

SPRAWOZDANIE

ćwiczenie V

fotodiody

Emilia Szymańska
Marcin Gruchała

10.03.2019r.

Cel ćwiczenia: zmierzenie charakterystyk prądowo-napięciowych dla fotodiody w zależności od tego, czy jest ona oświetlona czy nie, sprawdzenie prawa odwrotnych kwadratów, wyznaczenie rezystancji szeregowej i wskazanie materiału, z jakiego jest wykonana fotodiody.

Zestaw przyrządów pomiarowych:

- Układ zawierający fotodiody, źródło napięcia, potencjometry oraz składający się z takiego samego układu zasilania obwód z diodą LED
- Mierniki podłączone do fotodiody: woltomierz (BM811) i amperomierz (BM857a)
- Miernik podłączony do diody LED: amperomierz (BM875)

Wyniki

Mierzmy charakterystykę prądowo-napięciową dla nieoświetlonej fotodiody w zakresie od -4 V w kierunku zaporowym i do 40 mA w kierunku przewodzenia.

Korzystając z informacji zawartych w kartach katalogowych multimetrów, wyników i wzorów $u(U) = \frac{\Delta U}{\sqrt{3}}$, $u(I) = \frac{\Delta I}{\sqrt{3}}$ obliczamy niepewności pomiaru dla prądu i dla napięcia, a następnie zaokrąglamy w górę (w zależności od postaci wyniku i niedokładności zazwyczaj z dokładnością do dwóch cyfr znaczących). Dokładność pomiaru ΔU danej wielkości uzyskujemy poprzez podstawienie do wzoru $\Delta U = x \cdot rdg + y \cdot dgt$, gdzie rdg oznacza wartość zmierzoną, a dgt rozdzielczość miernika. x oraz y odczytujemy z karty katalogowej miernika w zależności od mierzonego zakresu. Dla przykładu $U = 5 \text{ mV}$ odczytujemy z karty katalogowej, że $x = 0,12\%$, a $y = 2$.

Wówczas

$$u(U) = \frac{0,12 \cdot \frac{1}{100} \cdot 5 + 2 \cdot 1}{\sqrt{3}} \text{ mV} = 1,1581646399... \text{ mV} \approx 2 \text{ mV}$$

W przypadku wyników wyższych niż 50 mV za x przyjmujemy wartość 0,06%, y pozostaje niezmiennie. Na przykład dla $U = 55 \text{ mV}$

$$u(U) = \frac{0,06 \cdot \frac{1}{100} \cdot 55 + 2 \cdot 1}{\sqrt{3}} \text{ mV} = 1,1737530972... \text{ mV} \approx 2 \text{ mV}$$

Analogicznie postępujemy w przypadku wartości natężenia prądu. Mamy tutaj jednak wartości x i y: dla $I < 500\mu A$ $x=0,15\%$, $y = 20$, a dla $500\mu A < I < 5000\mu A$ $x = 0,1\%$, $y = 20$. Inaczej jednak będzie z rozdzielczością, gdyż na wyniki i kartę katalogową miernika zauważamy, że rozdzielczość wynosi 0,001 mA. Wówczas przykładowo

$$u(U) = \frac{0,1 \cdot \frac{1}{100} \cdot 1,983 + 20 \cdot 0,001}{\sqrt{3}} \text{ mV} = 0,01269189... \text{ mV} \approx 0,013 \text{ mV}$$

W ten sposób otrzymaliśmy następujące wyniki dla kierunku przewodzenia i zaporowego:

U [mV]	u(U) [mV]	I [mA]	u(I) [mA]
-13	2	-0,001	0,012
-16	2	-0,001	0,012
-22	2	0,000	0,012
-29	2	0,000	0,012
-31	2	0,000	0,012
-34	2	0,000	0,012
-35	2	0,000	0,012
-36	2	0,000	0,012
-40	2	0,000	0,012
-42	2	-0,001	0,012
-3856	3	-0,001	0,012
-3871	3	0,000	0,012
-3893	3	0,000	0,012
-3911	3	0,000	0,012
-3933	3	0,000	0,012
-3956	3	-0,001	0,012
-3976	3	-0,001	0,012
-3993	3	0,000	0,012
-4006	4	0,000	0,012
-4007	4	0,000	0,012

