

FYZIKÁLNÍ PRAKTIKUM

Fyzikální praktikum 3

Zpracoval: Artem Gorodilov

Naměřeno: 22. dubna 2024

Obor: Astrofyzika

Skupina: Po 14:00

Testováno:

Úloha č. H: **Studium činnosti fotonásobiče****1. Zadání**

1. Stanovit závislost koeficientu sekundární emise na energii elektronů dopadajících na dynodu.

Vynesti do grafu i závislost $\ln(\sigma/U) = f(U)$.

Zjistit, jestli koeficient sekundární emise σ závisí na intenzitě osvětlení fotokatody.

2. Stanovit a vynést do grafu závislost integrální citlivosti fotonásobiče a zesílení fotonásobiče na napětí na násobiči $S = f(U_a)$ a $M = f(U_a)$.

3. Stanovte integrální citlivost fotokatody $k = I_f/\Phi$.

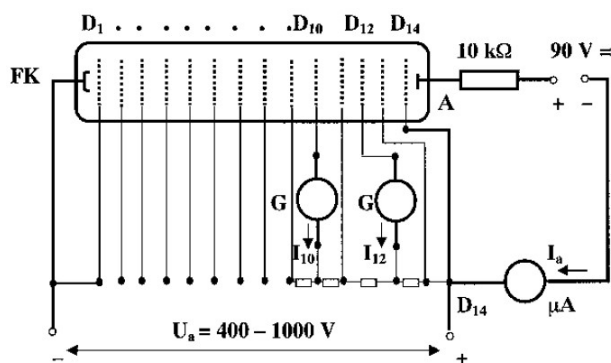
4. Prověřit vliv temného proudu na přesnost měření.

2. Teorie

Fotonásobič je zařízení, které zesiluje slabé světelné signály. Skládá se z fotokatody, dynody (několik dyod) a anody.

Fotonásobič funguje na principu fotoelektrického jevu. Foton dopadající na fotokatodu vyvolá emisi elektronů. Tyto elektrony jsou urychlovány elektrickým polem k dynodám, kde se díky nárazové ionizaci uvolní další elektrony. Tyto elektrony jsou následně urychlovány k anodě, kde vzniká elektrický signál. Schema fotonásobiče je zobrazeno na obrázku (1).

Sekundární emise je definována jako poměr proudů sekundárních elektronů I_{sec} a proudů primárních elektronů I_{prim} . V našem případě máme fotonásobič s dvěma dynodami, takže koeficient sekundární emise σ je definován jako:



Obrázek (1) Schéma elektrického zapojení fotonásobiče. Napětí na násobiči U_a je rozděleno napět'ovým děličem a je přivedeno na jednotlivé dynody.

$$\sigma = \sqrt{\frac{I_{12}}{I_{10}}} \quad (1)$$

kde I_{12} je proud na dvanácté dynodě a I_{10} je proud na desáté dynodě. Odmocnina je zde proto, že máme dvě dynody.

Celý postup zesílení elektronového toku z fotokatody lze zjednodušeně popsat následujícími vztahy. Proud elektronů z fotokatody I_f závisí na světelném toku dopadajícím na fotokatodu podle Stoletovova zákona pro bílé světlo:

$$I_f = k\Phi \quad (2)$$

kde k je integrální citlivost fotokatody a Φ je světelný tok.

Známe-li anodový proud I_a a koeficient sekundární emise σ , můžeme vypočítat proud elektronů na fotokatodě I_f :

$$I_f = \frac{I_a}{\sigma^n} \quad (3)$$

kde n je počet dynod.

