

# Spis treści

<b>1</b>	<b>Cel ćwiczenia</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Wstęp teoretyczny</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Układ pomiarowy</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>Przebieg ćwiczenia</b>	<b>4</b>
<b>5</b>	<b>Wyniki pomiarów</b>	<b>5</b>
<b>6</b>	<b>Opracowanie wyników pomiarów</b>	<b>6</b>
6.1	Wykres zależności $U_h(v)$ oraz dopasowana prosta przy pomocy regresji liniowej . .	6
6.2	Wyznaczenie stałej Plancka oraz pracy wyjścia . . . . .	6
6.3	Oszacowanie niepewności pomiarowych $u(h)$ oraz $u(W)$ . . . . .	7
6.4	Porównanie wyznaczonej wartości stałej Plancka z wartością tabelaryczną . . . . .	7
6.5	Wykresy zależności $I(U_{a-f})$ . . . . .	8
<b>7</b>	<b>Wnioski</b>	<b>10</b>

# 1 Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia było zbadanie zależności energii fotoelektronów w zależności od długości światła padającego na metal oraz wyznaczenie stałej Plancka i pracy wyjścia.

## 2 Wstęp teoretyczny

Zjawisko fotoelektryczne polega na emisji elektronów z powierzchni metalu pod wpływem padającego promieniowania elektromagnetycznego (światła widzialnego lub promieniowania ultrafioletowego). Ilość wybijanych fotoelektronów jest proporcjonalna do natężenia padającego światła. Energia kinetyczna fotoelektronów nie zależy od natężenia światła, a tylko od jego częstotliwości. Dla każdego metalu istnieje pewna częstotliwość graniczna (progowa) promieniowania, poniżej której zjawisko nie zachodzi.

Zjawisko fotoelektryczne zostało wyjaśnione przez A. Einsteina, w oparciu o teorię korpuskularną światła. Założył on, że światło jest strumieniem fotonów (kwantów) o masie spoczynkowej równej zeru i energii:

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda},$$

gdzie  $h$  to stała Plancka,  $c$  to prędkość światła, a  $\lambda$  to długość fali padającego światła.

Każdy foton wybija z metalu jeden elektron. Do uwolnienia elektronu potrzebna jest praca wyjścia czyli najmniejsza energia, jaką należy dostarczyć elektronowi danego ciała, aby opuścił on ciało i stał się elektronem swobodnym.

Zatem jeśli foton ma mniej energii niż wynosi praca wyjścia, nie spowoduje on emisji elektronu. Ze względu na małą wartość pracy wyjścia oraz to że dotyczy ona elektronów najczęściej używaną jednostką do jej wyrażania jest elektronowolt.

Foton uderzając w elektron przekazuje mu całą swoją energię. Część tej energii zużywana jest na pracę wyjścia, reszta stanowi energię kinetyczną elektronu.

$$E_f = hf = W + E_k,$$

gdzie  $E_f$  to energia kwantu  $hf$ ,  $W$  to praca wyjścia, a  $E_k$  to energia kinetyczna elektronu.

Nie wszystkie elektrony mają jednakowo dużą energię kinetyczną bo tylko część z nich dolatuje do elektrody; przy  $U = 0$  prąd jest mniejszy od maksymalnego. Wreszcie przy dostatecznie dużym napięciu równym  $U_h$  zwanym napięciem hamowania prąd zanika. Różnica potencjałów  $U_h$  pomnożona przez ładunek elektronu  $e$  jest więc miarą energii najszybszych elektronów (przy  $U = U_h$  nawet najszybsze elektrony są zahamowane, nie dochodzą do elektrody).

Napięcie hamujące jest niezależne od natężenia światła padającego, natomiast natężenie prądu nasycenia jest wprost proporcjonalne do natężenia światła padającego (liczba wybitych elektronów wzrasta). Napięcie hamowania  $U_h$  zależy liniowo od częstotliwości padającego światła.

