

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 samoistnymi 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 przeciwwstawiania 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:** Pasmo walencyjne zachodzi na pasmo przewodnictwa lub pasmo przewodnictwa jest tylko częściowo zapełnione. 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:

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

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

- **Termistor:** Półprzewodnikowy rezystor czuły na temperaturę. Pływący 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 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 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 [V] | I [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 $G = 0,1072 \text{ S}$:

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

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:

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

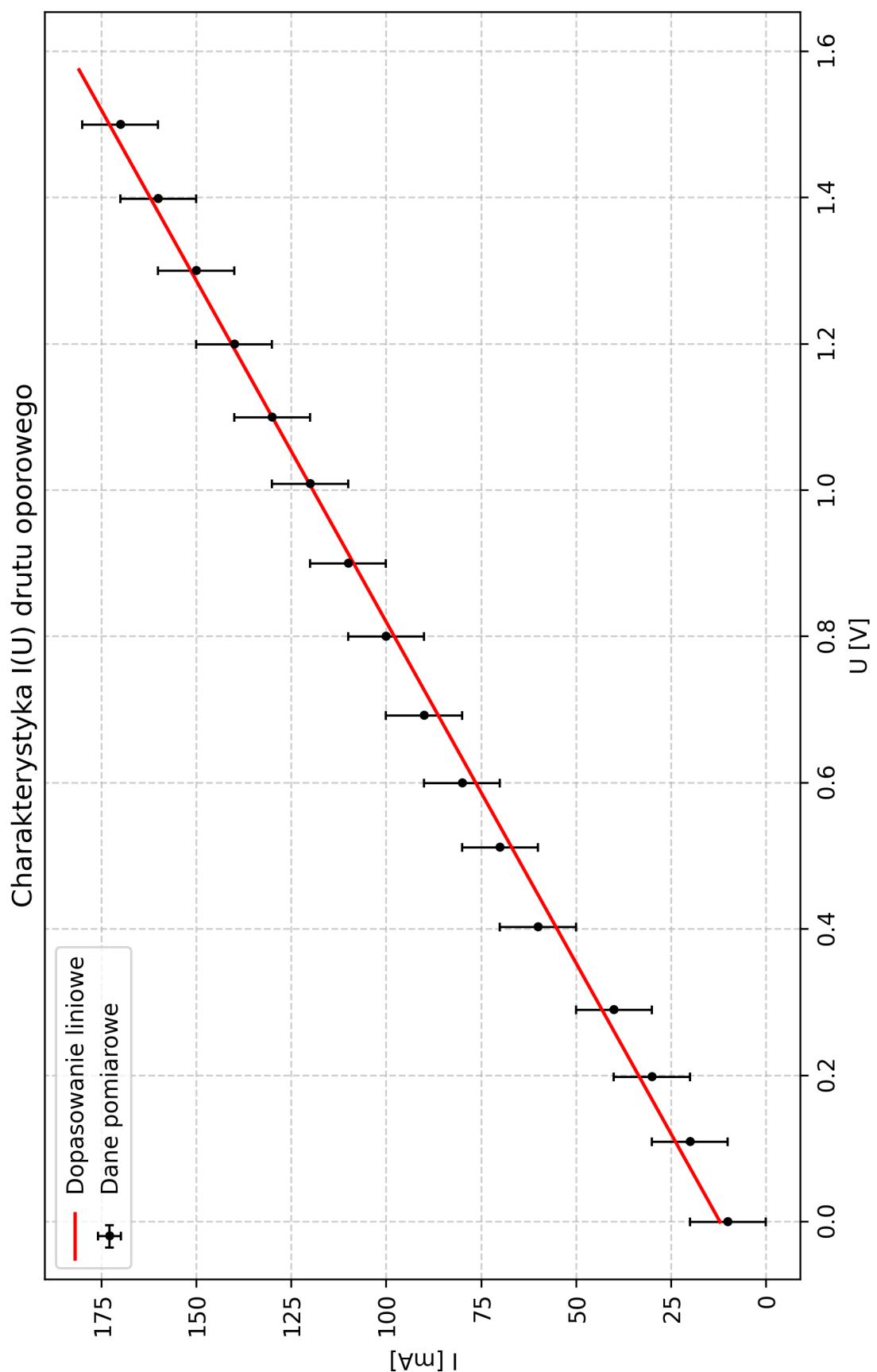
Dominującym składnikiem niepewności jest błąd dopasowania regresji liniowej.