Zesílení fotonásobiče M je definováno jako poměr anodového proudu I_a a fotokatodového proudu I_f :

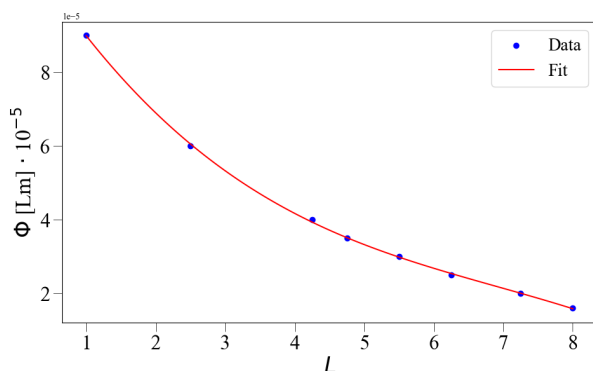
$$M = \frac{I_a}{I_f} = \sigma^n \quad (4)$$

Integrální citlivost fotonásobiče S je definována jako poměr anodového proudu I_a a světelného toku Φ :

$$S = \frac{I_a}{\Phi} = Mk \quad (5)$$

3. Měření

K převodu dělení komory fotonásobiče na světelný proud jsme použili údaje o graduaci optického klínu. Vzali jsme hodnoty, které nám byly poskytnuty, a provedli fitování polynomem třetího stupně. Výsledky jsou uvedeny na obrázku (2).



Obrázek (2) Gradace optického klínu.

3.1. Temný proud

Jsme změřili temný proud I_{10} , I_{12} a I_a pro různé hodnoty napětí na násobiči U_a . Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce (1) a na obrázku (7). Naměřené hodnoty jsme fitovali polynomem třetího stupně pro I_a , I_{12} a lineární regresí pro I_{10} . Hodnoty fitů byly poté použity ke korekci naměřených dat použitých dále ve výpočtech.

3.2. Sekundární emise

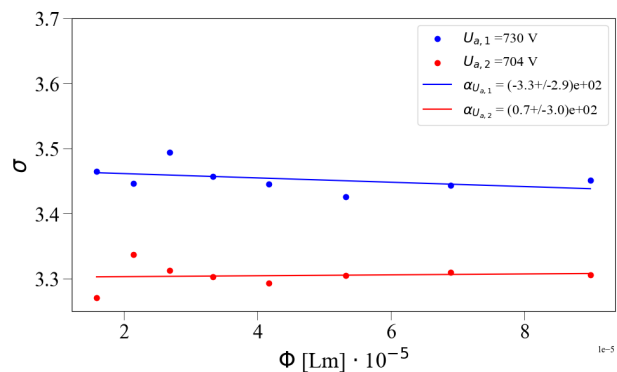
Poté jsme pomocí vzorce (1) zjistili koeficient sekundární emise σ pro diody 10 a 12. Za tímto účelem jsme změřili hodnoty proudů I_{10} a I_{12} v závislosti na světelném proudu Φ . Měření byla provedena pro anodové napětí:

$$U_{a,1} = 730 \text{ [V]} \text{ a } U_{a,2} = 704 \text{ [V]}$$

Naměřené a vypočtené údaje jsou uvedeny v tabulkách (2) a (3).

Získali jsme následující hodnoty koeficientů sekundárních emisí:

$$\sigma_{730V} = 3.47(1) \text{ a } \sigma_{704V} = 3.33(1)$$



Obrázek (3) Závislost koeficientu sekundární emise na světelném proudu.

Abychom zjistili, zda existuje závislost koeficientu sekundární emise na světelném proudu, vynesli jsme graf (3) závislosti σ na Φ .

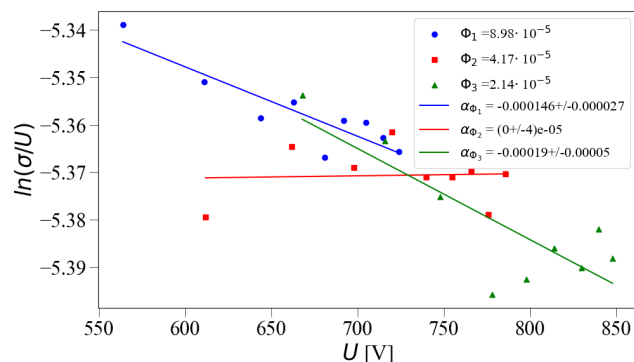
Jsme také provedli lineární fitování závislosti $\sigma = f(\Phi)$ abychom zjistili stupeň závislosti.