Maksymalną energię kinetyczną  $E_{kmax}$  można zmierzyć, dobierając napięcie zewnętrzne  $U = U_h$ . Mierzony prąd  $I$  spada wówczas do zera. W takim przypadku  $E_{kmax}$  równe jest pracy  $eU_h$ . Zmierzanie wartości napięcia hamowania  $U_h$  dla kilku częstotliwości światła  $f$  pozwala otrzymać wykres zależności  $U_h(f)$  dany teoretycznym wzorem:

$$U_h = \frac{h}{e}f - \frac{W}{e}$$

Nachylenie prostej  $U_h(f)$  wynosi  $\frac{h}{e}$ , co pozwala nam wyznaczyć wartość stałej Plancka  $h$ . Przecięcie prostej z osią pionową stanowi zaś miarę pracy wyjścia (podanej w eV).

Światło ma podwójną naturę. W pewnych zjawiskach ujawnia ono swoje właściwości falowe, a w innych zachowuje się jak strumień cząstek, które nazywamy fotonami. Fotony nie mają masy, lecz posiadają energię. Energia jednego fotonu nosi nazwę kwantu energii. Światło jest więc równocześnie falą i strumieniem fotonów. Między wielkościami opisującymi światło jako falę, takimi jak długość i częstotliwość fali, a wielkościami opisującymi światło jako strumień fotonów, takimi jak pęd fotonu i energia fotonu, istnieją ściśle określone związki.

<p>Długość fali świetlnej – <math>\lambda</math></p> $\lambda = c \cdot T = \frac{c}{f}$	<p>Pęd fotonu odpowiadający długości fali <math>\lambda</math>:</p> $p = \frac{h}{\lambda}$
<p>Częstotliwość fali świetlnej – <math>f</math>, związana z długością fali wzorem:</p> $f = \frac{c}{\lambda}$	<p>Energia fotonu odpowiadająca fali o częstotliwości <math>f</math>:</p> $E_f = h \cdot f$

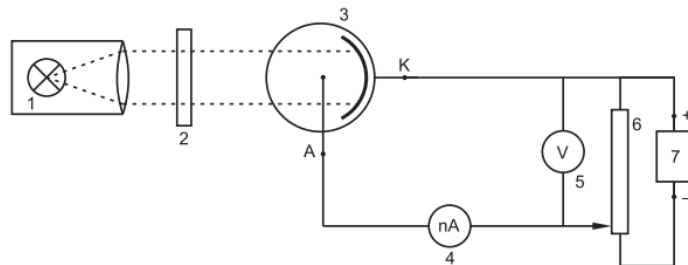
**Rys. 1:** Wielkości falowe i odpowiadające im wielkości korpuskularne

Przykładem zastosowania zjawiska fotoelektrycznego jest fotokomórka, czyli element elektroniczny, którego działanie jest uzależnione od obecności światła. Przeważnie jest to bańka próżniowa, na której od strony wewnętrznej naniesiona jest warstwa metalu, czyli jedna z elektrod (jest to katoda), a wewnątrz bańki jest metalowy pręt, czyli druga z elektrod (anoda). Elementy są światłoczułe - gdy nie ma światła nie ma również przepływu prądu. Gdy w bezpośrednim kontakcie fotokomórki pojawia się wiązka światła, zapoczątkowuje ona przepływ prądu przez fotokomórkę. Przepływ jest uzależniony od natężenia światła - im jest go więcej tym swobodniej płynie prąd.

### 3 Układ pomiarowy

Przyrządy potrzebne do wykonania doświadczenia (Rys. 2):

1. Żarówka
2. Filtry barwne
3. Fotokomórka (A - anoda, K - katoda)
4. Nanoamperomierz
5. Woltomierz analogowy
6. Potencjometr
7. Zasilacz napięcia stałego



