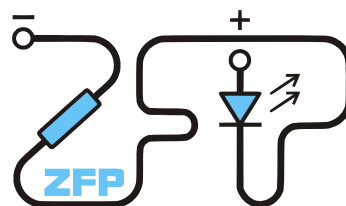


Kabinet výuky obecné fyziky, UK MFF

Fyzikální praktikum IV



Atomovka



Úloha č. A9

Název úlohy: Studium fotoelektrického jevu, určení Planckovy konstanty

Jméno: Josef Iosephus Kučera

Datum měření: 27. 10. 2021

Připomínky opravujícího: viz text

1. Není vysvětlena příčina rozdílnosti průběhu V-A charakteristiky pro vakuovou a plynovou fotonku!
2. Z hodnot kritického napětí V_0 uvedených v tabulce 3 není patrné, dle jakého kritéria byly "okometricky" získány. To kritérium není evidentně jednotné! Proč nebyla provedena lineární extrapolace dle návodu?
3. Nebyly rovněž určeny hodnoty nasyceného anodového proudu!
4. Diskuze je naprosto nedostatečná! Chybí zhodnocení rozboru pracovního úkolu 2, vliv přesnosti měřicích přístrojů na výsledné veličiny, není diskutována přesnost určení V_0 .

	Možný počet bodů	Udělený počet bodů
Theoretická část	0–2	1,5
Výsledky a provedení měření	0–9	6
Diskuse výsledků	0–4	1,5
Závěr	0–1	1
Použité knižstvo	0–1	1
Celkem	max. 17	11

Posuzoval: Pavel Moravec

dne: 15.11.2021

Pracovní úkol

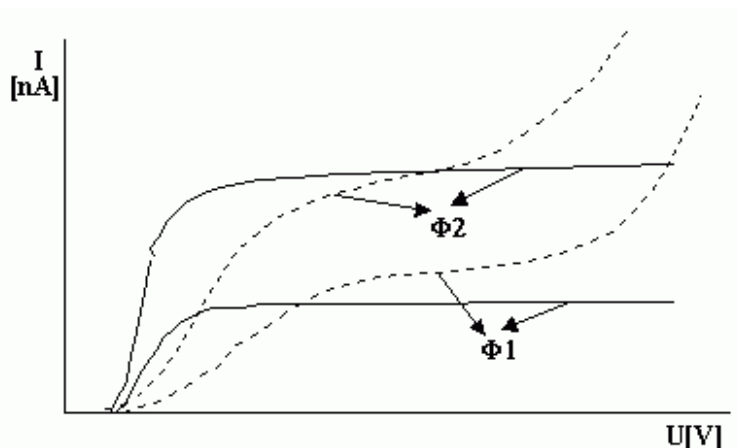
1. Změřte voltampérové charakteristiky fotonek GKE, GKV.
2. Rozborem charakteristik zjistěte, která z nich je vakuová a která je plynem plněná.
3. Změřte VA charakteristiky vakuové fotonky pro záporné hodnoty anodového napětí.
4. Zpracováním výsledků měření určete hodnotu Planckovy konstanty.

Theorie

Charakteristiky fotonek

Na vnějším fotoefektu je založena činnost vakuových a plynových fotonek. V případě vnějšího fotoefektu dochází k emisi elektronů z povrchu elektrody, na kterou dopadá elektromagnetické záření.

Má-li anoda vůči katodě kladné napětí U , protéká fotonkou při osvětlení katody proud I . Toho můžeme zneužít pro tzv. voltampérovou charakteristiku použité fotonky.



Schaema 1: Voltampérové charakteristiky 2 vakuových, přejato z [1] a 2 plynových fotonek (čerkovaně)

Na schématu 1 můžeme vidět rozdíl v-a charakteristiky vakuových a plynových fotonek. Plynem plněné fotonky by byly nežádoucí pro naše další měření, neboť při vyšších napětích dochází k dalšímu růstu proudu fotonky (viz čárkované charakteristiky na obr.1).