(a) wyniki dla kierunku zaporowego

U [mV]	u(U) [mV]	I [mA]	u(I) [mA]
5	2	0,000	0,012
6	2	-0,001	0,012
12	2	-0,001	0,012
13	2	-0,001	0,012
16	2	-0,001	0,012
19	2	-0,001	0,012
21	2	-0,001	0,012
26	2	-0,001	0,012
27	2	-0,001	0,012
29	2	0,000	0,012
878	2	38,484	0,034
879	2	38,697	0,034
879	2	38,915	0,035
880	2	39,189	0,035
881	2	39,413	0,035
882	2	39,677	0,035
883	2	39,884	0,035
883	2	39,992	0,035
883	2	40,086	0,035
883	2	40,089	0,035

(b) wyniki dla kierunku przewodzenia

Po stworzeniu dla wyników wykresu punktowego, zaznaczeniu słupków błędów (żółtym kolorem) i linii trendu dla punktów odpowiadających zakresowi dużych napięć (kolor czerwony) otrzymaliśmy następujący wykres charakterystyki prądowo-napięciowej:

Wykorzystując funkcję regresji liniowej dla dużych napięć otrzymaliśmy następujące dane dla prostej $y=ax+b$ aproksymującej te punkty charakterystyki I-V:

$$a = 0,26413 \quad \Delta a = 0,00121 \quad b = -193,459 \quad \Delta b = 1,03074$$

Na tej podstawie możemy obliczyć oporność szeregową R_s ze wzoru $R_s = \frac{1}{a}$ oraz jej niepewność opisaną wzorem $u(R) = \frac{\Delta a}{a^2}$. Wówczas:

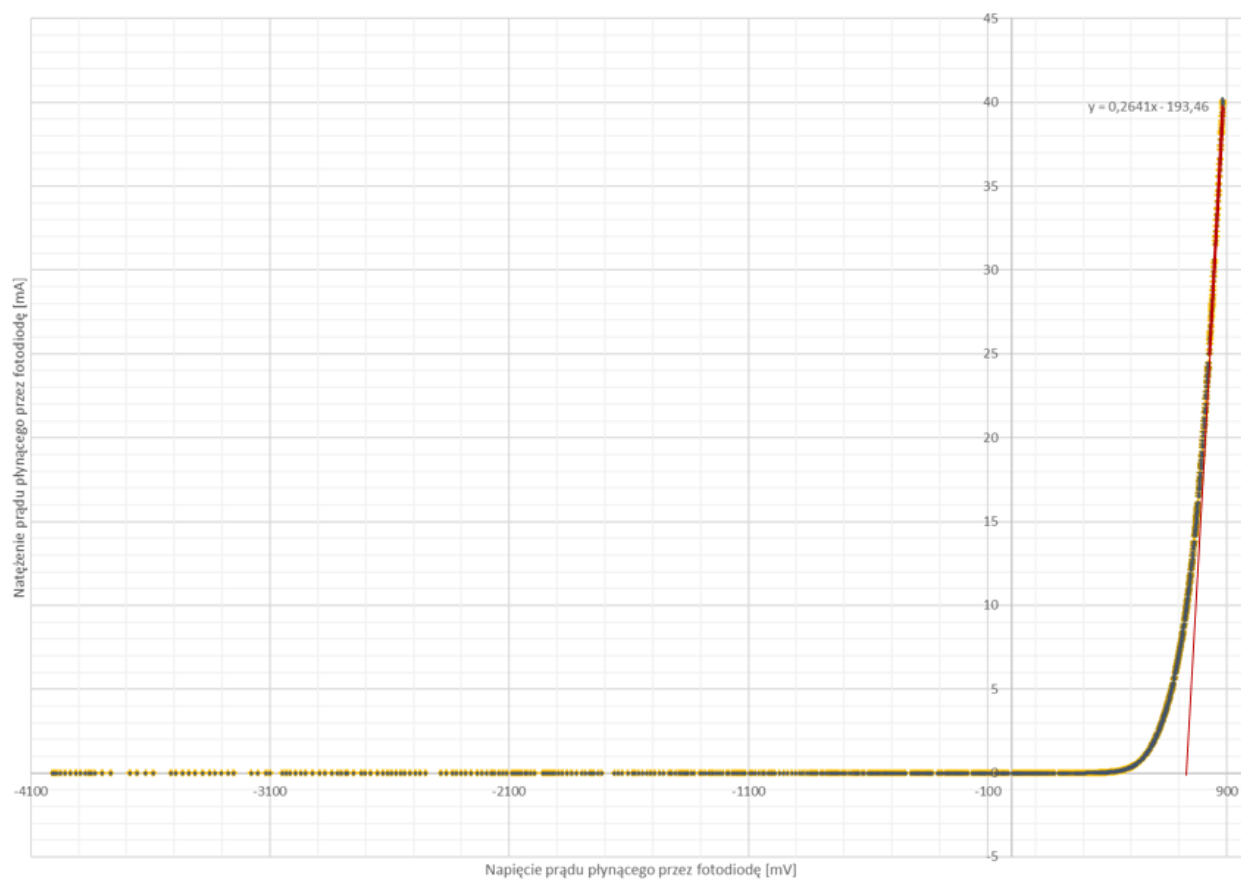
$$u(R) = \frac{0,00121}{0,26413^2} \text{ m}\Omega = 0,017344... \text{ m}\Omega \approx 0,018 \text{ m}\Omega$$