**Rys. 2:** Schemat układu pomiarowego do wyznaczania stałej Plancka, oznaczenia zostały opisane powyżej

### 4 Przebieg ćwiczenia

Po zapoznaniu się z zestawem ćwiczeniowym podłączyliśmy zestaw zgodnie z instrukcją ćwiczenia. Ustawiliśmy zakres pomiarowy nanoamperomierza przez wciśnięcie klawiszy  $A$  i  $1\mu A$ . Zasłoniliśmy fotokomórkę przez wysunięcie uchwyty filtra kasetki w przód. Włączyliśmy układ zasilania fotokomórki i wyzerowaliśmy nanoamperomierz odpowiednim pokręteł potencjometru. Po ustawieniu filtra żółtego wysunęliśmy kasetkę i odczytaliśmy wskazanie nanoamperomierza. Następnie zwiększaliśmy wartość napięcia hamującego przyłożonego do elektrod fotokomórki, aż do uzyskania zerowej wartości natężenia prądu fotoelektrycznego. Odczytaliśmy wartość napięcia odcięcia  $U_h$  dla światła żółtego. Powtórzyliśmy pomiar 3 razy. Te same czynności powtórzyliśmy dla filtrów o innych barwach. Wszystkie pomiary zamieściliśmy w tabelce.

## 5 Wyniki pomiarów

Kolor fali	Długość fali $\lambda$ [nm]	Częstotliwość fali $f=c/\lambda$ [THz]	I [nA]	$U_h$ [V]	$U_{h,śred}$ [V]
Żółty	590	508	4500	0.399	0.389
			4600	0.383	
			4500	0.385	
Czerwony	630	476	420	0.273	0.272
			430	0.270	
			420	0.273	
Zielony	500	600	3000	0.449	0.447
			3050	0.446	
			3000	0.445	
Niebieski/ Fioletowy	480	625	3600	0.577	0.571
			3600	0.570	
			3550	0.567	

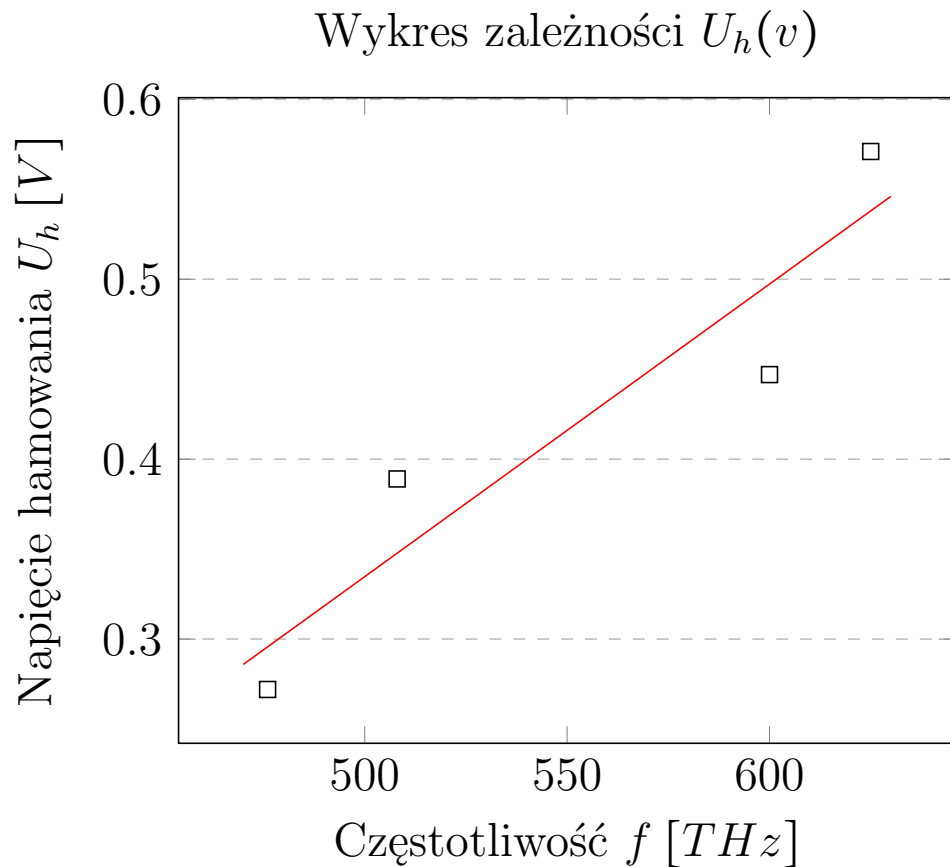
**Tab. 1:** Wyniki pomiarów zależności napięcia hamowania  $U_h$  od częstotliwości  $f$