Proto v 1) a 2) úkolu nejprve potřebujeme rozlišit na základě v-a charakteristik, která z použitých fotonek jest plněna plynem a která jest vakuová. Očekáváme, že vakuovou fotonkou nebude při volbě stejného napětí U procházet tak vysoký proud I , jako když použijeme plynovou fotonku.

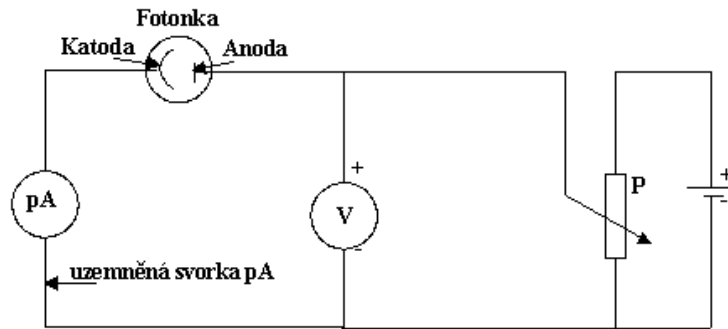
Určení Planckovy konstanty z fotoefektu

Stanovení Planckovy konstanty h je založeno na Einsteinově vztahu [2]

$$E_k = h\nu - A \quad (1)$$

kde E_k je kinetická energie elektronů emitovaných fotokatodou, na kterou dopadá elektromagnetické záření frekvence ν a A je energie potřebná pro uvolnění elektronu z fotokatody (výstupní práce).

Hodnotu E_k lze stanovit, proměříme-li závislost proudu fotonky při záporných napětích anody vůči katodě v obvodu (na Schaematu 2); napětí na fotonce v závěrném směru označíme $V = -U$.

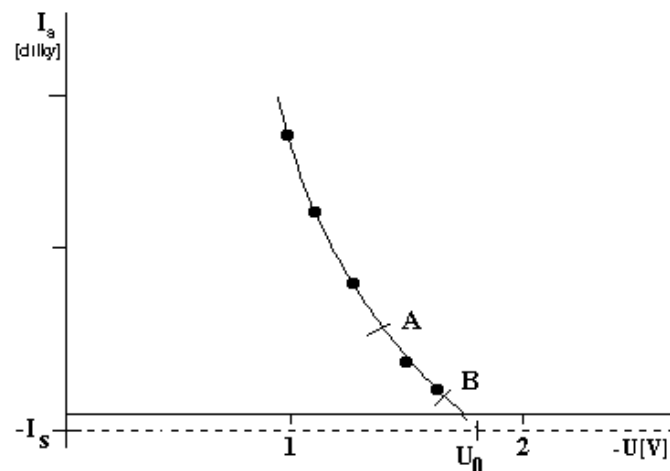


Schaema 2: Zapojení měřicího obvodu, přejato z [2]

Rozdíl hodnot potenciálu elektrického pole mezi katodou a anodou je dán součtem $V + K$, V je napětí a K je tzv. kontaktní potenciál mezi katodou a anodou. Je-li $V + K > 0$, brzdí elektrické pole pohyb elektronů, takže pouze elektrony s kinetickou energií větší než $e(V + K)$ dopadnou na anodu (e je absolutní hodnota náboje elektronu). Se zvětšováním závěrného napětí V proud klesá k nule.

$$e(V_0 + K) = E_k \quad (2)$$

Pro napětí větší než kritická hodnota V_0 daná vztahem (2) je proud nulový, protože ani elektrony s maximální energií E_k nepřekonají brzdící pole. Hodnotu V_0 získáme extrapolací charakteristiky k nulové hodnotě proudu (viz Schaema 2).



