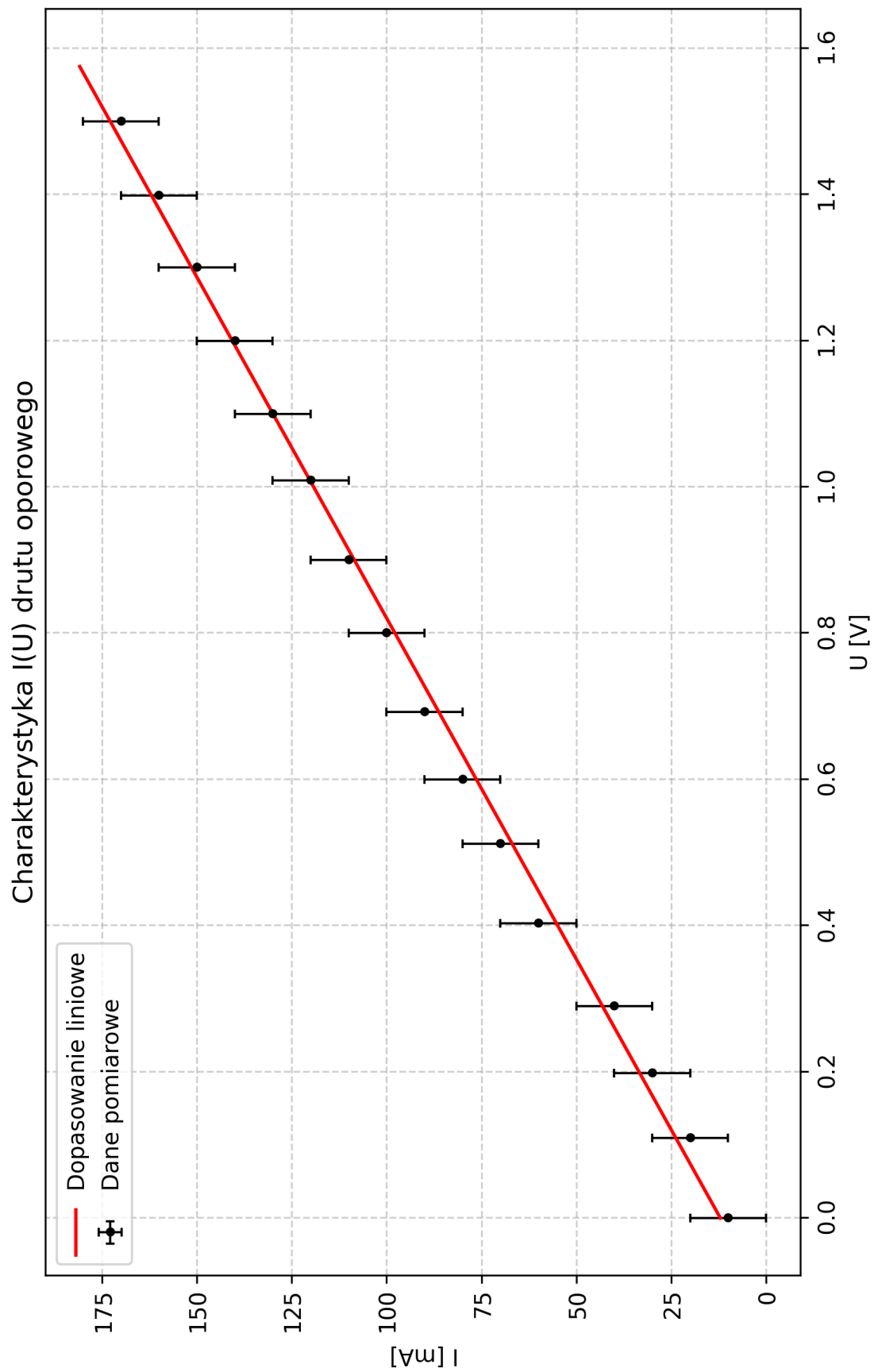
Dominującym składnikiem niepewności jest błąd dopasowania regresji liniowej.