- **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:

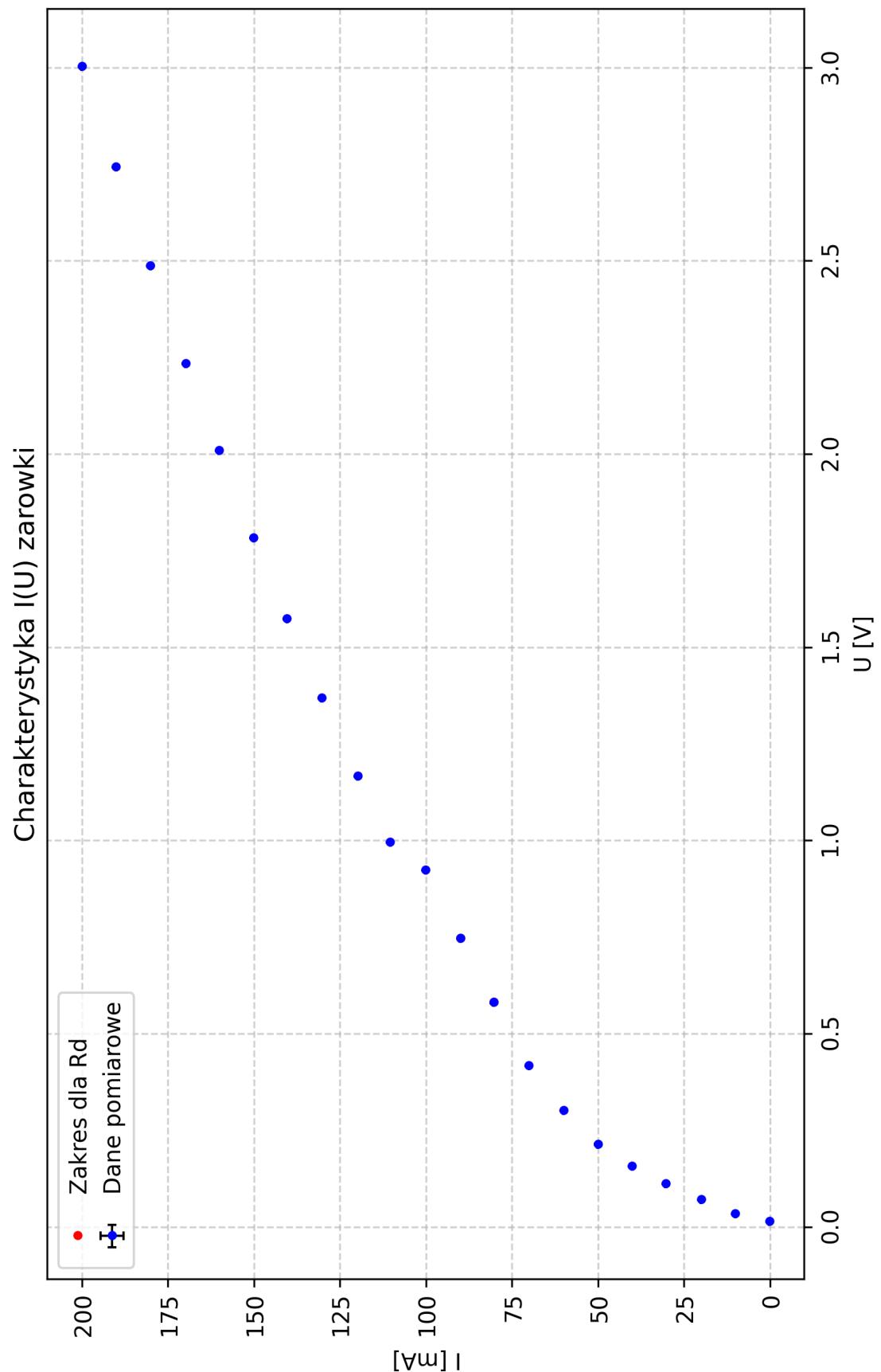
$$R_d = 17,1 \Omega, \quad u(R_d) = 2,5 \Omega$$