Schaema 3: Závislost anodového proudu I_a na brzdícím napětí U_a , přejato z [1] resp. [2]

Čárkovaně je vyznačena nasycená hodnota proudu I_s tekoucího od anody ke katodě. Kvůli kontaktnímu potenciálu K na fotonce se musíme s proudem posunout až do záporných hodnot. Kombinací rovnic (1), (2) pak dostáváme

$$e(V_0 + K) = h\nu - A \quad (3)$$

Protože veličiny K a A jsou nezávislé na frekvenci dopadajícího záření, je možné ze závislosti $V_0 = V_0(\nu)$ s použitím tabulkové hodnoty e určit Planckovu konstantu ze směrnice přímkové závislosti:

$$\frac{h}{e} = \frac{V_0}{\nu} \quad (4)$$

Výsledky měření

1), 2) Proměřování voltampérových charakteristik 2 fotonek

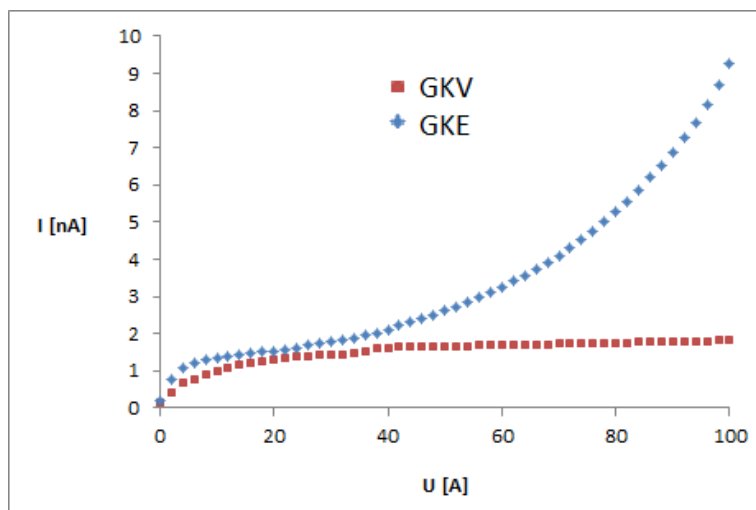
Nejprve jsme zkoumali 2 fotonky, GKE a GKV.

Naměřené hodnoty jsou v tabulce 1:

U [A]	I [nA]	U [A]	I [nA]
0	0,14	0	0,21
2	0,42	2	0,78
4	0,67	4	1,05
6	0,78	6	1,19
8	0,88	8	1,29
10	0,98	10	1,35
12	1,07	12	1,40
14	1,14	14	1,44
16	1,21	16	1,47
18	1,27	18	1,50
20	1,31	20	1,53
22	1,34	22	1,57
24	1,37	24	1,61
26	1,39	26	1,68
28	1,41	28	1,72
30	1,42	30	1,77
32	1,44	32	1,82
34	1,46	34	1,88
36	1,50	36	1,95
38	1,61	38	2,03
40	1,62	40	2,08
42	1,63	42	2,21
44	1,64	44	2,31
46	1,65	46	2,41
48	1,65	48	2,51
50	1,66	50	2,62
52	1,66	52	2,73
54	1,67	54	2,85
56	1,68	56	2,98
58	1,69	58	3,11
60	1,69	60	3,25
62	1,70	62	3,41
64	1,71	64	3,57
66	1,71	66	3,74
68	1,71	68	3,92
70	1,72	70	4,10
72	1,73	72	4,30
74	1,75	74	4,52
76	1,75	76	4,75
78	1,75	78	5,00
80	1,76	80	5,26
82	1,76	82	5,53
84	1,77	84	5,85
86	1,77	86	6,19
88	1,78	88	6,50
90	1,79	90	6,86
92	1,79	92	7,27
94	1,80	94	7,69
96	1,80	96	8,16
98	1,81	98	8,68
100	1,82	100	9,25
GKV		GKE	
546 nm		546 nm	

Tab.1: V-a charakteristika pro fotonky GKE a GKV

Pokud data z Tabulky 1 znázorníme v grafu, dostaneme následující:



Graf 1: V-a charakteristika vakuové (GKV) a plynové (GKE) fotonky

Na obrázku 1 vidíme v-a charakteristiku 2 fotonek a jasně vidíme, že fotonka GKV jest vakuová, neboť v souladu s teorií pro shodnou hodnotu napětí U proud I v ní nabývá menších hodnot.