3.3. Zesílení a integrální citlivost

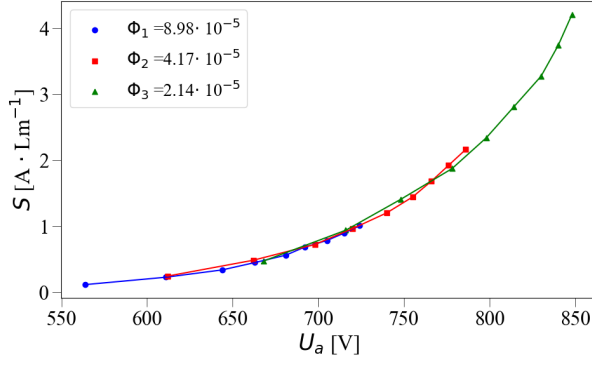
Poté jsme provedli tři měření závislosti anodového proudu I_a a proudů na diodách 10 a 12, I_{10} a I_{12} na anodovém napětí U_a . Byla provedena tři měření při třech hodnotách světelného proudu:

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= 8.98 \cdot 10^{-5} \text{ [Lm} \cdot 10^{-5}] \\ \Phi_2 &= 4.17 \cdot 10^{-6} \text{ [Lm} \cdot 10^{-5}] \\ \Phi_3 &= 2.14 \cdot 10^{-5} \text{ [Lm} \cdot 10^{-5}] \end{aligned}$$

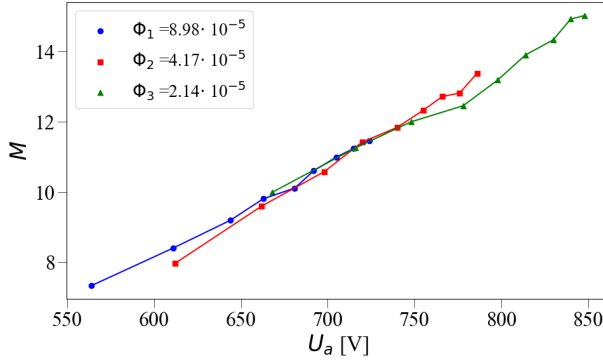
Podle vzorce (1) jsme vypočítali koeficient sekundární emise σ pro diody 10 a 12. Dale umcnením koeficientu sekundární emise σ na druhou jsme získali zesílení fotonásobiče M a pak, podle vzorce (4) jsme vypočítali proud elektronů na fotokatodě I_f . Odsud pomocí vzorce (2) jsme vypočítali integrální citlivost fotokatody k . Pak jsme byli schopni vypočítat integrální citlivost fotonásobiče S podle vzorce (5). Naměřené a vypočtené hodnoty jsou uvedeny v tabulkách (4), (5) a (6). Vynesli jsme do grafu (4) závislost $\ln(\sigma/U) = f(U)$ pro všechny tři hodnot. Pak vynesli jsme grafy (5) a (6) závislosti S a M na U_a pro všechny tři hodnoty světelného proudu Φ .



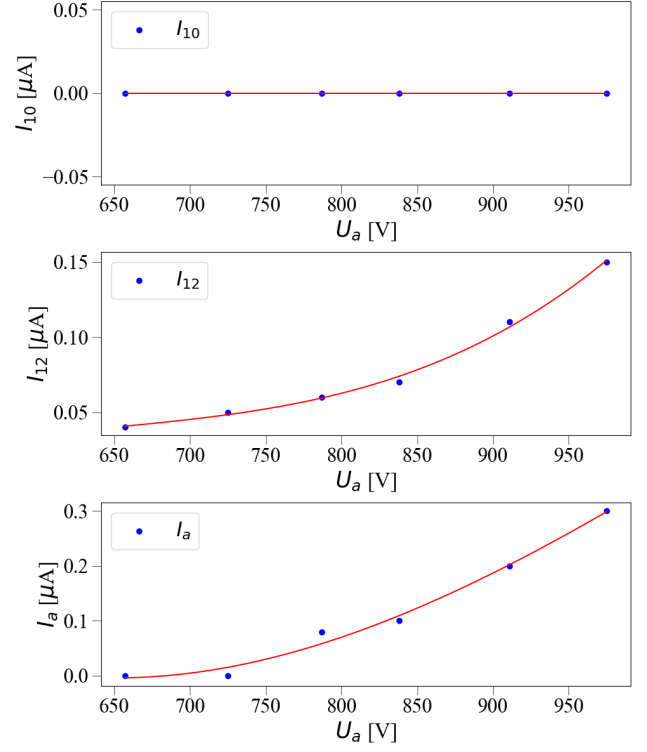
Obrázek (4) Závislost $\ln(\sigma/U) = f(U)$.