$$R_s = \frac{1}{0,26413} \text{ m}\Omega = 3,786014... \text{ m}\Omega \approx 3,786 \text{ m}\Omega$$

Ostatecznie $R_s = 3,786 \pm 0,018 \text{ m}\Omega$. Następnie możemy wyznaczyć wysokość bariery potencjału V_{bi} ze wzoru $V_{bi} = -\frac{b}{a}$ oraz jej niepewność $u(V_{bi}) = \sqrt{\left[\frac{b}{a^2} \Delta a\right]^2 + \left[\frac{1}{a} \Delta b\right]^2}$.

$$u(V_{bi}) = \sqrt{\left[\frac{-193,459}{0,26413^2} \cdot 0,00121\right]^2 + \left[\frac{1}{0,26413} \cdot 1,03074\right]^2} \text{ mV} = 5,146564... \approx 5,2 \text{ mV}$$

Charakterystyka prądowo-napięciowa nieoświetlonej fotodiody

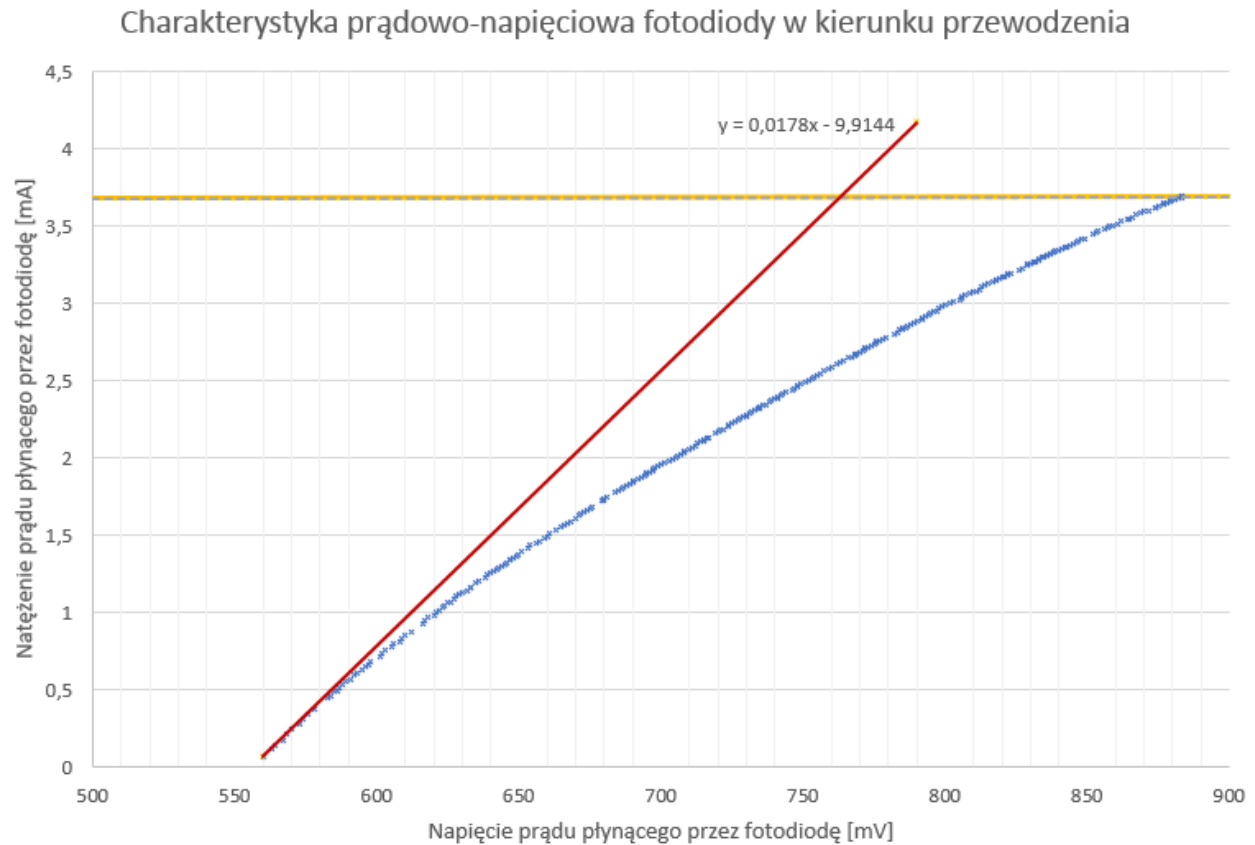


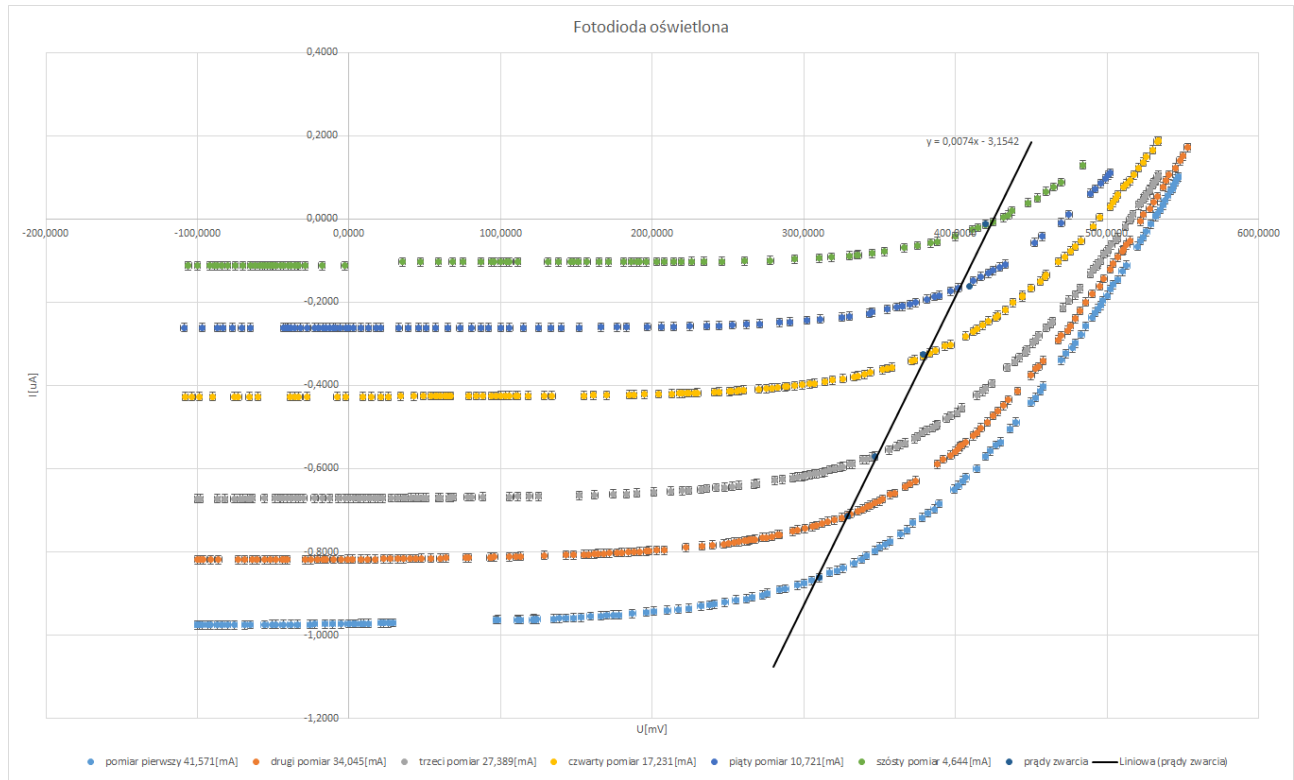
$$V_{bi} = -\frac{-193,459}{0,26413} \text{ mV} = 732,43857... \text{ mV} \approx 732,4 \text{ mV}$$