(V grafu neuvádíme chybové úsečky, v této části měření nám šlo pouze o porovnání tvaru funkčních závislostí. Měřili jsme též na přístrojích se stejným měřicím rozsahem, chyba tedy byla velice podobná.)

3), 4) Určení Planckovy konstanty

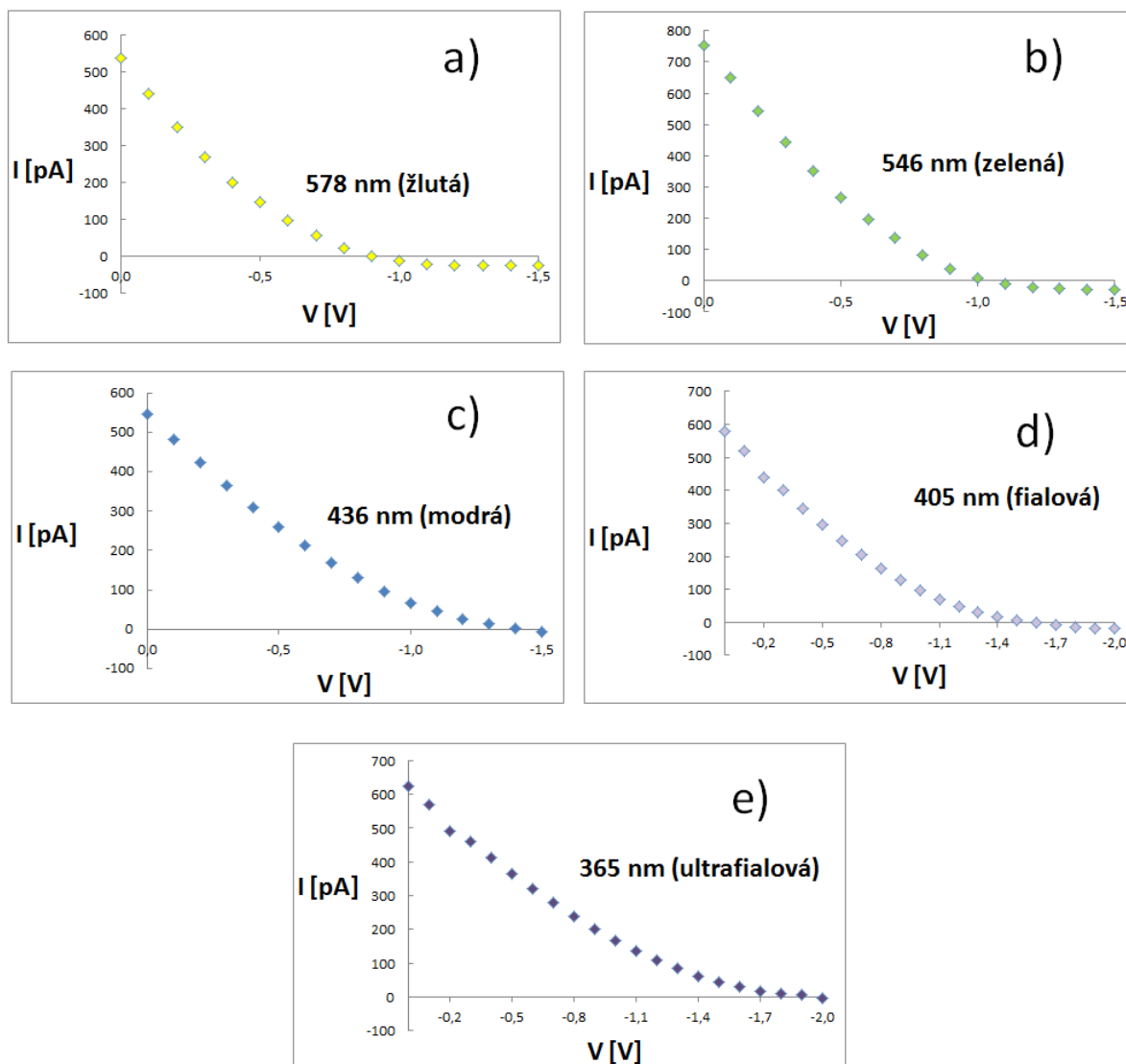
Pro fotonku GKV jsme naměřili 5 v-a charakteristik (pro různé hodnoty ν) v závěrném směru (napětí U jest záporné):