Obrázek (5) Závislost integrální citlivosti fotonásobiče na napětí na násobiči $S = f(U_a)$.



Obrázek (6) Závislost zesílení fotonásobiče na napětí na násobiči $M = f(U_a)$.



Obrázek (7) Závislost temného proudu na napětí na násobiči.

K výpočtu veličin a jejich nejistot byla použita knihovna Uncertainties pro Python [1]. Chyby byly rozšířeny o Studentův koeficient (2-Tail Confidence Level) s ohledem na stupně volnosti pro každou hodnotu, pro interval spolehlivosti 68.27%.

4. Závěr

Byla zjištěna závislost koeficientu sekundární emise σ na světelném proudu Φ . Z grafu (3) bylo zjištěno, že koeficient sekundární emise σ slabě závisí na světelném proudu Φ . Z grafu je patrné, že sklon přímky lze v rámci chyby fitování považovat za nulový $\alpha_{U_{a,1}} = -(330 \pm 290)$ [Lm⁻¹], $\alpha_{U_{a,2}} = -(70 \pm 300)$ [Lm⁻¹]. To je patrné zejména při hodnotách světelného proudu $\Phi > 3 \cdot 10^{-5}$ [Lm · 10⁻⁵]. Při $\Phi < 3 \cdot 10^{-5}$ [Lm · 10⁻⁵] dochází ke skokům v hodnotách σ , které mohou být způsobeny nepřesností měření proudu na desáté diodě I_{10} , protože při nízkých hodnotách Φ nabývá I_{10} poměrně malých hodnot.

Ze závislosti $\ln(\sigma/U) = f(U)$ vyplývá, že hodnota $\ln(\sigma/U)$ s rostoucím napětím lineárně klesá. To je dobře vidět zejména pro Φ_1 a Φ_3 . U Φ_2 je klesající trend menší, což může být způsobeno nepřesností měření.

Z grafu (5) závislosti S na U_a je vidět, že integrální citlivost fotonásobiče S s rostoucím napětím roste exponenciálně.

Z grafu (6) závislosti M na U_a je vidět, že zesílení fotonásobiče M s rostoucím napětím roste spíše lineárně.

Z tabulky (6) je patrné, že temný proud začíná být patrný při napětí $U_a > 800$ V.

Odkazy

[1] Uncertainties, Dostupné online: <https://pypi.org/project/uncertainties>

5. Appendix

5.1. Tabulka naměřených hodnot pro temný proud

U_a [V]	I_a [μ A]	I_{10} [μ A]	I_{12} [μ A]
657	0.0	0	0.04
725	0.0	0	0.05
787	0.08	0	0.06
838	0.1	0	0.07
911	0.2	0	0.11
975	0.3	0	0.15

5.2. Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro $U_{a,1} = 730$ V

Φ [Lm $\cdot 10^{-5}$]	I_a [μ A]	I_{10} [μ A]	I_{12} [μ A]	σ
8.98	96.98	0.97	11.55	3.45
6.89	76.98	0.75	8.89	3.44
5.32	56.98	0.56	6.57	3.43
4.17	46.98	0.45	5.34	3.45
3.32	37.98	0.36	4.3	3.46
2.68	29.98	0.29	3.54	3.49
2.14	23.98	0.23	2.73	3.45
1.59	19.98	0.18	2.16	3.46

5.3. Tabulka naměřených hodnot pro $U_{a,2} = 704$ V

Φ [Lm $\cdot 10^{-5}$]	I_a [μ A]	I_{10} [μ A]	I_{12} [μ A]	σ
8.98	69.99	0.77	8.41	3.31
6.89	52.99	0.59	6.46	3.31
5.32	40.99	0.44	4.8	3.3
4.17	32.99	0.36	3.9	3.29
3.32	26.99	0.29	3.16	3.3
2.68	21.99	0.23	2.52	3.31
2.14	17.99	0.18	2.0	3.34
1.59	12.99	0.15	1.6	3.27

