

SPRAWOZDANIE

ćwiczenie II

pomiar charakterystyk I-V-T złącza p-n

Emilia Szymańska
Marcin Gruchała

31.03.2019r.

Cel ćwiczenia: zmierzenie charakterystyk prądowo-napięciowych dla krzemowego złącza typu p-n dla różnych temperatur w zakresie od około 22 do 60 °C, wyznaczenie wysokości barier potencjału, prądów nasycenia, współczynnika temperaturowego i energii wzbronionej.

Zestaw przyrządów pomiarowych wraz z układem:

- regulator temperatury o zakresie regulacji od 0 do 100 °C,
- skrzynka pomiarowa, w której znajduje się badana dioda krzemowa wraz z grzejnikiem
- mierniki podłączone do diody: woltomierz (M4650CR, zakres 2 V) i amperomierz (M4650CR, zakres 200mA)

Wyniki

Mierzymy charakterystykę prądowo-napięciową dla diody krzemowej w kierunku przewodzenia dla siedmiu różnych temperatur.

Korzystając z informacji zawartych w karcie katalogowej multimetru, 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 w przypadku zakresów naszych pomiarów napięcia uzyskujemy poprzez podstawienie do wzoru $\Delta U = 0,05\% \cdot rdg + 3 \cdot dgt$, gdzie rdg oznacza wartość zmierzoną, a dgt rozdzielczość pomiaru. Dla przykładu $U = 57,2$ mV:

$$u(U) = \frac{0,05 \cdot \frac{1}{100} \cdot 57,2 + 3 \cdot 0,1}{\sqrt{3}} \text{ mV} = 0,1987... \text{ mV} \approx 0,2 \text{ mV}$$

Analogicznie postępujemy w przypadku wartości natężenia prądu. Mamy tutaj jednak wartości $x = 0,5$ % i $y = 3$, rozdzielczość natomiast wynosi 0,01 mA. Wówczas przykładowo dla $I = 1,91$ mA:

$$u(I) = \frac{0,5 \cdot \frac{1}{100} \cdot 1,91 + 3 \cdot 0,01}{\sqrt{3}} \text{ mA} = 0,022834... \text{ mA} \approx 0,03 \text{ mA}$$

W ten sposób otrzymaliśmy następujące wyniki dla kierunku przewodzenia dla siedmiu różnych pomiarów temperatur umieszczone na końcu sprawozdania (w każdym przypadku dokładność temperatury odczytujemy do 2 °C).

Po stworzeniu dla wyników wykresu punktowego, zaznaczeniu słupków błędów i linii trendu dla punktów odpowiadających zakresowi dużych napięć otrzymaliśmy dla każdego wykres charakterystyki prądowo-napięciowej (wykresy pod koniec sprawozdania).

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

- $t=22\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$a = 0,3173 \frac{A}{V} \quad \Delta a = 0,0014 \frac{A}{V} \quad b = -229,05 \text{ mA} \quad \Delta b = 1,19 \text{ mA}$$

- $t=28\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$a = 0,30290 \frac{A}{V} \quad \Delta a = 0,00095 \frac{A}{V} \quad b = -215,06 \text{ mA} \quad \Delta b = 0,78 \text{ mA}$$

- $t=34\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$a = 0,283 \frac{A}{V} \quad \Delta a = 0,002 \frac{A}{V} \quad b = -196,65 \text{ mA} \quad \Delta b = 0,96 \text{ mA}$$

- $t=40\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$a = 0,291 \frac{A}{V} \quad \Delta a = 0,00073 \frac{A}{V} \quad b = -201,9 \text{ mA} \quad \Delta b = 0,6 \text{ mA}$$

- $t=46\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$a = 0,272 \frac{A}{V} \quad \Delta a = 0,00145 \frac{A}{V} \quad b = -184,704 \text{ mA} \quad \Delta b = 1,12 \text{ mA}$$

- $t=52\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$a = 0,27 \frac{A}{V} \quad \Delta a = 0,000959 \frac{A}{V} \quad b = -180,988 \text{ mA} \quad \Delta b = 0,77 \text{ mA}$$

- $t=60\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$a = 0,267 \frac{A}{V} \quad \Delta a = 0,0012 \frac{A}{V} \quad b = -176,236 \text{ mA} \quad \Delta b = 0,94 \text{ mA}$$

Na tej podstawie możemy wyznaczyć wysokości potencjału wbudowanego V_{bi} ze wzoru $V_{bi} = -\frac{b}{a}$ wraz z jej niepewnością

$u(V_{bi}) = \sqrt{\left[\frac{b}{a^2} \Delta a\right]^2 + \left[\frac{1}{a} \Delta b\right]^2}$ Wówczas przykładowo dla $t=22^{\circ}\text{C}$:

$$u(V_{bi}) = \sqrt{\left[\frac{-229,05}{0,3173^2} \cdot 0,0014\right]^2 + \left[\frac{1}{0,3173} \cdot 1,19\right]^2} \text{ mV} = 4,92036... \approx 5 \text{ mV}$$

$$V_{bi} = -\frac{-229,05}{0,3173} \text{ mV} = 721,872... \text{ mV} \approx 722 \text{ mV}$$

Ostatecznie:

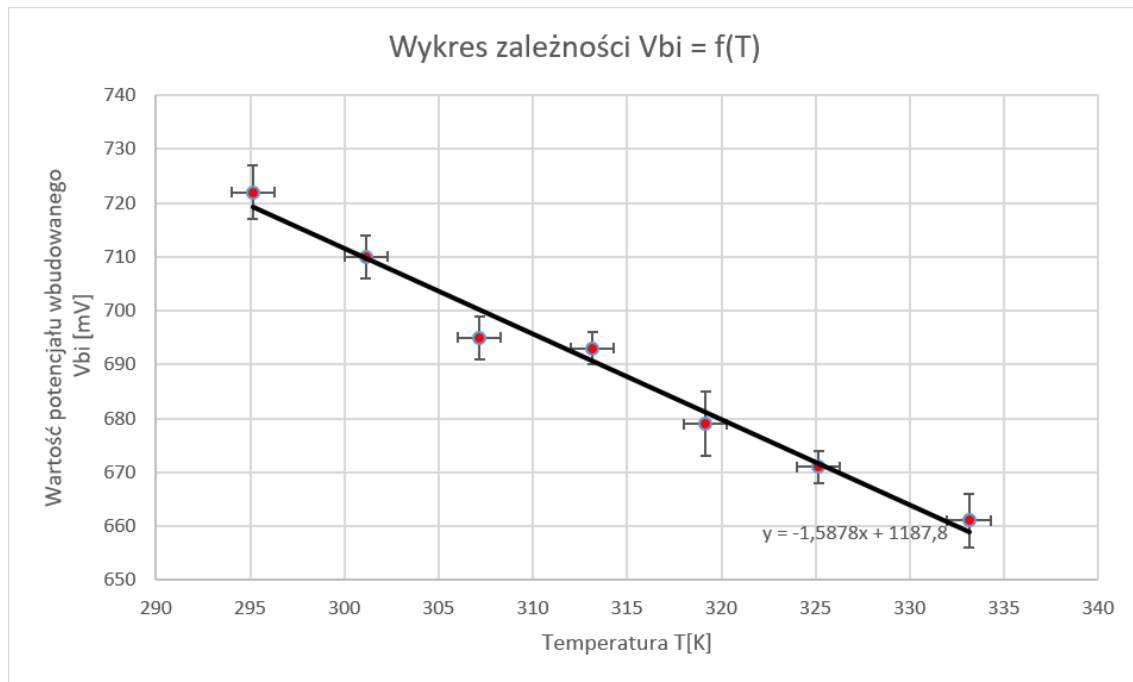
- $t = 22^{\circ}\text{C}$: $V_{bi} = 722 \pm 5 \text{ mV}$
- $t = 28^{\circ}\text{C}$: $V_{bi} = 710 \pm 4 \text{ mV}$
- $t = 34^{\circ}\text{C}$: $V_{bi} = 695 \pm 4 \text{ mV}$
- $t = 40^{\circ}\text{C}$: $V_{bi} = 693 \pm 3 \text{ mV}$

- $t = 46^{\circ}\text{C}$: $V_{bi} = 679 \pm 6 \text{ mV}$
- $t = 52^{\circ}\text{C}$: $V_{bi} = 671 \pm 4 \text{ mV}$
- $t = 60^{\circ}\text{C}$: $V_{bi} = 661 \pm 5 \text{ mV}$

Następnie rysujemy wykres zależności $V_{bi} = f(T)$ i zaznaczamy na nim prostokąty niepewności dla każdego punktu – niepewność wartości potencjału wbudowanego bierzemy z poprzedniego podpunktu, niepewność temperatury $u(T) = \frac{\text{dokładność podziałki na skali}}{\sqrt{3}}$. Na tej podstawie wyznaczamy temperaturowy współczynnik $\frac{dV_{bi}}{dT}$ (korzystając z regresji liniowej $\frac{dV_{bi}}{dT} = a$, gdzie a – współczynnik kierunkowy prostej aproksymującej punkty na wykresie). Określamy niepewność współczynnika temperaturowego $u(\frac{dV_{bi}}{dT}) = \Delta a$. Otrzymana wartość zgadza się z zasadą, że powinna wyjść wartość ujemna.

$$u\left(\frac{dV_{bi}}{dT}\right) = 0,0954... \frac{\text{mV}}{\text{K}} \approx 0,096 \frac{\text{mV}}{\text{K}}$$

$$\frac{dV_{bi}}{dT} = -1,5878... \frac{\text{mV}}{\text{K}} \approx -1,588 \frac{\text{mV}}{\text{K}}$$



W kolejnym kroku rysujemy charakterystyki $\ln I = f(V)$ dla poszczególnych temperatur, wyznaczamy wartości prądów nasycenia $I_0 = e^b$ wraz z ich niepewnościami $I_0 = e^b \cdot \Delta b$, znając wartość współczynnika przecięcia b prostej $y = ax + b$, otrzymanej z dopasowania liniowej części charakterystyki $\ln I = f(V)$.

- $t = 22^{\circ}\text{C}$

$$b = -18,602 [\text{A}] \quad \Delta b = 0,070 [\text{A}]$$

- $t=28\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$b = -17,617\text{ [A]} \quad \Delta b = 0,274\text{ [A]}$$

- $t=34\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$b = -17,673\text{ [A]} \quad \Delta b = 0,010\text{ [A]}$$

- $t=40\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$b = -17,080\text{ [A]} \quad \Delta b = 0,094\text{ [A]}$$

- $t=46\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$b = -17,230\text{ [A]} \quad \Delta b = 0,078\text{ [A]}$$

- $t=52\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$b = -16,796\text{ [A]} \quad \Delta b = 0,077\text{ [A]}$$

- $t=60\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$b = -16,108\text{ [A]} \quad \Delta b = 0,064\text{ [A]}$$

Ostatecznie otrzymujemy takie wartości prądów nasycenia:

- $t = 22^{\circ}\text{C}: I_0 = (8,34 \pm 0,59) \cdot 10^{-9}\text{ A}$

- $t = 28^{\circ}\text{C}: I_0 = (2,24 \pm 0,62) \cdot 10^{-8}\text{ A}$

- $t = 34^{\circ}\text{C}: I_0 = (2,11 \pm 0,22) \cdot 10^{-8}\text{ A}$

- $t = 40^{\circ}\text{C}: I_0 = (3,82 \pm 0,36) \cdot 10^{-8}\text{ A}$

- $t = 46^{\circ}\text{C}: I_0 = (3,27 \pm 0,25) \cdot 10^{-8}\text{ A}$

- $t = 52^{\circ}\text{C}: I_0 = (5,08 \pm 0,39) \cdot 10^{-8}\text{ A}$

- $t = 60^{\circ}\text{C}: I_0 = (1,01 \pm 0,07) \cdot 10^{-7}\text{ A}$

Na koniec obliczamy wartość energii wzbronionej półprzewodnika, z którego jest wykonane złącze p-n, korzystając z współczynnika kierunkowego prostej aproksymującej punkty wykresu $\ln(\frac{I_0}{T^2}) = f(\frac{1}{T})$ (wykres umieszczony na następnej stronie). Energię wzbronioną otrzymujemy ze wzoru $E_g = -2 \cdot k \cdot a$, a jej niepewność wynosi $u(E_g) = 2 \cdot k \cdot \Delta a$. Z funkcji reglinp otrzymujemy $a = -4979,55\text{ [K]}$ i $\Delta a = 801,55\text{ [K]}$. Wówczas:

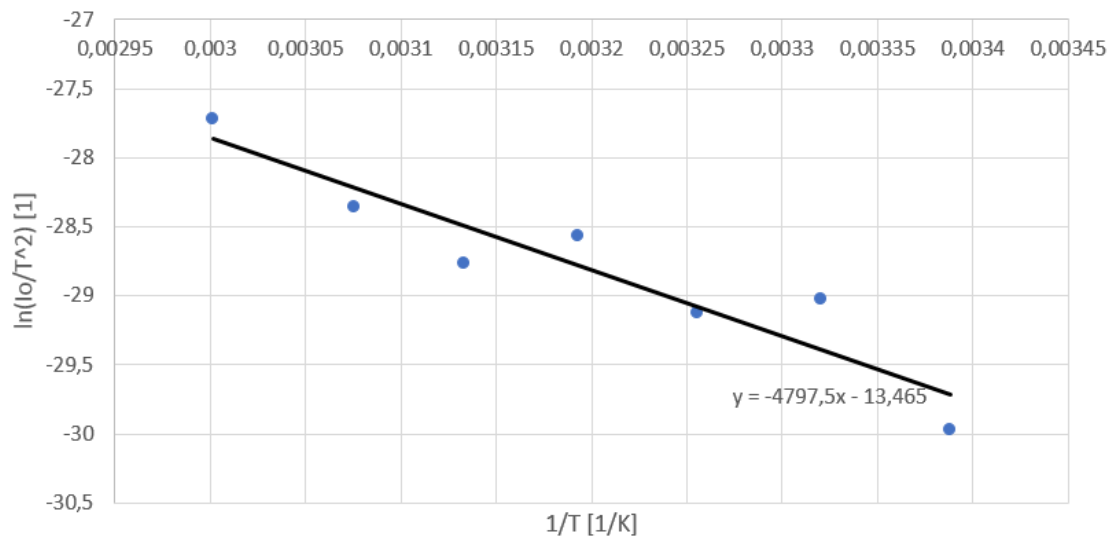
$$u(E_g) = 2 \cdot 8,62 \cdot 10^{-5} \cdot 801,55[eV] = 13818,72... \cdot 10^{-5}[eV] \approx 0,14[eV]$$

$$E_g = -2 \cdot 8,62 \cdot 10^{-5} \cdot (-4979,55)[J] = 85847,442... \cdot 10^{-5} \approx 0,86[eV]$$

Ostatecznie $E_g = 0,86 \pm 0,14\text{ [J]}$. Według tablic powinno nam wyjść 1,11 [eV]. Różnica wyników spowodowana jest błędami pomiarowymi.

Wnioski: Wraz ze wzrostem temperatury obserwujemy spadek wartości wysokości potencjału wbudowanego oraz wzrost wartości prądu nasycenia. Obliczona wartość energii wzbronionej różni się od jej wartości literaturowej, jednak jest tego samego rzędu co wartość poprawna. Niepoprawność wyniku może być skutkiem błędów pomiarowych, w tym błędów metody i niedokładności przyrządów pomiarowych.

Wykres zależności $f(1/T)=\ln(I_0/T^2)$



U [mV]	u(U) [mV]	I [mA]	u(I) [mA]
-0,7	0,2	0,00	0,02
0,7	0,2	0,00	0,02
3,6	0,2	0,00	0,02
11,3	0,2	0,00	0,02
15,8	0,2	0,00	0,02
24,2	0,2	0,01	0,02
33,2	0,2	0,00	0,02
40,5	0,2	0,00	0,02
42,4	0,2	0,00	0,02
48,8	0,2	0,00	0,02
843,3	0,5	38,54	0,13
844,7	0,5	38,73	0,13
845,5	0,5	39,28	0,13
847,4	0,5	39,90	0,14
849,2	0,5	40,49	0,14
850,2	0,5	40,79	0,14
851,5	0,5	41,24	0,14
852,9	0,5	41,72	0,14
853,5	0,5	41,90	0,14
853,6	0,5	41,90	0,14

(a) Wyniki dla $t=22^\circ\text{C}$

U [mV]	u(U) [mV]	I [mA]	u(I) [mA]
-0,7	0,2	0,00	0,02
0,3	0,2	0,00	0,02
0,7	0,2	0,00	0,02
7,4	0,2	0,00	0,02
12,4	0,2	0,00	0,02
20,3	0,2	0,00	0,02
27,2	0,2	0,00	0,02
33,6	0,2	0,00	0,02
44,8	0,2	0,00	0,02
52,0	0,2	0,00	0,02
844,1	0,5	40,88	0,14
844,6	0,5	40,90	0,14
844,7	0,5	41,11	0,14
845,9	0,5	41,45	0,14
846,7	0,5	41,59	0,14
847,3	0,5	41,85	0,14
848,0	0,5	42,02	0,14
848,0	0,5	42,02	0,14
847,9	0,5	42,01	0,14
847,9	0,5	42,03	0,14

(b) Wyniki dla $t=28^\circ\text{C}$

U [mV]	u(U) [mV]	I [mA]	u(I) [mA]
-0,7	0,2	0,00	0,02
0,9	0,2	0,00	0,02
3,4	0,2	0,00	0,02
4,7	0,2	0,00	0,02
8,6	0,2	0,00	0,02
12,2	0,2	0,00	0,02
16,3	0,2	0,00	0,02
16,9	0,2	0,00	0,02
20,9	0,2	0,00	0,02
25,4	0,2	0,00	0,02
837,6	0,5	40,36	0,14
838,5	0,5	40,62	0,14
839,0	0,5	40,93	0,14
840,1	0,5	41,14	0,14
841,1	0,5	41,45	0,14
841,6	0,5	41,79	0,14
842,7	0,5	41,96	0,14
842,8	0,5	42,05	0,14
842,8	0,5	42,06	0,14
842,8	0,5	42,07	0,14

(c) Wyniki dla $t=34^\circ\text{C}$

U[mV]	u(U)[mV]	I[mA]	u(I)[mA]
-9,2	0,2	0,00	0,02
-9,2	0,2	0,00	0,02
-9,2	0,2	0,00	0,02
-6,5	0,2	0,00	0,02
24,3	0,2	0,00	0,02
39,1	0,2	0,00	0,02
44,4	0,2	0,00	0,02
58,7	0,2	0,00	0,02
66,6	0,2	0,00	0,02
80,9	0,2	0,00	0,02
88,5	0,2	0,00	0,02
834,4	0,5	41,33	0,14
835,0	0,5	41,43	0,14
835,9	0,5	41,71	0,14
836,4	0,5	41,93	0,14
836,8	0,5	41,99	0,14
836,8	0,5	42,00	0,14
836,7	0,5	42,00	0,14
836,7	0,5	42,00	0,14
836,7	0,5	42,00	0,14
836,7	0,5	41,99	0,14

