

FYZIKÁLNÍ PRAKTIKUM

Fyzikální praktikum 3

Zpracoval: Lukáš Lejdar

Naměřeno: 26. února 2025

Obor: F

Skupina: Út 14:00

Testováno:

Úloha č. 9: Studium činnosti fotonásobiče

1. Úvod

Úloha je zaměřena na studium činnosti fotonásobiče a jeho základních charakteristik. Cílem je zjistit, jak závisí koeficient sekundární emise na energii elektronů a jestli je ovlivněn intenzitou osvětlení. Z naměřených hodnot vypočítám zesílení a citlivost fotonásobiče a nakonec ověřím vliv temného proudu na přesnost měření.

2. Teorie

Fotonásobič je elektro-optický přístroj, který slouží k zesilování velmi slabých světelných signálů. Využívá při tom dva základní jevy - fotoemisi a sekundární emisi

- ① **Fotoemise:** Fotony, dopadající na fotokatodu z ní dokáží vyrazit elektrony. Energie světelného kvanta se přemění na práci potřebnou k uvolnění elektronu a jeho kinetickou energii

$$h\nu = w + \frac{mv^2}{2} \quad (1)$$

- ② **Sekundární emise:** Nastává, když elektron s dostatečnou energií dopadne na dynodu a uvolní další elektrony. Koeficient sekundární emise je potom

$$\sigma = \frac{I_{sek}}{I_{prim}} \quad (2)$$

a jeho velikost závisí na materiálu elektrod a podle vztahu

$$\sigma = AE \exp(-\mu E), \quad (3)$$

kde A a μ jsou konstanty závislé na materiálu elektrod. E je energie elektronů, kterou v případě fotonásobiče můžeme nastavit pomocí napětí mezi dvěma sousedními dynodami.

Ve fotonásobiči elektrony postupně procházejí z fotokatody přes několik dynod, kdy jsou po celou cestu urychlovány konstantním napětím a proto jejich počet roste geometricky s počtem dynod n . Pokud proud na poslední anodě je I_a a proud na fotokatodě I_f , potom platí

$$I_a = \sigma^n I_f, \quad (4)$$

kde σ je koeficient sekundární emise σ mezi dvěma katodami. Zároveň taky platí Stoletův zákon pro bílé světlo, že

$$I_f = k\Phi, \quad (5)$$

kde Φ je intenzita světla dopadajícího na fotokatodu. Zavádíme taky veličinu zesílení fotonásobiče M

$$M = \frac{I_a}{I_f} \quad (6)$$

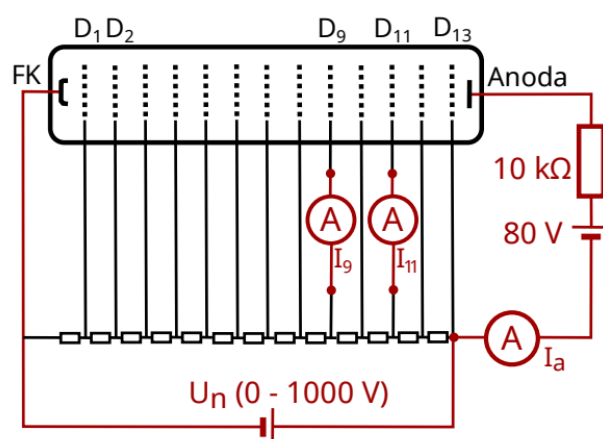
a citlivost fotonásobiče S

$$I_a = Mk\Phi = S\Phi \quad S = Mk \quad (7)$$

3. Postup měření

Fotonásobič je umístěn v temné komoře, kde je možný zdroj světla regulovat otočným klínem. Můžeme taky nastavit celkové napětí na fotonásobiči U_n a měřit proud na dynodách 10 a 12 a taky celkový proud anodový I_a . Prvním úkolem je stanovit závislost koeficientu sekundární emise, zesílení a integrální citlivosti na napětí mezi jednotlivými dynodami a ve druhé části potom ověřit, jestli tyto veličiny závisí na intenzitě osvětlení Φ , nebo ne.

Bude taky potřeba zjistit, jaký je anodový proud, když je zdroj světla úplně vypnutý. Tento proud se nazývá temný proud a je důležité, aby byl alespoň o řád menší než hodnoty naměřené při běžném osvětlení, abychom ho mohli zanedbat.



Obrázek 1: Schéma zapojení fotonásobiče. FK je fotokatoda, D_1 až D_{13} jsou dynody a U_n je napětí přivedené na násobič.