Na tej podstawie można stwierdzić, że fotodioda jest wykonana z krzemu, gdyż dla krzemu bariera potencjału wynosi około 0,7 V.

Aby wyznaczyć rezystancję szeregową narysowaliśmy charakterystykę $f(V) = \ln(I)$. Dla największej wartości natężenia prądu $I_0 = 40,089$ w kierunku przewodzenia wyznaczyliśmy za pomocą prostej $y = \ln(I_0)$ oraz prostej będącej przybliżeniem prostoliniowego odcinka charakterystyki I-V (wykres poniżej): $y = 0,0178x - 9,9144$. $\Delta V = 119,7933781 \text{ mV} \approx 119,79 \text{ mV}$. Szukaną oporność szeregową R_s obliczamy korzystając z zależności $R_s = \frac{\Delta V}{I_0}$. Zatem:

$$R_s = \frac{119,79}{40,089} = 2,9881014... \text{ m}\Omega \approx 2,99 \text{ m}\Omega$$





W przypadku oświetlania fotodiody LEDem, który był zasilany prądem o różnych natężeniach powstał wykres składający się z 6 krzywych. Niedokładności pomiarów liczymy ze wzorów:

$$u(U) = \frac{\text{dokładność pomiaru napięcia}}{\sqrt{3}} \quad u(I) = \frac{\text{dokładność pomiaru natężenia}}{\sqrt{3}}$$

Dla przykładu dla pierwszych pomiarów:

$$u(U) = \frac{(0,06 \cdot 0,01 \cdot 113 + 2 \cdot 1)}{\sqrt{3}} \quad u(I) = \frac{(0,12 \cdot 0,01 \cdot (-0,96) + 2 \cdot 0,0001)}{\sqrt{3}}$$

Wartość prądów zwarcia I_{SC} oraz napięć rozwarcia V_{OC} wyznaczamy na podstawie pomiarów, odczytując z nich wartości. Otrzymane wyniki znajdują się w tabelach poniżej.

Odczytane wartości I_{SC} zwiększone o stałą $\delta I = 100 \mu A$ nanosimy na wykres oraz łączymy je linią prostą. Znając jej współczynnik kierunkowy $a = 0,0074$ tej prostej liczymy wartość oporności szeregowej R_S ze wzoru:

$$R_s = \left| \frac{1}{a} \right| = \left| \frac{1}{0,0074} \right| = 135,1351 \mu\Omega$$

U[mV]	u(U)	I[μA]	u(I)
113	2	-0,96	-0,01
111	2	-0,96	-0,01
111	2	-0,96	-0,01
111	2	-0,96	-0,01
121	2	-0,96	-0,01
123	2	-0,96	-0,01
124	2	-0,96	-0,01
135	2	-0,96	-0,01
139	2	-0,96	-0,01
143	2	-0,96	-0,01
-76	2	-0,98	-0,01
-80	2	-0,98	-0,01
-84	2	-0,98	-0,01
-87	2	-0,98	-0,01
-91	2	-0,98	-0,01
-93	2	-0,98	-0,01
-97	2	-0,98	-0,01
-99	2	-0,98	-0,01
-100	2	-0,98	-0,01
-100	2	-0,98	-0,01