Kolor/ dł.fali [nm] Częst. [THz]	I [nA]	$U_{a-f}$ [V]	Kolor / dł.fali [nm] Częst. [THz]	I [nA]	$U_{a-f}$ [V]	Kolor / dł.fali [nm] Częst. [THz]	I [nA]	$U_{a-f}$ [V]	Kolor / dł.fali [nm] Częst. [THz]	I [nA]	$U_{a-f}$ [V]
Żółty 590 508	0	0.389	Czerwony 630 476	0	0.272	Zielony 500 600	0	0.445	Niebieski/ Fioletowy 480 625	0	0.570
	300	0.341		30	0.245		200	0.394		240	0.487
	600	0.306		60	0.215		400	0.351		480	0.431
	900	0.275		90	0.195		600	0.309		720	0.366
	1200	0.253		120	0.176		800	0.268		960	0.323
	1500	0.224		150	0.152		1000	0.240		1200	0.284
	1800	0.197		180	0.133		1200	0.215		1440	0.257
	2100	0.170		210	0.116		1400	0.189		1680	0.215
	2400	0.148		240	0.100		1600	0.157		1920	0.171
	2700	0.125		270	0.083		1800	0.133		2160	0.147
	3000	0.105		300	0.063		2000	0.110		2400	0.114
	3300	0.086		330	0.046		2200	0.090		2640	0.085
	3600	0.059		360	0.026		2400	0.061		2880	0.061
	3900	0.045		390	0.016		2600	0.036		3120	0.034
	4200	0.025		420	0		2800	0.020		3360	0.013
	4500	0					3000	0		3600	0

**Tab. 2:** Wyniki pomiarów zależności prądu fotokomówki  $I$  od napięcia hamującego  $U_{a-f}$

## 6 Opracowanie wyników pomiarów

### 6.1 Wykres zależności $U_h(v)$ oraz dopasowana prosta przy pomocy regresji liniowej



### 6.2 Wyznaczenie stałej Plancka oraz pracy wyjścia

Do znalezienia prostej dopasowanej do wykresu użyliśmy regresji liniowej. Wspomogliśmy się arkuszem kalkulacyjnym, który wyznaczył nam linię dopasowania:

$$U_h = 0.00163 \frac{V}{THz} * f - 0.48 V$$

Program wyznaczył również niepewności pomiarowe  $u(a) = 0.00044 \frac{V}{THz}$  oraz  $u(b) = 0.24 V$ . Porównując powyższe równanie z równaniem  $U_h = \frac{hf}{e} - \frac{W}{e}$  otrzymujemy, że:

$$a = \frac{h}{e}, \quad b = -\frac{W}{e}$$

Co po przekształceniach daje nam wzory na stałą Plancka oraz pracę wyjścia:

$$h = ae, \quad W = -be$$

Dla  $e = 1.602 * 10^{-19} C$  wartość stałej Plancka wynosi:

$$h = ae = 0.00163 \frac{V}{THz} * 1.602 * 10^{-19} C = \\ 0.00163 * 10^{-12} \frac{V}{Hz} * 1.602 * 10^{-19} C = 2.611 * 10^{-34} Js$$

Wartość pracy wyjścia wynosi zaś:

$$W = -be = 0.48 V * 1.602 * 10^{-19} C = 7.690 * 10^{-20} J = 0.48 eV$$

### 6.3 Oszacowanie niepewności pomiarowych $u(h)$ oraz $u(W)$

Przyjeliśmy, że niepewności  $u(h)$  oraz  $u(W)$  związane są wyłącznie z niepewnościami odpowiednio  $u(a)$  oraz  $u(b)$ . Zatem:

$$\frac{u(a)}{a} \approx \frac{u(h)}{h} \Rightarrow u(h) = \frac{u(a)}{a} h \\ \frac{u(b)}{b} \approx \frac{u(W)}{W} \Rightarrow u(W) = \frac{u(b)}{b} W$$