(d) Wyniki dla $t=40^{\circ}\text{C}$

U[mV]	u(U)[mV]	I[mA]	u(I)[mA]
-0,7	0,2	0,00	0,02
-0,7	0,2	0,00	0,02
-0,7	0,2	0,01	0,02
-0,8	0,2	0,00	0,02
-0,1	0,2	0,00	0,02
8,6	0,2	0,01	0,02
24,5	0,2	0,00	0,02
30,2	0,2	0,00	0,02
37,7	0,2	0,00	0,02
44,7	0,2	0,00	0,02
821,2	0,5	38,70	0,13
821,9	0,5	39,15	0,14
823,5	0,5	39,62	0,14
825,3	0,5	39,90	0,14
825,8	0,5	40,29	0,14
827,8	0,5	40,89	0,14
829,5	0,5	41,14	0,14
830,2	0,5	41,58	0,14
831,8	0,5	42,05	0,14
832,5	0,5	42,10	0,14

(e) Wyniki dla $t=46^{\circ}\text{C}$

U[mV]	u(U)[mV]	I[mA]	u(I)[mA]
-0,7	0,2	0,00	0,02
-0,6	0,2	0,00	0,02
-0,7	0,2	0,00	0,02
-0,7	0,2	0,00	0,02
8,3	0,2	0,00	0,02
22,6	0,2	0,00	0,02
43,8	0,2	0,00	0,02
57,0	0,2	0,00	0,02
57,1	0,2	0,00	0,02
57,8	0,2	0,00	0,02
67,5	0,2	0,00	0,02
821,6	0,5	40,57	0,14
822,2	0,5	40,79	0,14
823,2	0,5	40,94	0,14
824,8	0,5	41,36	0,14
824,9	0,5	41,56	0,14
825,9	0,5	41,76	0,14
827,2	0,5	42,14	0,14
827,2	0,5	42,16	0,14
827,1	0,5	42,13	0,14
827,1	0,5	42,14	0,14

(f) Wyniki dla $t=52^{\circ}\text{C}$

U[mV]	u(U)[mV]	I[mA]	u(I)[mA]
-0,7	0,2	0,00	0,02
-0,7	0,2	0,00	0,02
-0,7	0,2	0,00	0,02
-0,7	0,2	0,00	0,02
15,4	0,2	0,00	0,02
22,8	0,2	0,00	0,02
38,3	0,2	0,00	0,02
40,0	0,2	0,00	0,02
41,5	0,2	0,00	0,02
48,6	0,2	0,00	0,02
53,1	0,2	0,00	0,02
810,9	0,5	40,15	0,14
811,9	0,5	40,27	0,14
812,3	0,5	40,49	0,14
813,2	0,5	40,74	0,14
814,3	0,5	40,90	0,14
815,0	0,5	41,30	0,14
816,3	0,5	41,66	0,14
817,8	0,5	41,88	0,14
818,7	0,5	42,18	0,14
818,7	0,5	42,20	0,14

(g) Wyniki dla $t=60^{\circ}\text{C}$

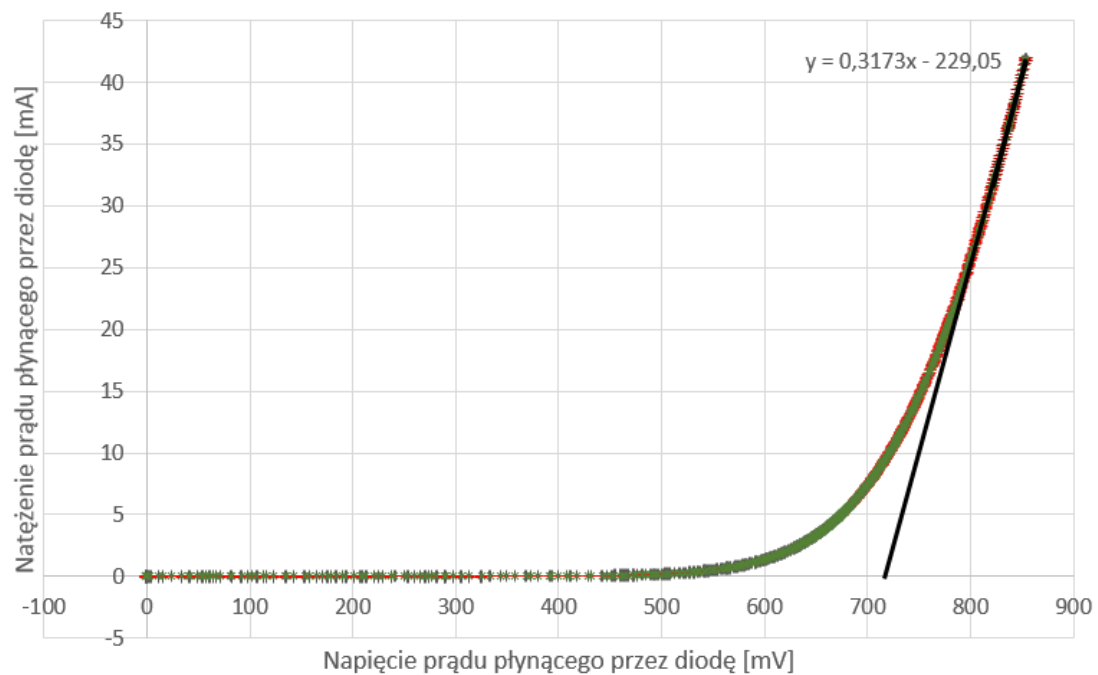
T[K]	u(T)[K]	Vbi[mV]	u(Vbi)[mV]
295,2	1,2	722	5
301,2	1,2	710	4
307,2	1,2	695	4
313,2	1,2	693	3
319,2	1,2	679	6
325,2	1,2	671	3
333,2	1,2	661	5