(c) wyniki dla $I_{LED}=41,571$ mA

U[mV]	u(U)	I[μA]	u(I)
93	2	-0,81	-0,01
94	2	-0,81	-0,01
96	2	-0,81	-0,01
106	2	-0,81	-0,01
110	2	-0,81	-0,01
113	2	-0,81	-0,01
129	2	-0,81	-0,01
143	2	-0,81	-0,01
148	2	-0,81	-0,01
155	2	-0,81	-0,01
-56	2	-0,82	-0,01
-61	2	-0,82	-0,01
-64	2	-0,82	-0,01
-69	2	-0,82	-0,01
-73	2	-0,82	-0,01
-86	2	-0,82	-0,01
-91	2	-0,82	-0,01
-96	2	-0,82	-0,01
-98	2	-0,82	-0,01
-100	2	-0,82	-0,01

(d) wyniki dla $I_{LED}=37,045$ mA

U[mV]	u(U)	I[μA]	u(I)
67	2	-0,67	-0,01
67	2	-0,67	-0,01
67	2	-0,67	-0,01
69	2	-0,67	-0,01
78	2	-0,67	-0,01
81	2	-0,67	-0,01
88	2	-0,67	-0,01
106	2	-0,67	-0,01
111	2	-0,67	-0,01
119	2	-0,67	-0,01
-65	2	-0,67	-0,01
-67	2	-0,67	-0,01
-70	2	-0,67	-0,01
-72	2	-0,67	-0,01
-76	2	-0,67	-0,01
-82	2	-0,67	-0,01
-87	2	-0,67	-0,01
-98	2	-0,67	-0,01
-100	2	-0,67	-0,01
-100	2	-0,67	-0,01

(e) wyniki dla $I_{LED}=27,389$ mA

U[mV]	u(U)	I[μA]	u(I)
49	2	-0,43	-0,01
54	2	-0,43	-0,01
57	2	-0,43	-0,01
58	2	-0,43	-0,01
60	2	-0,43	-0,01
63	2	-0,43	-0,01
64	2	-0,43	-0,01
66	2	-0,43	-0,01
67	2	-0,43	-0,01
79	2	-0,43	-0,01
-36	2	-0,43	-0,01
-39	2	-0,43	-0,01
-60	2	-0,43	-0,01
-66	2	-0,43	-0,01
-73	2	-0,43	-0,01
-76	2	-0,43	-0,01
-90	2	-0,43	-0,01
-99	2	-0,43	-0,01
-104	2	-0,43	-0,01
-108	2	-0,43	-0,01

(f) wyniki dla $I_{LED}=17,231$ mA

U[mV]	u(U)	I[μA]	u(I)
33	2	-0,26	-0,01
39	2	-0,26	-0,01
46	2	-0,26	-0,01
51	2	-0,26	-0,01
57	2	-0,26	-0,01
65	2	-0,26	-0,01
73	2	-0,26	-0,01
81	2	-0,26	-0,01
87	2	-0,26	-0,01
92	2	-0,26	-0,01
-41	2	-0,26	-0,01
-42	2	-0,26	-0,01
-43	2	-0,26	-0,01
-65	2	-0,26	-0,01
-71	2	-0,26	-0,01
-77	2	-0,26	-0,01
-83	2	-0,26	-0,01
-87	2	-0,26	-0,01
-97	2	-0,26	-0,01
-109	2	-0,26	-0,01

(g) wyniki dla $I_{LED}=10,721$ mA

U[mV]	u(U)	I[μA]	u(I)
35	2	-0,10	0,01
47	2	-0,10	0,01
59	2	-0,10	0,01
68	2	-0,10	0,01
75	2	-0,10	0,01
87	2	-0,10	0,01
94	2	-0,10	0,01
96	2	-0,10	0,01
100	2	-0,10	0,01
104	2	-0,10	0,01
-70	2	-0,11	0,01
-75	2	-0,11	0,01
-80	2	-0,11	0,01
-84	2	-0,11	0,01
-87	2	-0,11	0,01
-89	2	-0,11	0,01
-92	2	-0,11	0,01
-100	2	-0,11	0,01
-106	2	-0,11	0,01
-106	2	-0,11	0,01