W naszym przypadku:

$$u(h) = \frac{u(a)}{a} h = \frac{0.00044 \frac{V}{THz}}{0.00163 \frac{V}{THz}} * 2.611 * 10^{-34} J = 0.705 * 10^{-34} J \\ u(W) = \frac{u(b)}{b} W = \frac{0.24 V}{0.48 V} * 0.480 eV = 0.24 eV$$

Niepewności rozszerzone (dla  $k = 2$ ) wynoszą:

$$U(h) = 2 * u(h) = 2 * 0.705 * 10^{-34} J = 1.410 * 10^{-34} J \\ U(W) = 2 * u(W) = 2 * 0.24 eV = 0.48 eV$$

### 6.4 Porównanie wyznaczonej wartości stałej Plancka z wartością tabelaryczną

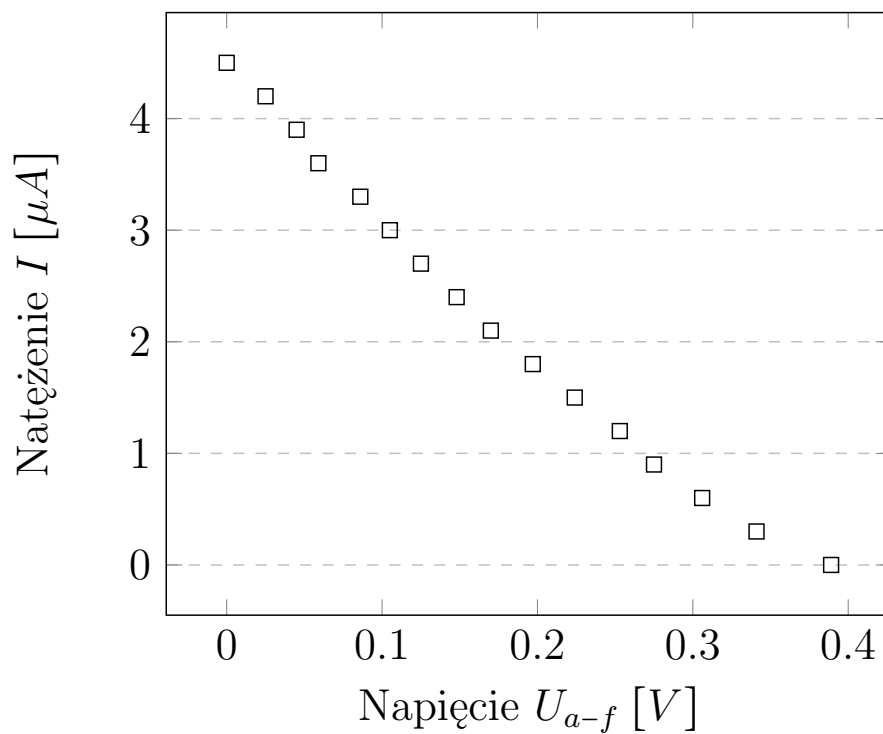
Wyznaczona przez nas wartość stałej Plancka wyniosła  $h = 2.605 * 10^{-34} Js$  zaś wartość tabelaryczna (jak podaje instrukcja ćwiczenia) wynosi  $h_{tab} = 6.63 * 10^{-34} Js$ .

$$|h - h_{tab}| = 6.63 * 10^{-34} Js - 2.611 * 10^{-34} Js = 4.019 * 10^{-34} Js > U(h)$$