4. Výsledky měření

4.1. Závislost koeficientu sekundární emise na energii elektronů

Fotonásobič jsem zapojil podle obrázku 1 a pro různé napětí U_n měřil anodový proud a proud na dynodě 10 a 12. Koeficient sekundární emise a energii dopadajících elektronů potom spočítám podle vztahů

$$\sigma = \sqrt{\frac{I_{12}}{I_{10}}} \quad E = \frac{qU_n}{n}, \quad (8)$$

protože mezi 10 a 12 dynodou dojde k zesílení o σ^2 a napětí U_n je mezi dynody rozdělené rovnoměrně. Závislost σ na E by měla exponenciální podle vztahu (3), který tedy zlogaritmuji a fit bude přímkou podle $y = \ln(\frac{\sigma}{E}) = f(E)$ pro směrnici μ

$$\ln \frac{\sigma}{E} = -\mu E + \ln A \quad (9)$$

$$\mu_1 = 0.0023 \pm 0.0004$$

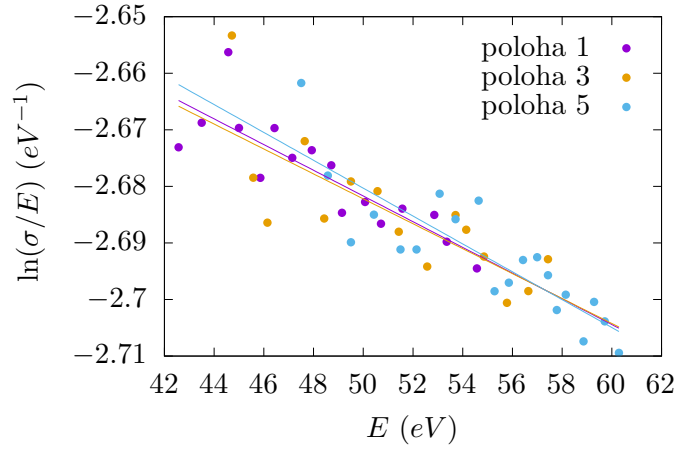
$$\mu_3 = 0.0022 \pm 0.0005$$

$$\mu_5 = 0.0025 \pm 0.0004$$

$$A_1 = -2.56 \pm 0.02$$

$$A_3 = -2.57 \pm 0.02$$

$$A_5 = -2.56 \pm 0.02$$

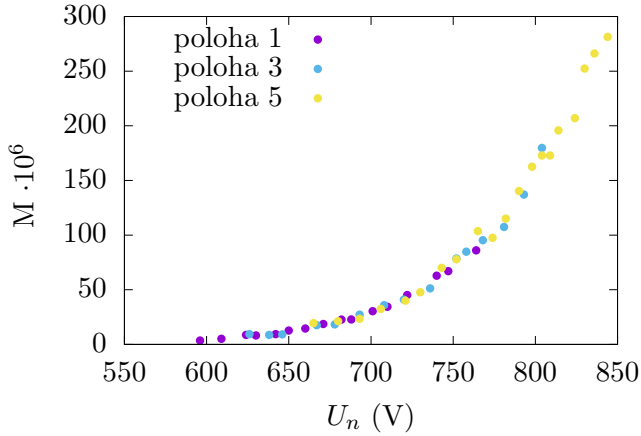


Graf 1: Závislost koeficientu emise na energii dopadajících elektronů.