(h) wyniki dla $I_{LED}=4,644$ mA

I LED[mA]	Isc[μA]	Voc[mV]
41,571	-0,961	532
34,045	-0,814	524
27,389	-0,669	516
17,231	-0,426	495
10,721	-0,261	475
4,644	-0,112	432

Na podstawie pomiarów odległości między źródłem światła (LEDem, przez który płynie prąd o natężeniu 41,615 mA) a fotodiodą oraz pomiarów natężenia prądu zwarcia fotodiody można narysować wykres, który ukazuje, czy prawo odwrotnych kwadratów jest spełnione. Najpierw obliczamy niepewność pomiaru odległości ze wzoru $u(d) = \frac{0,5\text{cm}}{\sqrt{3}} = 0,288675135 \text{ cm} \approx 0,29 \text{ cm}$. Następnie obliczamy $\frac{1}{d^2}$ dla każdego pomiaru. Na tej podstawie obliczamy niepewność pomiaru odwrotności kwadratu odległości $u\left(\frac{1}{d^2}\right) = \frac{2u(d)}{d^3}$. Przykładowo dla 10 cm:

$$u\left(\frac{1}{d^2}\right) = \frac{2 \cdot 0,29}{10^3} \frac{1}{\text{cm}^2} = 0,00058 \frac{1}{\text{cm}^2}$$

$$\frac{1}{d^2} = \frac{1}{10^2} \frac{1}{\text{cm}^2} = 0,01 \frac{1}{\text{cm}^2} = 0,01000 \frac{1}{\text{cm}^2}$$

Ostatecznie dla 10 cm mamy wynik $0,01000 \pm 0,00058 \frac{1}{\text{cm}^2}$. Następnie liczymy niepewność pomiaru natężenia prądu ze wzoru $u(I) = \frac{\Delta I}{\sqrt{3}}$. W przypadku 10 cm odpowiadające mu natężenie prądu to 37,02 μA. Wtedy:

$$u(I) = \frac{0,15 \cdot \frac{1}{100} \cdot 37,02 + 20 \cdot 0,01}{\sqrt{3}} = 3,321496099 \mu\text{A} \approx 3,4 \mu\text{A}$$