(h) Tabela do podpunktu 3

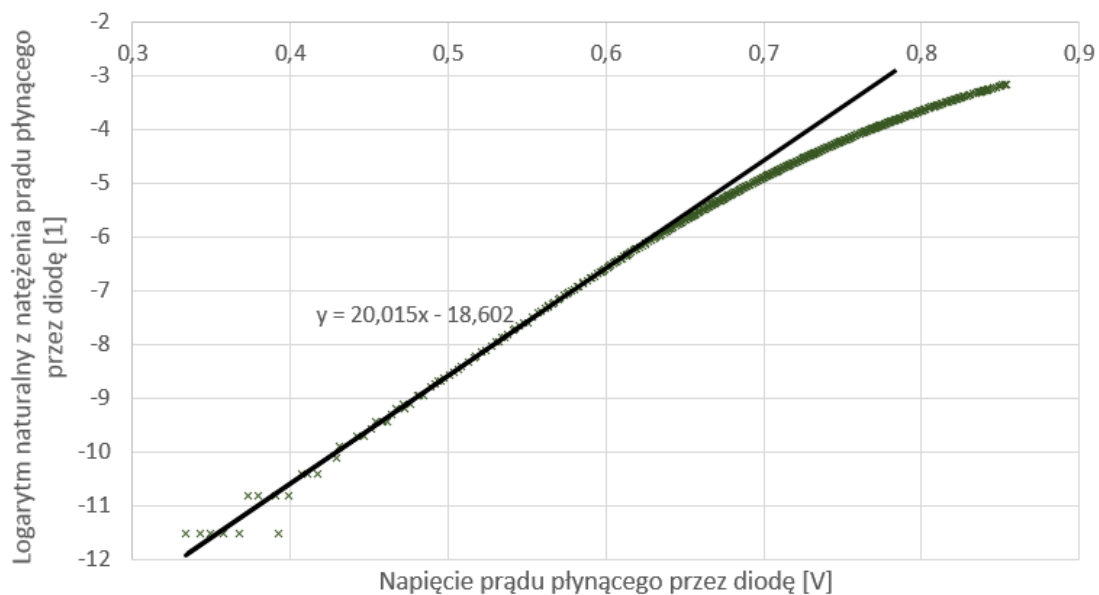
1/T [1/K]	ln I ₀ /T ² [1]
0,003388	-29,98
0,003321	-29,03
0,003256	-29,13
0,003193	-28,57
0,003133	-28,77
0,003076	-28,37
0,003002	-27,73

(i) Tabela do podpunktu 5

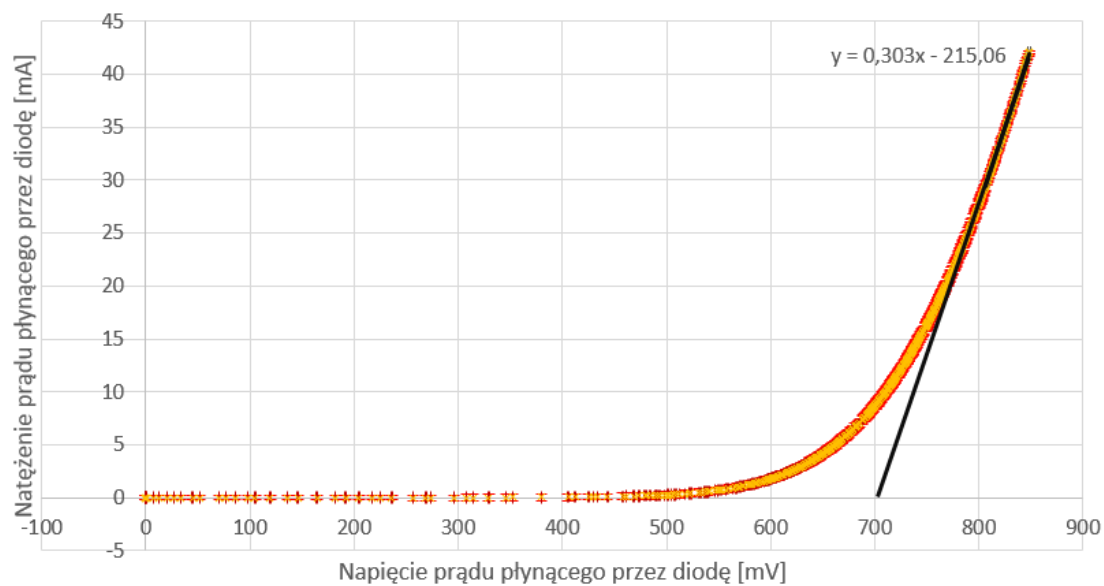
Charakterystyka prądowo-napięciowa dla t=22°C