- **Żarówka:** Charakterystyka jest nieliniowa (nachylenie maleje ze wzrostem napięcia), co jest przykładem elementu niespełniającego prawa Ohma (opór zależny od temperatury). Opór różniczkowy przy napięciu ok. 0,6 V wynosi:

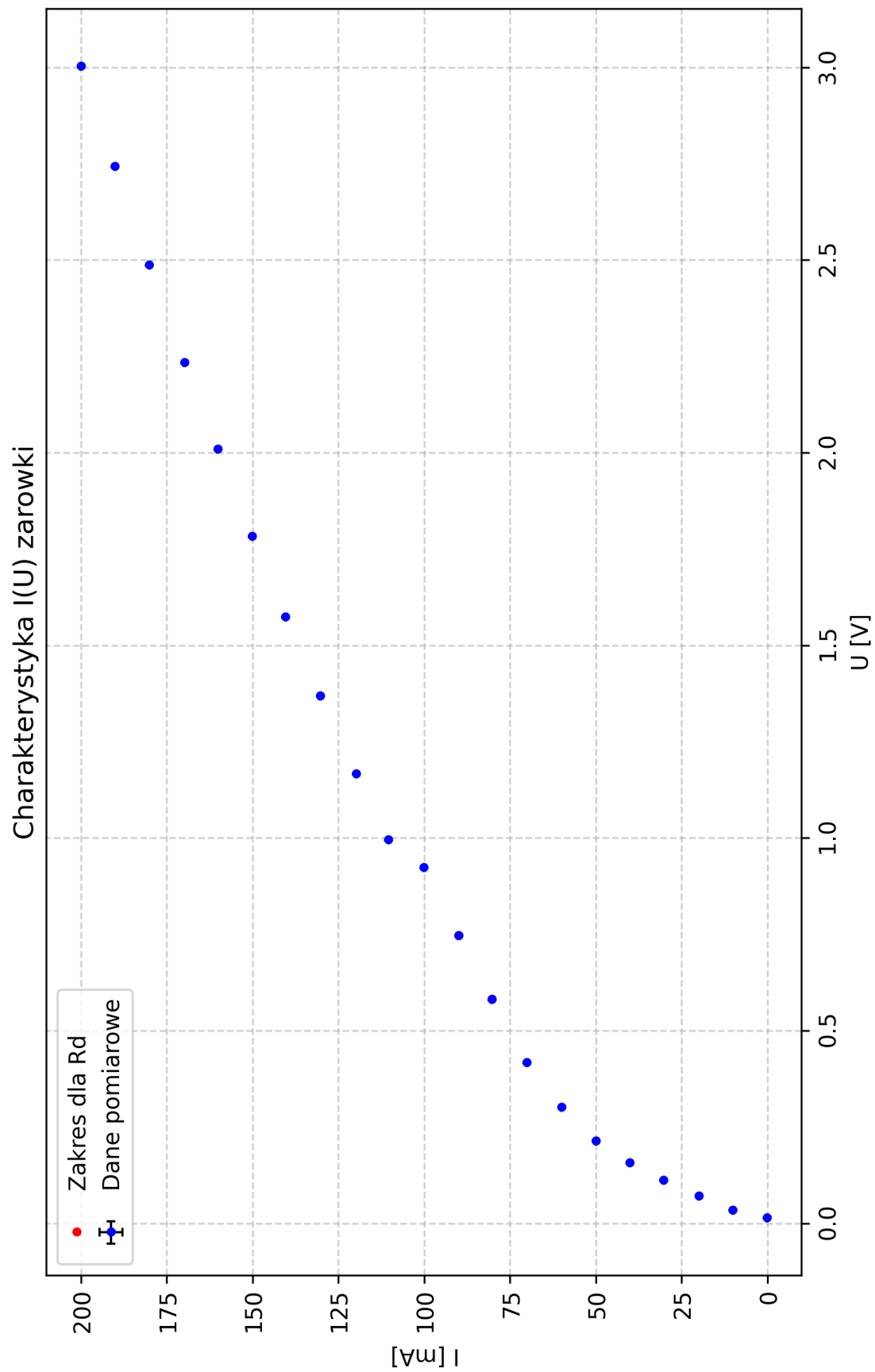
$$R_d = 17,1 \Omega, \quad u(R_d) = 2,5 \Omega$$

- **Dioda prostownicza:** Element ten również nie spełnia prawa Ohma, wykazując silną asymetrię przewodzenia i wykładniczy wzrost prądu w kierunku przewodzenia.