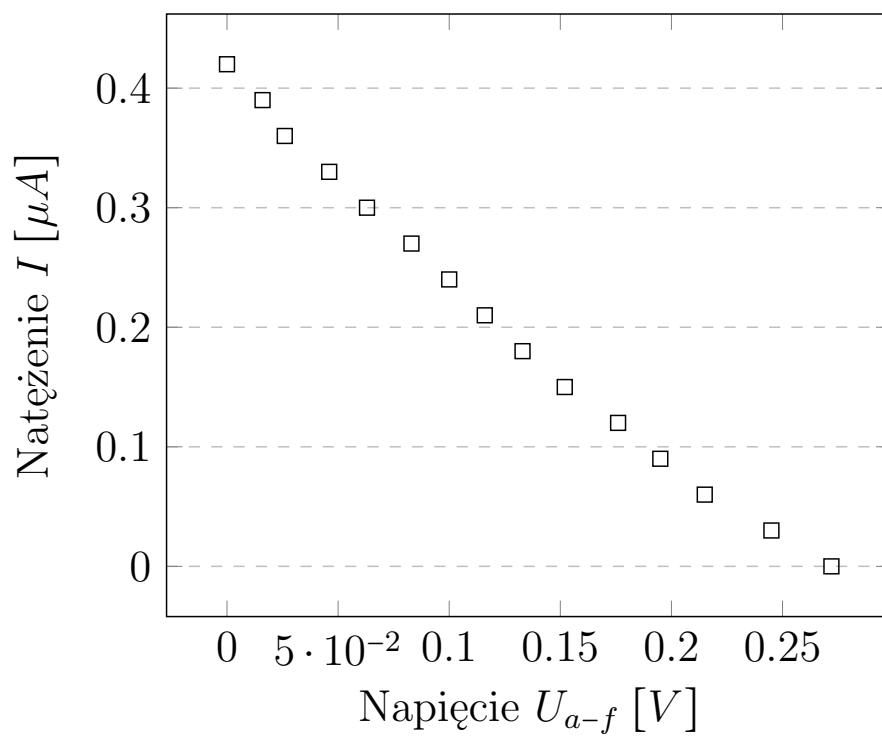
Tablicowa wartość stałej Plancka nie mieści się w zakresie otrzymanych przez nas wyników.