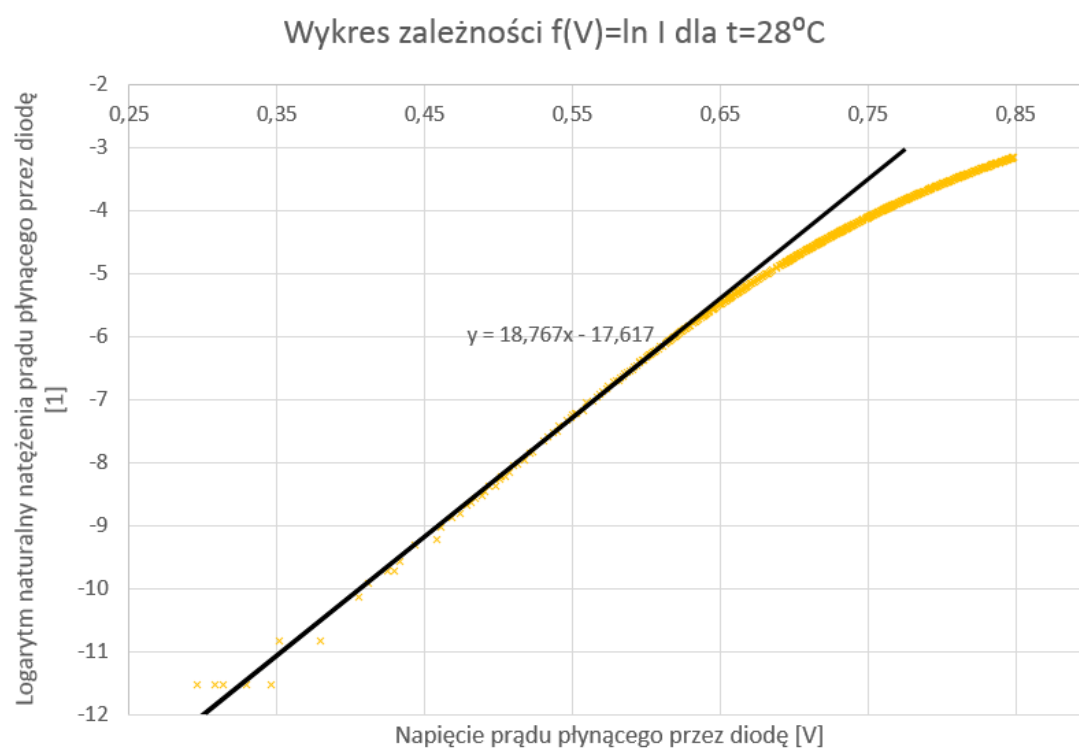


Wykres zależności $f(V)=\ln I$ dla $t=22^{\circ}\text{C}$

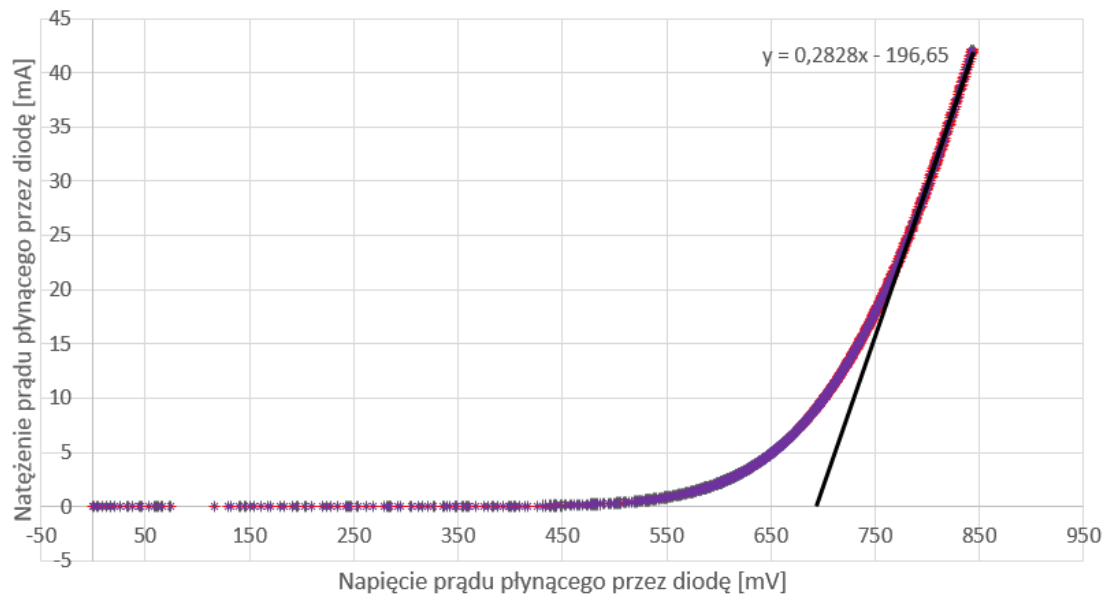


Charakterystyka prądowo-napięciowa dla $t=28^{\circ}\text{C}$

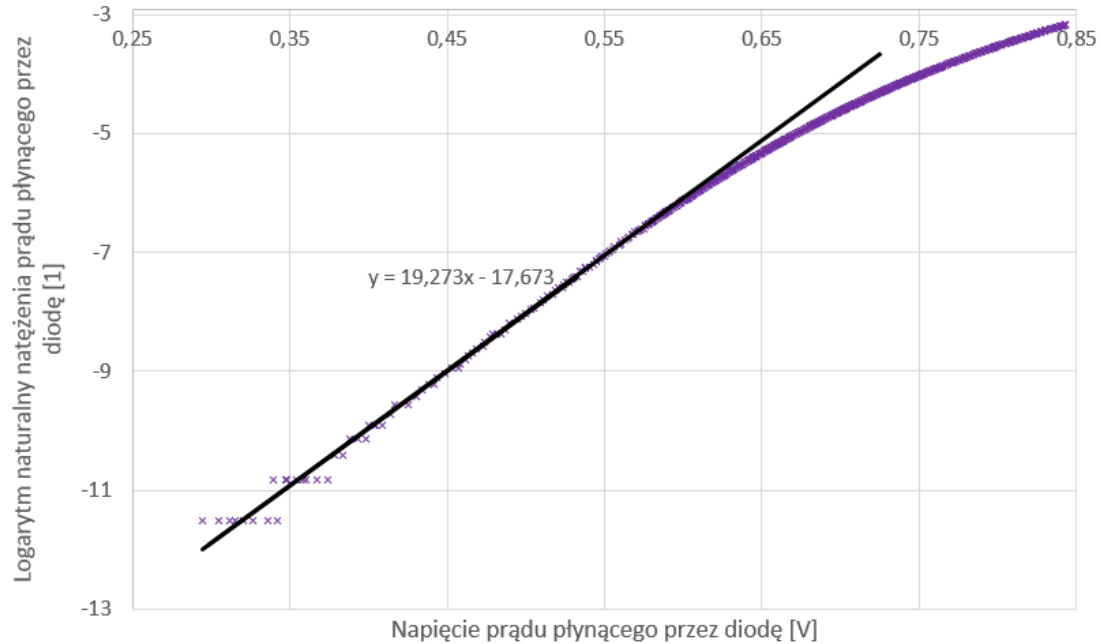




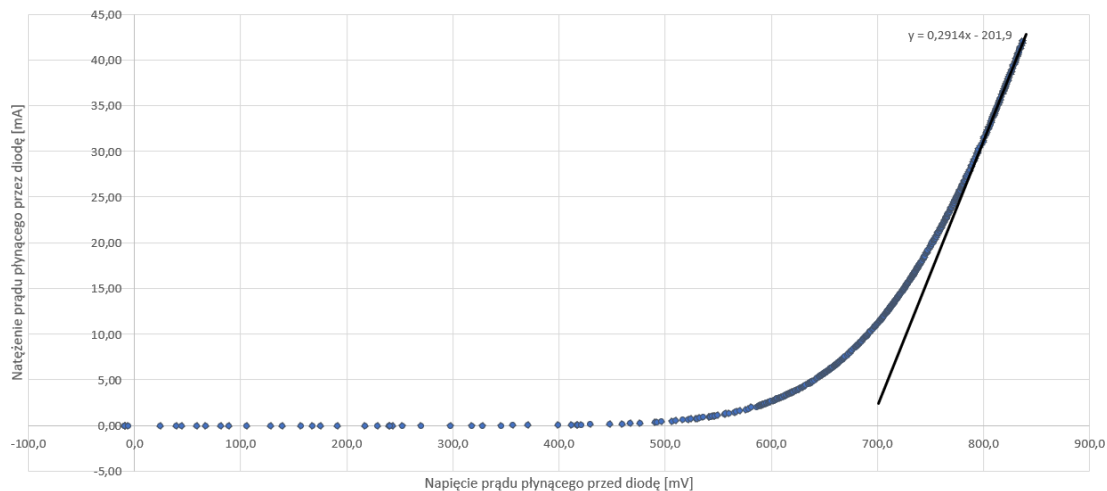
Charakterystyka prądowo-napięciowa dla $t=34^{\circ}\text{C}$