U [A]	I [pA]	$\pm\sigma$ [pA]	U [A]	I [pA]	$\pm\sigma$ [pA]	U [A]	I [pA]	$\pm\sigma$ [pA]	U [A]	I [pA]	$\pm\sigma$ [pA]	U [A]	I [pA]	$\pm\sigma$ [pA]
0,0	537,0	2,0	0,0	753,0	2,7	0,0	546,0	2,0	0,0	581,0	2,1	0,0	623,0	2,3
-0,1	441,0	1,7	-0,1	649,0	2,3	-0,1	483,0	1,8	-0,1	519,0	2,0	-0,1	569,0	2,1
-0,2	350,0	1,5	-0,2	544,0	2,0	-0,2	424,0	1,7	-0,2	441,0	1,7	-0,2	493,0	1,9
-0,3	268,0	1,2	-0,3	443,0	1,7	-0,3	366,0	1,5	-0,3	401,0	1,6	-0,3	460,0	1,8
-0,4	202,0	1,0	-0,4	350,0	1,5	-0,4	310,0	1,3	-0,4	345,0	1,4	-0,4	412,0	1,6
-0,5	148,0	0,8	-0,5	268,0	1,2	-0,5	259,0	1,2	-0,5	295,0	1,3	-0,5	364,0	1,5
-0,6	99,0	0,7	-0,6	198,0	1,0	-0,6	213,0	1,0	-0,6	246,0	1,1	-0,6	321,0	1,4
-0,7	56,0	0,6	-0,7	137,0	0,8	-0,7	169,0	0,9	-0,7	204,0	1,0	-0,7	278,0	1,2
-0,8	23,0	0,5	-0,8	83,0	0,6	-0,8	131,0	0,8	-0,8	164,0	0,9	-0,8	238,0	1,1
-0,9	0,0	0,4	-0,9	37,0	0,5	-0,9	97,0	0,7	-0,9	129,0	0,8	-0,9	201,0	1,0
-1,0	-13,0	0,4	-1,0	7,0	0,4	-1,0	68,0	0,6	-1,0	98,0	0,7	-1,0	167,0	0,9
-1,1	-20,0	0,3	-1,1	-10,0	0,4	-1,1	45,0	0,5	-1,1	71,0	0,6	-1,1	135,0	0,8
-1,2	-23,0	0,3	-1,2	-20,0	0,3	-1,2	27,0	0,5	-1,2	49,0	0,5	-1,2	109,0	0,7
-1,3	-24,0	0,3	-1,3	-25,0	0,3	-1,3	13,0	0,4	-1,3	31,0	0,5	-1,3	86,0	0,7
-1,4	-25,0	0,3	-1,4	-27,0	0,3	-1,4	2,0	0,4	-1,4	17,0	0,5	-1,4	62,0	0,6
-1,5	-25,0	0,3	-1,5	-29,0	0,3	-1,5	-6,0	0,4	-1,5	6,0	0,4	-1,5	43,0	0,5
-1,6	-26,0	0,3	-1,6	-30,0	0,3	-1,6	-12,0	0,4	-1,6	-2,0	0,4	-1,6	29,0	0,5
-1,7	-26,0	0,3	-1,7	-30,0	0,3	-1,7	-17,0	0,3	-1,7	-8,0	0,4	-1,7	17,0	0,5
-1,8	-26,0	0,3	-1,8	-31,0	0,3	-1,8	-19,0	0,3	-1,8	-13,0	0,4	-1,8	11,0	0,4
-1,9	-26,0	0,3	-1,9	-31,0	0,3	-1,9	-21,0	0,3	-1,9	-17,0	0,3	-1,9	6,0	0,4
-2,0	-26,0	0,3	-2,0	-32,0	0,3	-2,0	-21,0	0,3	-2,0	-19,0	0,3	-2,0	-4,0	0,4
-2,1	-27,0	0,3	-2,1	-32,0	0,3	-2,1	-24,0	0,3	-2,1	-21,0	0,3	-2,1	-8,0	0,4
-2,2	-27,0	0,3	-2,2	-32,0	0,3	-2,2	-23,0	0,3	-2,2	-22,0	0,3	-2,2	-12,0	0,4
-2,3	-27,0	0,3	-2,3	-33,0	0,3	-2,3	-24,0	0,3	-2,3	-22,0	0,3	-2,3	-14,0	0,4
-2,4	-27,0	0,3	-2,4	-33,0	0,3	-2,4	-24,0	0,3	-2,4	-23,0	0,3	-2,4	-15,0	0,4
-2,5	-28,0	0,3	-2,5	-33,0	0,3	-2,5	-25,0	0,3	-2,5	-23,0	0,3	-2,5	-16,0	0,4
-2,6	-28,0	0,3	-2,6	-33,0	0,3	-2,6	-25,0	0,3	-2,6	-24,0	0,3	-2,6	-18,0	0,3
-2,7	-29,0	0,3	-2,7	-33,0	0,3	-2,7	-25,0	0,3	-2,7	-24,0	0,3	-2,7	-18,0	0,3
-2,8	-29,0	0,3	-2,8	-34,0	0,3	-2,8	-25,0	0,3	-2,8	-25,0	0,3	-2,8	-18,0	0,3
-2,9	-28,0	0,3	-2,9	-34,0	0,3	-2,9	-26,0	0,3	-2,9	-25,0	0,3	-2,9	-19,0	0,3
-3,0	-30,0	0,3	-3,0	-34,0	0,3	-3,0	-26,0	0,3	-3,0	-25,0	0,3	-3,0	-19,0	0,3
578 nm (žlutá)			546 nm (zelená)			436 nm (modrá)			405 nm (fialová)			365 nm (ultrafialová)		