## 6.5 Wykresy zależności $I(U_{a-f})$

Wykres zależności  $I(U_{a-f})$  dla światła żółtego

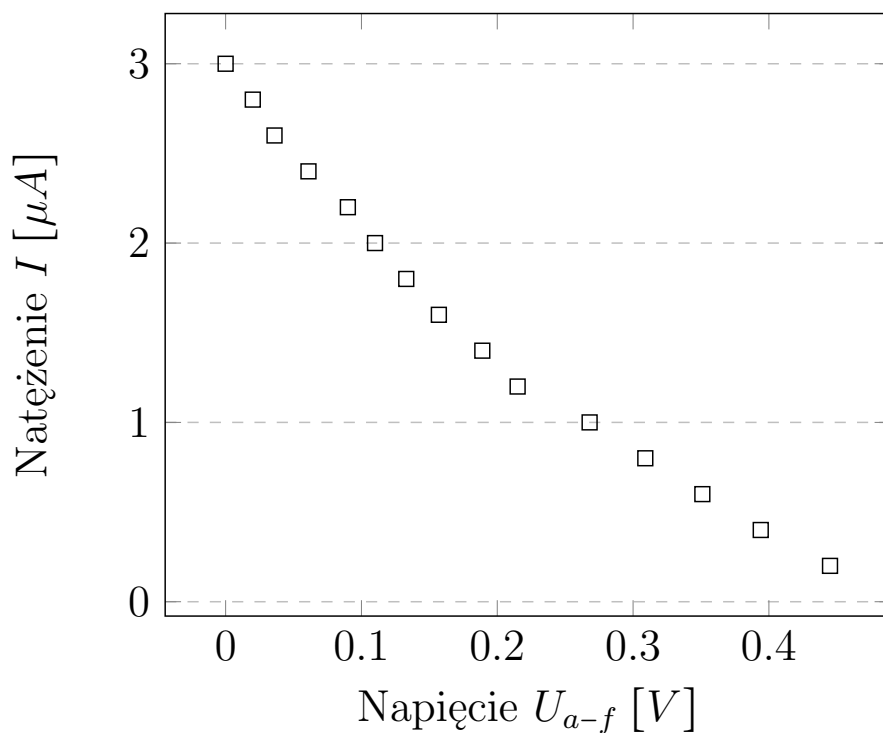


Wykres zależności  $I(U_{a-f})$  dla światła czerwonego

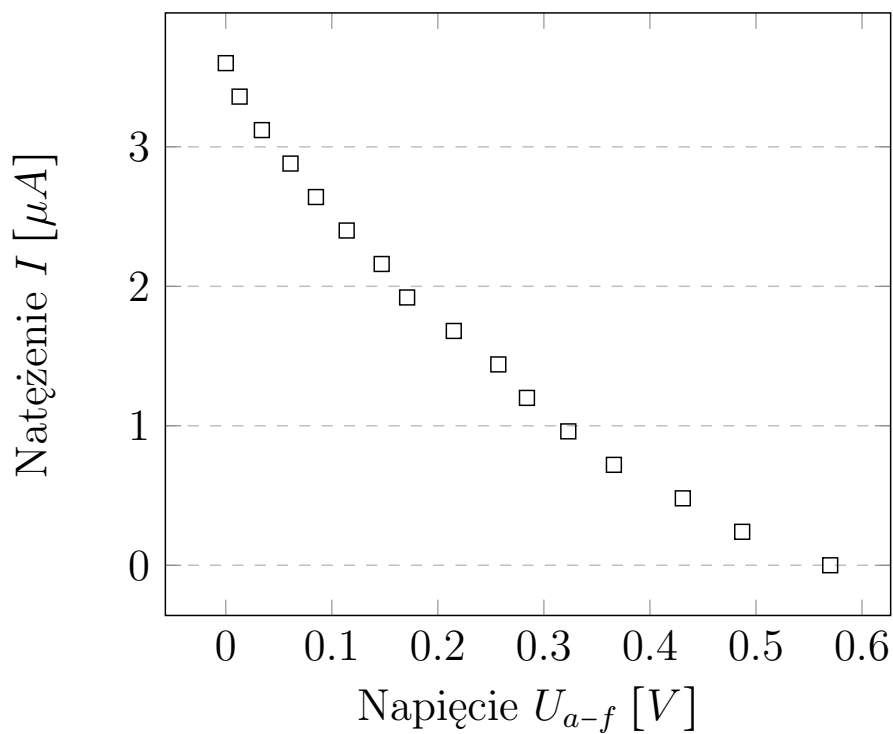




Wykres zależności  $I(U_{a-f})$  dla światła zielonego



Wykres zależności  $I(U_{a-f})$  dla światła niebieskiego/fioletowego



Dla każdego koloru przez zmierzone punkty można przeprowadzić gładką krzywą. Oznacza to, że  $U_h$  zostało zmierzone poprawnie.

## 7 Wnioski

Zmierzona wartość stałej Plancka wynosi  $h = 2.611 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$  z niepewnością pomiarową  $u(h) = 0.705 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ , zaś wartość pracy wyjścia wyniosła  $W = 0.48 \text{ eV}$  z niepewnością pomiarową  $u(W) = 0.24 \text{ eV}$ . Różnica wartości pomiędzy zmierzoną stałą Plancka a tabelaryczną jest bardzo duża. Wartość tabelaryczna jest ok. 2.5 razy większa od wartości zmierzonej. Jednak wykresy  $I(U_{a-f})$  dla poszczególnych kolorów pokazują, że wartości zostały zmierzone poprawnie. Niedokładności naszych wyników mogą wynikać z pominięcia niepewności pomiarowych takich jak niepewność woltomierza oraz amperomierza. Innym istotnym powodem mógł być błąd spowodowany czynnikiem ludzkim. Doświadczenie pozwoliło nam zrozumieć korpuskularną teorię światła.