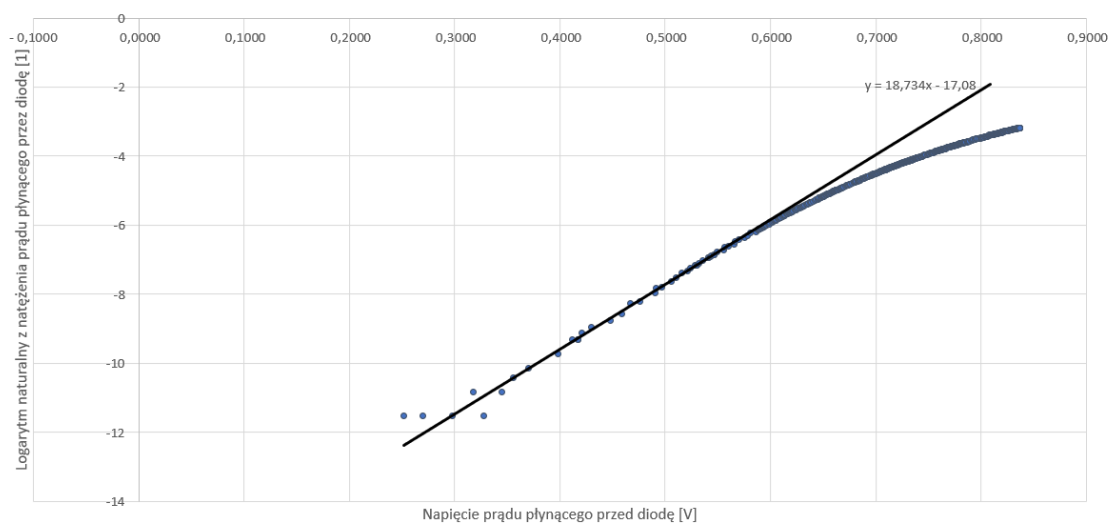
Wykres zależności $f(V) = \ln I$ dla $t=34^{\circ}\text{C}$



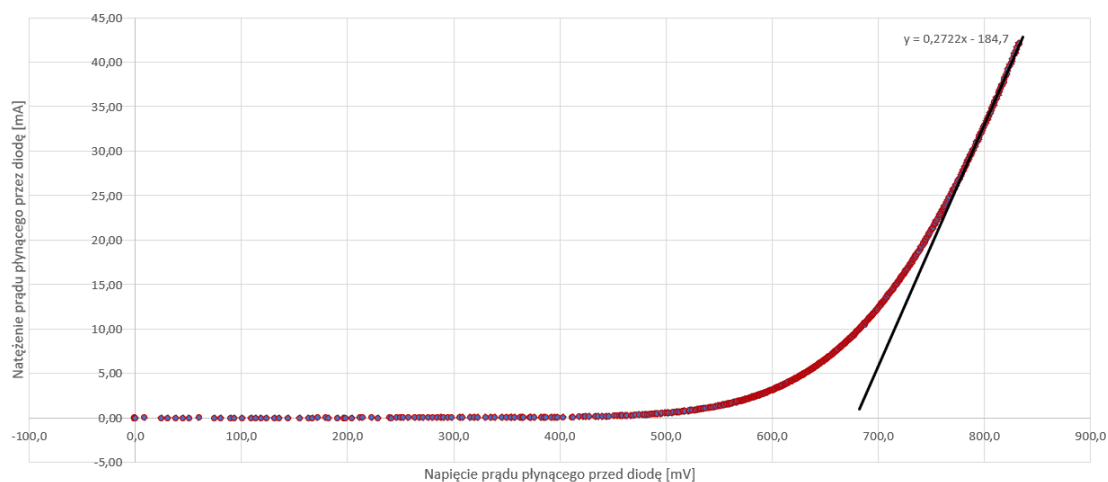
Charakterystyka prądowo-napięciowa diody dla $t=40\text{ }^{\circ}\text{C}$



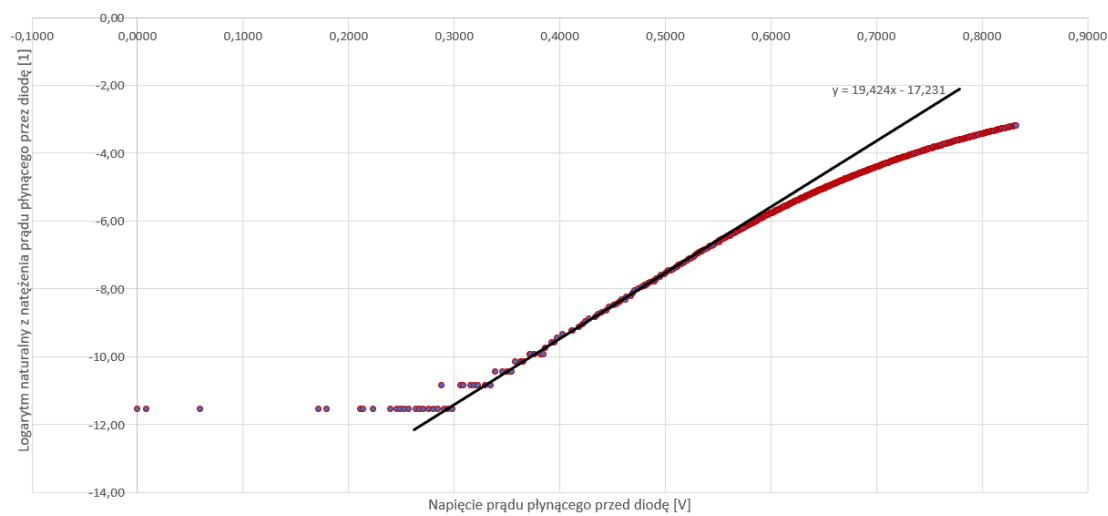
Wykres zależności $f(V)=\ln I$ dla $t=40\text{ }^{\circ}\text{C}$