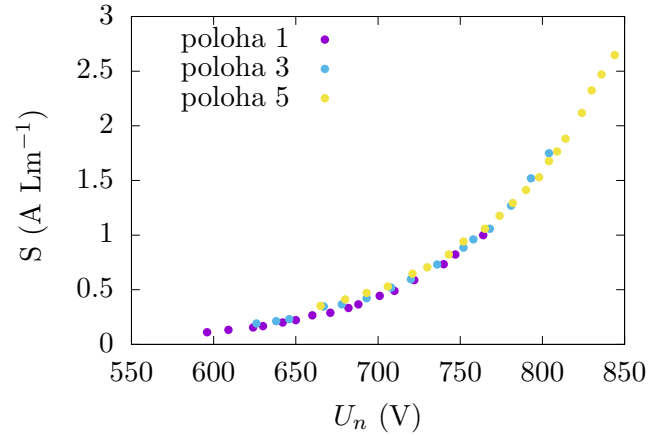
poloha klínu 1 $\Phi = 90 \mu\text{Lm}$						poloha klínu 3 $\Phi = 52 \mu\text{Lm}$						poloha klínu 5 $\Phi = 33 \mu\text{Lm}$					
U_n V	I_{10} μA	I_{12} μA	I_a μA	σ	$k \cdot 10^{-9}$ ALm^{-1}	U_n V	I_{10} μA	I_{12} μA	I_a μA	σ	$k \cdot 10^{-9}$ ALm^{-1}	U_n V	I_{10} μA	I_{12} μA	I_a μA	σ	$k \cdot 10^{-9}$ ALm^{-1}
596	0.16	1.38	10	2.94	31.0	626	0.12	1.18	9	3.15	20.4	665	0.15	1.69	12	3.32	18.1
609	0.18	1.64	12	3.02	25.8	638	0.13	1.33	11	3.13	24.5	680	0.16	1.84	14	3.34	19.4
624	0.20	1.96	14	3.13	18.0	645	0.17	1.63	12	3.14	25.1	693	0.18	1.99	16	3.36	20.1
630	0.21	2.04	15	3.12	20.4	666	0.20	2.15	18	3.29	19.7	705	0.20	2.40	18	3.44	16.3
642	0.24	2.38	18	3.15	21.2	677	0.25	2.69	19	3.30	20.0	720	0.21	2.57	22	3.49	16.2
650	0.26	2.69	20	3.22	17.5	693	0.25	2.86	21	3.40	15.5	730	0.26	3.23	24	3.54	14.8
660	0.29	3.06	24	3.25	18.3	708	0.29	3.47	27	3.46	14.5	743	0.27	3.61	28	3.63	11.7
671	0.31	3.39	26	3.31	15.4	719	0.31	3.84	31	3.50	14.5	751	0.32	4.23	32	3.66	12.1
682	0.34	3.82	30	3.35	14.7	736	0.39	4.95	38	3.55	14.3	765	0.32	4.51	36	3.74	10.2
688	0.37	4.16	33	3.35	16.1	751	0.49	6.60	46	3.66	11.3	773	0.38	5.31	40	3.72	12.1
701	0.43	5.04	40	3.42	14.6	758	0.47	6.43	49	3.68	11.3	782	0.37	5.31	44	3.77	11.2
710	0.45	5.37	44	3.45	14.2	768	0.52	7.23	54	3.71	11.1	790	0.39	5.62	48	3.82	10.1
722	0.52	6.45	53	3.52	13.0	780	0.61	8.56	66	3.75	11.8	797	0.43	6.43	52	3.86	9.41
740	0.60	7.80	66	3.61	11.7	793	0.66	9.60	79	3.81	11.1	804	0.48	7.28	57	3.88	9.70
747	0.65	8.53	74	3.62	12.2	804	0.65	9.89	90	3.89	9.73	808	0.50	7.49	60	3.88	10.2
764	0.75	10.2	90	3.69	11.6							814	0.54	8.22	64	3.91	9.61
												824	0.62	9.53	72	3.93	10.2
												829	0.64	10.1	79	3.98	9.20
												835	0.75	12.0	84	4.00	9.28
												843	0.70	11.3	90	4.01	9.41

Tabulka 1: Změřené anodové a dynodové proudy při různých napětích na fotonásobiči.

Z tabulky 1 můžeme taky vypočítat podle vztahů (6) a (7) zesílení M a citlivosti S a vynést je v závislost na napětí U_n . Obě tyto závislosti by měli být znovu podle vztahu (3) přibližně exponenciální



Graf 2: Závislost zesílení fotonásobiče na napětí U_n

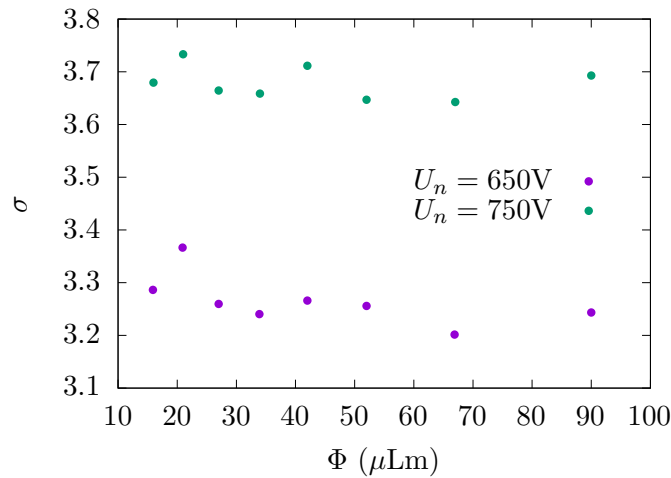


Graf 3: Závislost citlivosti fotonásobiče na napětí U_n

4.2. Závislost koeficientu sekundární emise na osvětlení fotokatody

Tentokrát jsem nechal stálé napětí $U_n = a$ a pohyboval s klínem pro regulaci osvětlení fotokatody. Naměřená data jsou uvedené v tabulce 2 a 3 a závislost koeficientu sekundární emise σ na osvětlení Φ vykreslená do grafu 4. Koeficient emise katody na osvětlení tolik nezávisí, takže jsem hodnoty statisticky vyhodnotil a vypočítal společně s integrální citlivostí fotokatody k ze vztahů (4) a (5).

