

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 vyrážet elektrony. Energie světelného kvanta $h\nu$ se přemění na práci potřebnou k uvolnění elektronu w a jeho kinetickou energii $E_k = \frac{mv^2}{2}$, kde v je rychlost elektronu a ν frekvence dopadajícího světla.

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

- ② **Sekundární emise:** Nastává, když elektron s dostatečnou energií dopadne na dynodu a uvolní další elektrony. Zavádí se veličina koeficient sekundární emise, jako poměr proudu uvolněných elektronů I_{sek} vůči proudu dopadajících I_{prim}

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

Jeho velikost závisí jen na energii dopadajících elektronů E a parametrech materiálu A a μ podle vztahu

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

Energii elektronů, můžeme v případě fotonásobiče 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 . Proud na poslední anodě označím I_a a proud na fotokatodě I_f a platí

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

kde σ je koeficient sekundární emise σ mezi dvěma katodami. Zároveň platí Stoletův zákon pro bílé světlo, že proud na fotokatodě I_f je přímo úměrný intenzitě dopadajícího světla Φ

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

kde $k(\lambda)$ je spektrální charakteristika fotokatody. V našem měření ji budeme považovat za konstantu. Zavádíme taky veličinu zesílení fotonásobiče M

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

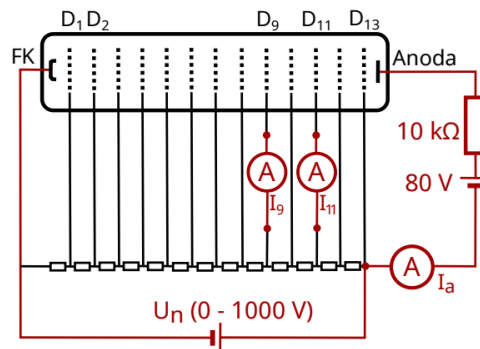
a citlivost fotonásobiče S

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

3. Postup měření

Fotonásobič je umístěný v temné komoře, kde je možné osvětlení regulovat otočným klínem. Můžeme taky nastavit celkové napětí na fotonásobiči U_n a měřit proud na dynodách 9 a 11 a taky celkový anodový proud 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 řádově stejný jako nejistoty měřených proudů, 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. Vliv temného proudu

Nejdřív ověřím vliv temného proudu na změřené hodnoty. Pro několik vysokých napětí jsem při vypnutém zdroji světla měřil anodový proud a hodnoty uvedl v Tabulce 1. Všechny tyto proudy jsou mnohem nižší, než ty z následujících tabulek, takže jej nebylo potřeba brát v úvahu.

U_n (V)	1000	800	700
I_a (μ A)	1	0.9	0.25

Tabulka 1: Anodový proud při nulovém osvětlení

4.2. 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 9 a 11. Koeficient sekundární emise a energii dopadajících elektronů potom spočítám podle vztahů

$$\sigma = \sqrt{\frac{I_{11}}{I_9}} \quad E = \frac{eU_n}{n}, \quad (8)$$

protože mezi 9 a 11 dynodou dojde k zesílení o σ^2 a napětí U_n je mezi dynody rozdělené rovnoměrně. Elektrony mají náboj e . Závislost σ na E by měla být podle vztahu (3) exponenciální, který tedy zlogaritmuji a fit bude přímkou podle $y = \ln(\frac{\sigma}{E}) = f(E)$ pro směrnici μ

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

$$\mu_1 = 0.0023 \pm 0.0004 \text{ eV}^{-1}$$

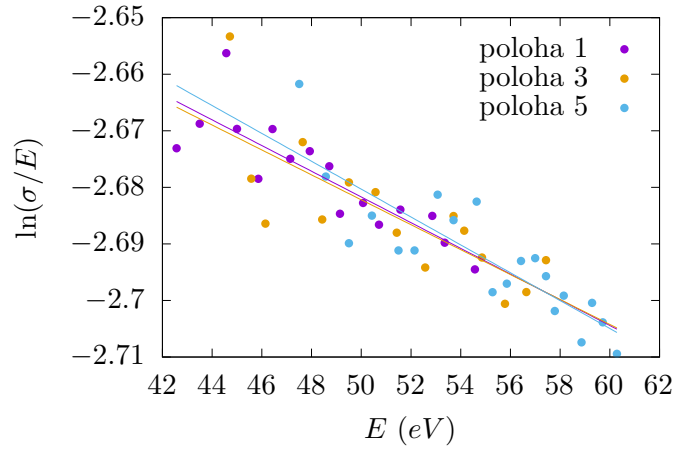
$$\mu_3 = 0.0022 \pm 0.0005 \text{ eV}^{-1}$$

$$\mu_5 = 0.0025 \pm 0.0004 \text{ eV}^{-1}$$

$$A_1 = 0.0767 \pm 0.0013 \text{ eV}^{-1}$$

$$A_3 = 0.0764 \pm 0.0019 \text{ eV}^{-1}$$

$$A_5 = 0.0775 \pm 0.0015 \text{ eV}^{-1}$$



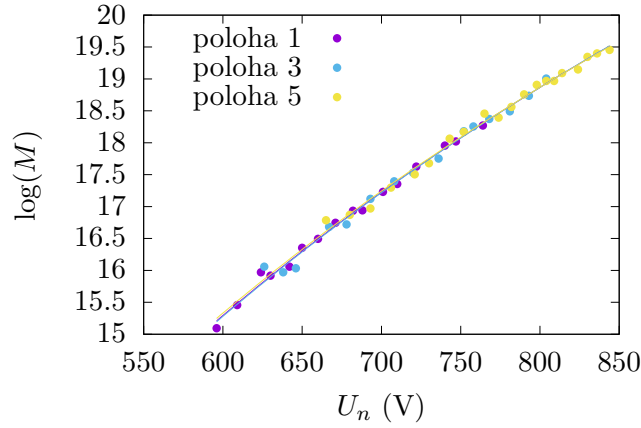
Graf 1: Závislost koeficientu emise na energii dopadajících elektronů.