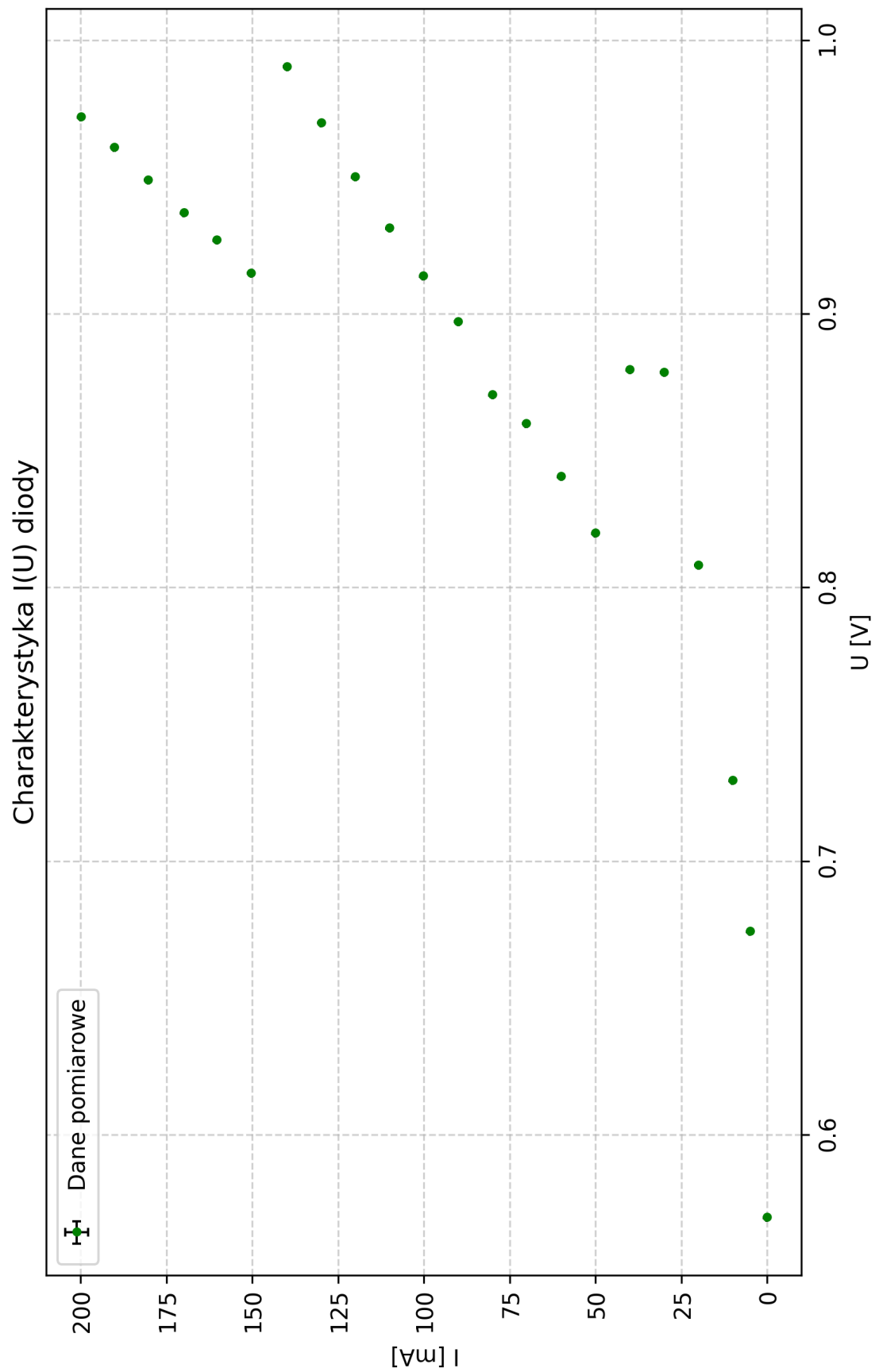
6 Wykresy



Rysunek 1: Charakterystyka prądowo-napięciowa drutu oporowego.



Rysunek 2: Charakterystyka prądowo-napięciowa żarówki.



Rysunek 3: Charakterystyka prądowo-napięciowa diody w kierunku przewodzenia.

Literatura

- (2025). *Instrukcja do ćwiczenia 43: Pomiary charakterystyk elementów nieliniowych*. Instytut Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Wrocławskiego.
- (2025). *Wstęp do ćwiczenia 43: Przewodnictwo elektryczne*. Instytut Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Wrocławskiego.
- Ling, S. J., Sanny, J., and Moebs, W. (2018). *Fizyka dla szkół wyższych, Tom 3*. OpenStax. Dostęp: 13.10.2025.