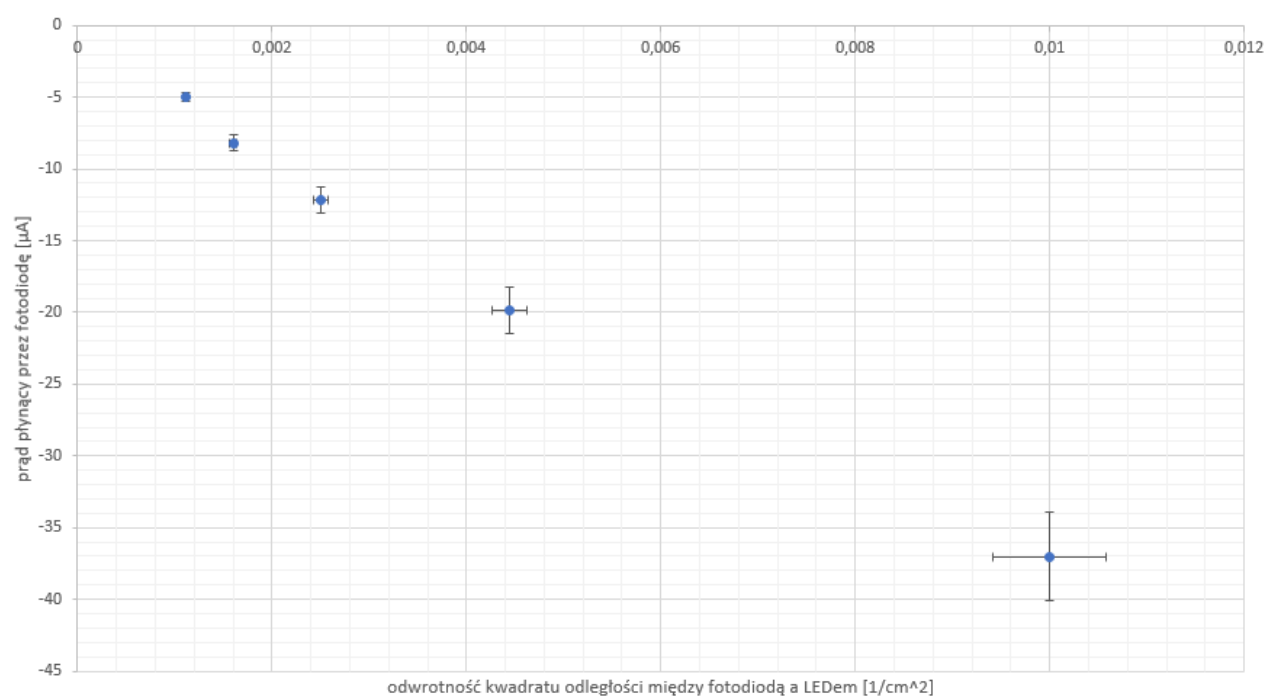
$$I = 37,0 \pm 3,4 \mu\text{A}$$

Końcowo otrzymujemy takie wyniki odpowiednio dla 10, 15, 20, 15, 25 i 30 cm oraz adekwatny do nich wykres (na tej i następnej stronie).

u(d) [cm]	$\frac{1}{d^2} [\frac{1}{\text{cm}^2}]$	$u(\frac{1}{d^2}) [\frac{1}{\text{cm}^2}]$	I [μA]	u(I) [μA]
0,29	0,01000	0,00058	-37,0	3,1
0,29	0,00444	0,00018	-19,9	1,6
0,29	0,002500	0,000073	-12,16	0,94
0,29	0,001600	0,000038	-8,18	0,60
0,29	0,001111	0,000022	-4,97	0,32

Można zatem zauważyć, że prawo odwrotnych kwadratów jest spełnione, gdyż wraz z kwadratem odległości maleje natężenie prądu płynącego przez fotodiodę.

Wykres zależności fotoprądu zwarcia od odwrotności kwadratu odległości między źródłem światła (LEDem) a fotodiodą



Wnioski: Wykonując to ćwiczenie wyznaczaliśmy rezystancję szeregową, która w zależności od metody obliczania przyjmowała różne wartości. Jest to spowodowane m.i. błędami metody, niedokładnościami mierników i układu pomiarowego. Niedokładności pomiarów mogą wynikać zarówno z błędów metody, niedokładności przyrządów pomiarowych (nie tylko podłączonych do fotodiody, ale także do LEDa), jak i błędnych odczytów wyników przez program, dokonywanych przez niego zaokrągleń, złych odczytań wyników z metrówki, przemieszczenia się układu fotodiody i LEDa podczas nakładania osłony chroniącej przed innym oświetleniem w przypadku sprawdzania prawa odwrotnych kwadratów, początkowych problemów z zasilaczem lub zaokrągleń wyników przy opracowywaniu wyników. Wykresy charakterystyki prądowo-napięciowej dla fotodiody pokazują naturę półprzewodników, które charakteryzują się tym, że w podpięte w kierunku zaporowym nie pozwalają na przepływ prądu, a w kierunku przewodzenia dopiero od momentu osiągnięcia konkretnej różnicy potencjałów. Na podstawie wyliczonej bariery potencjału da się zidentyfikować półprzewodnik, z którego jest wykonana fotodioda, a mianowicie krzem. Potwierdzona zostało także prawo odwrotnych kwadratów, które głosi, że wraz z kwadratem odległości maleje natężenie oświetlenia docierającego do fotodiody. Ćwiczenie polegające na pomiarze prądu fotodiody przy oświetlaniu jej potwierdza istnienie zjawiska fotowoltaicznego, które polega na powstawaniu siły elektromotorycznej pod wpływem promieniowania świetlnego.