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_9 μA	I_{11} μA	I_a μA	σ	$k \cdot 10^{-9}$ ALm^{-1}	U_n V	I_9 μA	I_{11} μA	I_a μA	σ	$k \cdot 10^{-9}$ ALm^{-1}	U_n V	I_9 μA	I_{11} 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
				3.32	17					3.50	16					3.71	12.5
				0.16	4					0.19	4					0.15	0.23

Tabulka 2: Změřené anodové a dynodové proudy při různých napětích na fotonásobiči.

Z Tabulky 2 je taky možné podle vztahu (6) vypočítat zesílení M a proložit ho závislostí vyjádřením ze vztahu (3). Z parametrů fitu vyjdou stejné hodnoty jako u grafu koeficientu emise, protože vychází ze stejných měření, takže uvádím jenom graf.

$$M = \left(A \frac{eU_n}{n} \right)^n \exp(-\mu eU_n) \quad (10)$$



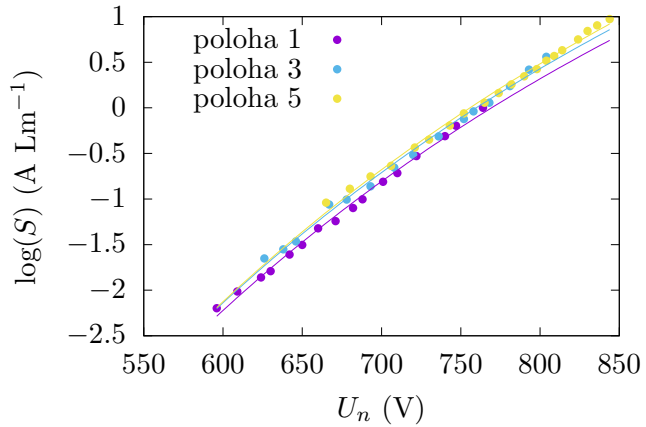
Obrázek 2: Závislost zesílení fotonásobiče na napětí U_n

Citlivost fotonásobiče S můžeme z tabulky (2) vypočítat podle vztahu (7) a měla by se řídit podobným vztahem (11). V tomto případě budeme fitovat kombinaci konstant kA^n a μ .

$$S = k \left(A \frac{eU_n}{n} \right)^n \exp(-\mu eU_n). \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \mu_1 &= 0.00743 \pm 0.00024 \text{ eV}^{-1} \\ \mu_3 &= 0.00730 \pm 0.00026 \text{ eV}^{-1} \\ \mu_5 &= 0.00709 \pm 0.00020 \text{ eV}^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} k_1 A_1^n &= 13.3 \pm 2.1 \cdot 10^{-23} \text{ ALm}^{-1} \text{eV}^{-n} \\ k_3 A_3^n &= 13.4 \pm 2.5 \cdot 10^{-23} \text{ ALm}^{-1} \text{eV}^{-n} \\ k_5 A_5^n &= 11.9 \pm 1.8 \cdot 10^{-23} \text{ ALm}^{-1} \text{eV}^{-n} \end{aligned}$$



Graf 2: Závislost citlivosti fotonásobiče na napětí U_n

4.3. Závislost koeficientu sekundární emise na osvětlení fotokatody

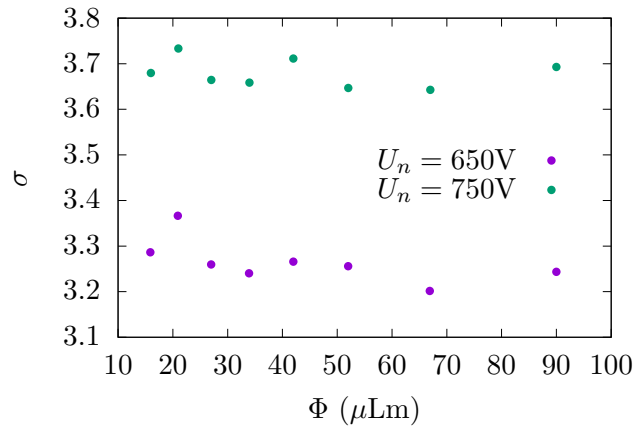
Tentokrát jsem nechal stálé napětí U_n a pohyboval s klínem pro regulaci osvětlení fotokatody. Naměřená data jsou uvedené v Tabulkách 3 a závislost koeficientu sekundární emise σ na osvětlení Φ je vykreslena do Grafu 4. Koeficient emise katody na osvětlení tolik nezávisí, takže jsem hodnoty statisticky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

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

		$U_n = 750 \text{ V}$				
klín	$\Phi \text{ (}\mu\text{Lm)}$	$I_9 \text{ (}\mu\text{A)}$	$I_{11} \text{ (}\mu\text{A)}$	$I_a \text{ (}\mu\text{A)}$	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

		$U_n = 650 \text{ V}$				
klín	$\Phi \text{ (}\mu\text{Lm)}$	$I_9 \text{ (}\mu\text{A)}$	$I_{11} \text{ (}\mu\text{A)}$	$I_a \text{ (}\mu\text{A)}$	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 konstantním napětí .



Graf 3: Závislost koeficientu sekundární emise na intenzitě osvětlení fotokatody

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_{11} z $I_{11} = I_a \sigma^{-2}$.

Reference

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