Tab.2: V-a charakteristika vakuové (GKV) a ~~plynové (GKE)~~ fotonky v závěrném směru

Chyby hodnoty proudu I jsme určili z údajů o měřicím přístroji od výrobce. Pro měřicí rozsah $2nA$ činila chyba $0,3\%$ naměřené hodnoty + $400 fA$

Graficky zpracovaná data z Tabulky 2 uvádíme v grafech 2 (a-e):



Graf 2: (a-e) graf brzdného napětí V pro různé vlnové délky záření λ

Z grafů získáváme hodnoty nulového brzdného napětí V_0 , nicméně velice okometricky, proto chyba našeho odhadu bude činiti $\pm 0,1V$... Odečtené hodnoty uvádíme v Tabulce 3.

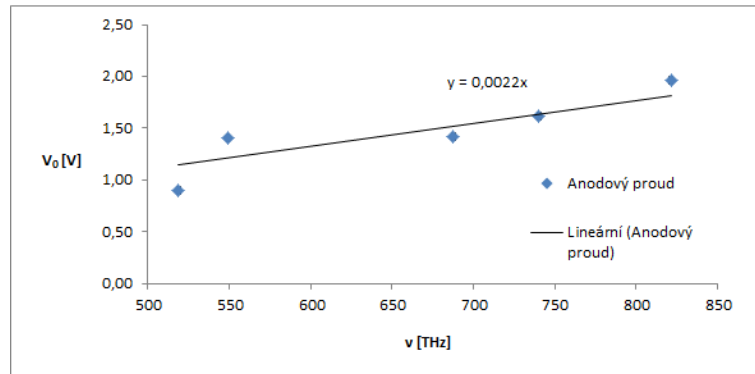
λ [nm]	ν [THz]	V_0 [V]	$\pm \sigma$ [V]
578	518,67	0,90	0,1
546	549,07	1,40	0,1
436	687,60	1,42	0,1
405	740,23	1,62	0,1
365	821,35	1,96	0,1