$$\begin{array}{lll} \sigma = 3.68 \pm 0.05 & k = 11 \pm 2 \text{ nALm}^{-1} & \text{pro } U_n = 750 \text{ V} \\ \sigma = 3.26 \pm 0.08 & k = 18 \pm 5 \text{ nALm}^{-1} & \text{pro } U_n = 650 \text{ V} \end{array}$$



Graf 4: Závislost koeficientu sekundární emise na intenzitě osvětlení fotokatody

		$U_n = 750 \text{ V}$				
klín	$\Phi \text{ (}\mu\text{Lm)}$	$I_{10} \text{ (}\mu\text{A)}$	$I_{12} \text{ (}\mu\text{A)}$	$I_a \text{ (}\mu\text{A)}$	σ	$k \cdot 10^{-9} \text{ (ALm}^{-1}\text{)}$
1	90	0.65	8.86	74	3.69	9.4
2	66	0.48	6.37	56	3.64	11.5
3	52	0.40	5.32	46	3.65	12.0
4	42	0.33	4.55	37	3.71	9.4
5	33	0.27	3.61	32	3.66	12.2
6	27	0.22	2.95	25	3.66	11.8
7	20	0.17	2.37	21	3.73	9.8
8	15	0.14	1.90	17	3.68	12.7

Tabulka 2: Změřené anodové a dynodové proudy při napětí $U_n = 750 \text{ V}$.

		$U_n = 650 \text{ V}$				
klín	$\Phi \text{ (}\mu\text{Lm)}$	$I_{10} \text{ (}\mu\text{A)}$	$I_{12} \text{ (}\mu\text{A)}$	$I_a \text{ (}\mu\text{A)}$	σ	$k \cdot 10^{-9} \text{ (ALm}^{-1}\text{)}$
1	90	0.24	2.57	20	3.24	15.6
2	66	0.21	2.12	16	3.20	20.1
3	52	0.16	1.70	13	3.26	16.6
4	42	0.11	1.18	11	3.27	16.7
5	33	0.12	1.27	10	3.24	21.0
6	27	0.11	1.15	9	3.26	21.8
7	20	0.07	0.85	7	3.37	13.9
8	15	0.07	0.78	6	3.29	22.0

Tabulka 3: Změřené anodové a dynodové proudy při napětí $U_n = 650 \text{ V}$.

4.3. Vliv temného proudu

Nakonec ještě ověřím vliv temného proudu na změřené hodnoty. Pro několik vysokých napětí jsem při vypnutém zdroji světla měřil anodový proud a hodnoty uvedl v tabulce 4. Všechny tyto proudy jsou mnohem nižší, než ty z předešlých tabulek, takže jej nebylo potřeba brát v úvahu.

U_n	I_a
1000	1
800	0.9
700	0.25

Tabulka 4: Anodový proud při nulovém osvětlení

5. Závěr

V první části úlohy jsem měřil koeficient sekundární emise σ mezi dvěma dynodami fotonásobiče a ověřil, že na energii elektronů závisí exponenciálně podle vztahu $\sigma = AE \exp(-\mu E)$. Z naměřených hodnot jsem potom taky dopočítal zesílení M a citlivost fotonásobiče S a hodnoty vynesl do grafů 2, a 3 v závislosti na napětí U_n .

Pomocí anodového proudu a zjištěného koeficientu sekundární emise jsem potom dopočítal fotokatodový proud $I_f = I_a \sigma^{-n}$ a pak za vztahu (5) vyjádřil citlivost fotokatody k . Podle Stoletova zákona by mělo k záviset pouze na vlnové délce dopadajícího světla, ale z tabulek 2 a 3 vyplývá, že s rostoucím napětím na násobiči citlivost klesá. Myslím, že hodnoty I_f v těchto výpočtech nemůžou být příliš spolehlivé, když ani tímto způsobem většinou v tabulkách nedostanu sloupce I_{12} z $I_{12} = I_a \sigma^{-2}$.

Reference

- [1] Návod k úloze https://is.muni.cz/auth/el/sci/jaro2025/F4210/um/fp3-9_fotonasobic.pdf.