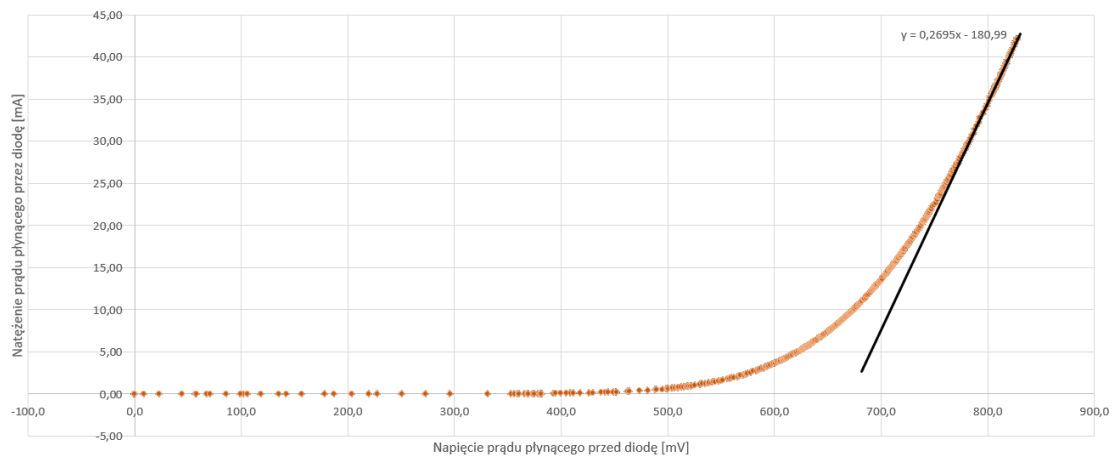
Charakterystyka prądowo-napięciowa diody dla $t=46\text{ }^{\circ}\text{C}$



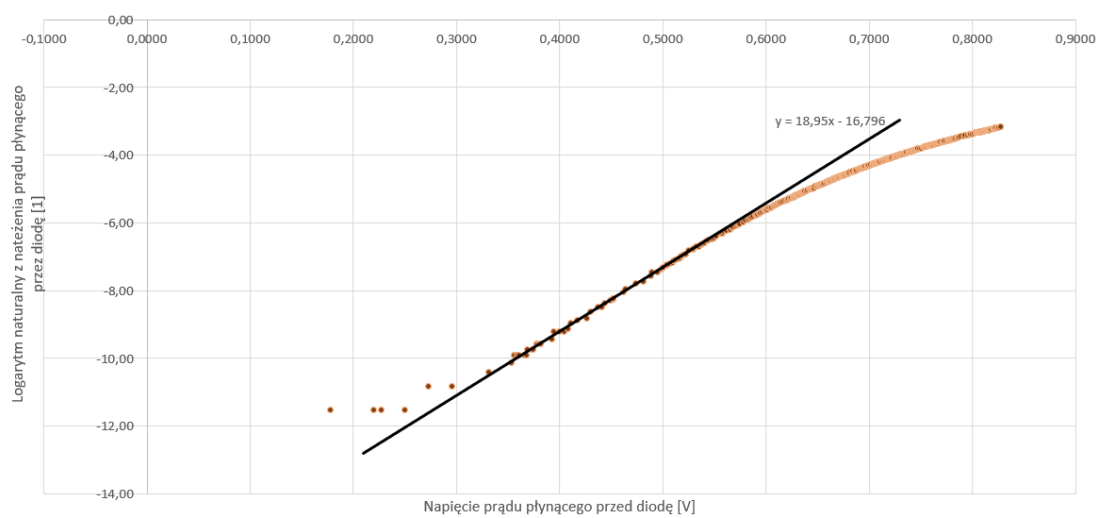
Wykres zależności $f(V) = \ln I$ dla $t=46\text{ }^{\circ}\text{C}$



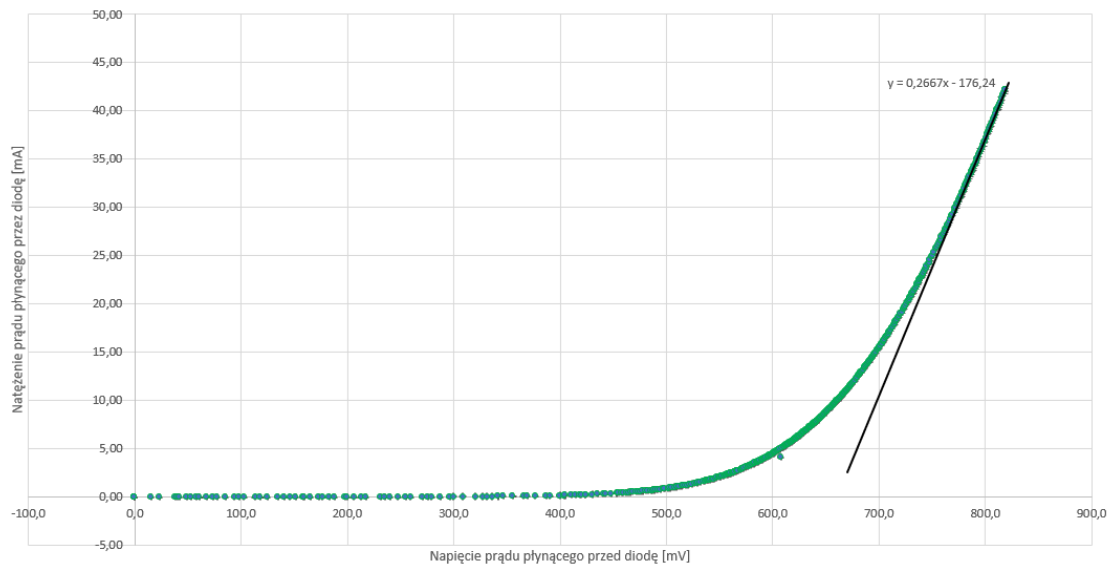
Charakterystyka prądowo-napięciowa diody dla $t=52\text{ }^{\circ}\text{C}$



Wykres zależności $f(V) = \ln I$ dla $t=52\text{ }^{\circ}\text{C}$



Charakterystyka prądowo-napięciowa diody dla $t=60\text{ }^{\circ}\text{C}$



Wykres zależności $f(V) = \ln I$ dla $t=60\text{ }^{\circ}\text{C}$