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

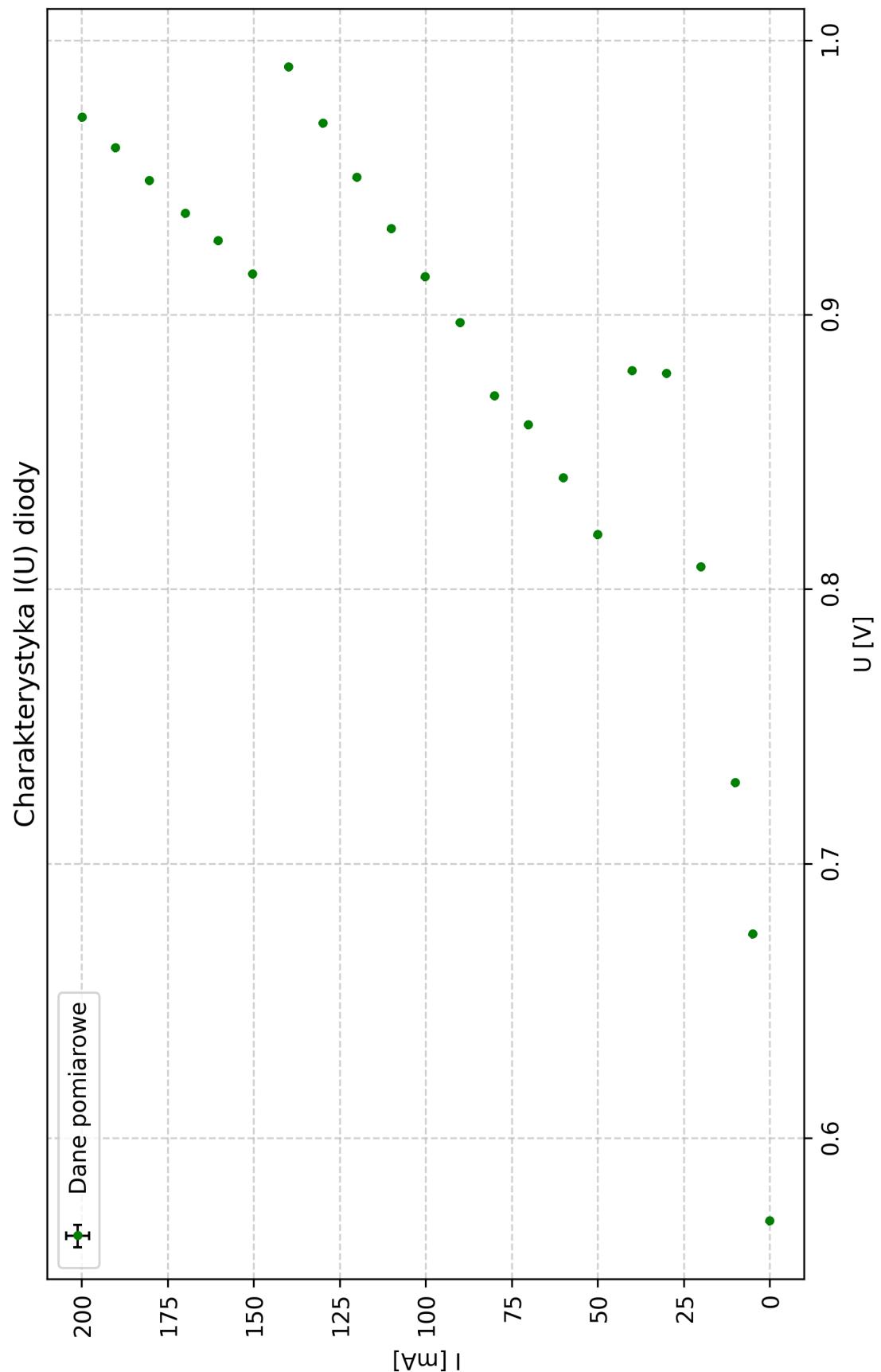
6 Wykresy



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.