5.4. Tabulka naměřených hodnot pro $\Phi_1 = 8.98 \cdot 10^{-5}$ [Lm $\cdot 10^{-5}$]

U_a [V]	I_a [μ A]	I_{10} [μ A]	I_{12} [μ A]	σ	M	I_f [μ A]	k [\cdot Lm $^{-1}$]	S [A \cdot Lm $^{-1}$]	$\ln(\sigma/U)$
564	9.973	0.18	1.32	2.708	7.333	1.36	0.015	0.111	-5.339
611	19.998	0.31	2.604	2.898	8.4	2.381	0.026	0.223	-5.351
644	30.004	0.42	3.861	3.032	9.192	3.264	0.036	0.334	-5.359
663	40.003	0.52	5.099	3.131	9.805	4.08	0.045	0.445	-5.355
681	50.001	0.62	6.267	3.179	10.108	4.947	0.055	0.557	-5.367
692	60.998	0.71	7.526	3.256	10.6	5.755	0.064	0.679	-5.359
705	69.994	0.78	8.574	3.316	10.993	6.367	0.071	0.779	-5.36
715	79.989	0.86	9.663	3.352	11.236	7.119	0.079	0.89	-5.363
724	89.985	0.93	10.652	3.384	11.454	7.857	0.087	1.002	-5.366

5.5. Tabulka naměřených hodnot pro $\Phi_2 = 4.17 \cdot 10^{-6}$ [Lm· 10⁻⁵]

U_a [V]	I_a [μ A]	I_{10} [μ A]	I_{12} [μ A]	σ	M	I_f [μ A]	k [\cdot Lm ⁻¹]	S [A \cdot Lm ⁻¹]	$\ln(\sigma/U)$
612	9.998	0.16	1.274	2.822	7.962	1.256	0.03	0.24	-5.379
662	20.003	0.25	2.399	3.098	9.595	2.085	0.05	0.48	-5.365
698	29.996	0.34	3.595	3.252	10.574	2.837	0.068	0.719	-5.369
720	39.987	0.41	4.682	3.379	11.42	3.501	0.084	0.959	-5.362
740	49.976	0.49	5.799	3.44	11.836	4.223	0.101	1.199	-5.371
755	59.967	0.55	6.777	3.51	12.322	4.867	0.117	1.438	-5.371
766	69.959	0.61	7.755	3.566	12.713	5.503	0.132	1.678	-5.37
776	79.951	0.68	8.713	3.58	12.813	6.24	0.15	1.918	-5.379
786	89.942	0.73	9.761	3.657	13.371	6.727	0.161	2.157	-5.37

5.6. Tabulka naměřených hodnot pro $\Phi_3 = 2.14 \cdot 10^{-5}$ [Lm· 10⁻⁵]

U_a [V]	I_a [μ A]	I_{10} [μ A]	I_{12} [μ A]	σ	M	I_f [μ A]	k [\cdot Lm ⁻¹]	S [A \cdot Lm ⁻¹]	$\ln(\sigma/U)$
668	10.003	0.12	1.198	3.16	9.985	1.002	0.047	0.468	-5.354
716	19.989	0.21	2.363	3.354	11.252	1.777	0.083	0.934	-5.363
748	29.971	0.29	3.478	3.463	11.994	2.499	0.117	1.401	-5.375
778	39.949	0.36	4.483	3.529	12.452	3.208	0.15	1.868	-5.396
798	49.932	0.42	5.538	3.631	13.186	3.787	0.177	2.334	-5.393
814	59.916	0.46	6.394	3.728	13.899	4.311	0.202	2.801	-5.386
830	69.899	0.51	7.309	3.786	14.331	4.878	0.228	3.268	-5.39
840	79.888	0.56	8.355	3.863	14.92	5.354	0.25	3.735	-5.382
848	89.879	0.6	9.013	3.876	15.021	5.984	0.28	4.202	-5.388