Tab.3: Hodnoty nulového napětí V_0 pro různé frekvence ν

Z vlnové délky λ jsme dopočítali frekvenci použitého zdroje záření ν dle následující rovnice:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (5)$$

Pokud hodnotami z Tabulky 3 proložíme lineární regraci^{es}, dostaneme Graf 3:



Graf 3: Lineární závislost

Z něj můžeme odečíst směrnici $\frac{V_0}{\nu} = (2,2 \pm 2,2) \cdot 10^{-15} \frac{V}{Hz}$.

Tedy dle (4)

$$\frac{h}{e} = (2,2 \pm 2,2) \cdot 10^{-15} \frac{V}{Hz}$$

A tedy:

$$h = (3,5 \pm 3,5) \cdot 10^{-34} J \cdot s$$

Kde chybu jsme určili jako $\pm 100\%$ z naměřené hodnoty, protože v rámci našeho měření se nashromáždilo spousta nepřesností, jejichž chyba se navíc velice těžko určuje, natožpak kombinuje, více viz. Diskuse.

Diskuze

Udávaná hodnota Planckovy konstanty v jednotce eV/Hz činí [3]:

$$h = 4,135 \dots 10^{-15} \frac{eV}{Hz}$$

Nám vyšlo:

$$h = (2,2 \pm 2,2) \cdot 10^{-15} \frac{eV}{Hz}$$

Udávaná hodnota Planckovy konstanty v jednotce $J \cdot s$ činí [3]:

$$h = 6,626 \dots 10^{-34} J \cdot s$$

Nám vyšlo:

$$h = (3,5 \pm 3,5) \cdot 10^{-34} J \cdot s$$

Shodují se nám řády, ale nejistota jest vysoká. Z textu [1] víme, že

"V popsaném uspořádání lze určit Planckovu konstantu v nejlepším případě s přesností několika procent. Nepřesnost je dána především neostrotí zlomu voltampérové charakteristiky, což vede k nepřesnému určení kritického napětí V_0 ."

Další nepřesnost určitě vznikla i v lineární regresi. I tam se nám chyba špatně odhaduje.

Závěr

Proměřili jsme voltampérové charakteristiky 2 fotonek různých druhů GKE a GKV. Na základě charakteristik jsme pak určili, že fotonka GKV je vakuová a fotonka GKE jest plněna plynem.

Pro další měření jsme využívali pouze fotonky GKV, kterou jsme ozařovali elektromagnetickým zářením o frekvencích $\lambda = 365, 405, 436, 546, 578 \text{ nm}$. Zároveň s ozařováním fotonky jsme aplikovali brzdné napětí, abychom určili hodnotu nulového napětí V_0 . Získali jsme tak 5 hodnot V_0 pro 5 použitých vlnových délek λ resp. frekvencí ν .

Proložení grafu závislosti V_0 na ν jsme získali hodnotu veličiny $\frac{h}{e}$, z níž jsme pak následně dopočítali velikost Planckovy konstanty.

Velikost Planckovy konstanty nám vyšla v tomto provedení jako:

$$h = (3,5 \pm 3,5) \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

Reference

- [1] (A9) Studium fotoelektrického jevu. Určení Planckovy konstanty. [Základní fyzikální praktikum]. [online][cit. 8.11.2021]. Dostupné z: https://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/texty/txt_409.pdf
- [2] Studium fotoelektrického jevu, určení Planckovy konstanty [Základní fyzikální praktikum]. [online][cit. 8.11.2021]. Dostupné z: https://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/zadani/texty/txt_a09
- [3] Planckova konstanta –Wikipedie. [online][cit. 8.11.2021]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Planckova_konstanta