

FYZIKÁLNÍ PRAKTIKUM

Fyzikální praktikum 3

Zpracoval: Jan Beran

Naměřeno: 22. února 2018

Obor: UF

Skupina: F4210/04

Testováno:

Úloha . 1: Studium činnosti fotonásobiče

1. Úkoly

- Stanovte závislost koeficientu sekundární emise na energii elektronů dopadajících na dynodu. Vyneste do grafu i závislost $\ln \frac{\sigma}{V} = f(V)$. Zjistěte, jestli koeficient sekundární emise σ závisí na intenzitě osvětlení fotokatody.
- Stanovte a vyneste do grafu závislost integrální citlivosti fotonásobiče a zesílení fotonásobiče na napětí na násobiči $S = f(U_a)$ a $M = f(U_a)$.
- Stanovte integrální citlivost fotokatody $k = \frac{I_f}{\Phi}$
- Proveďte vliv temného proudu na přesnost měření.

2. Teorie

Fotonásobič je elektro-optický přístroj používaný pro proměrování velmi nízkých světelných intenzit. Jeho činnost je založena na dvou druzích elektronové emise – fotoemise a sekundární emise.

Fotoemise je jev, při kterém se z povrchu osvětleného tělesa emitují elektrony. To je zapříčiněno přeměnou energie světelného kvanta s energií $E = hf$, kde h je planckova konstanta a f je frekvence elektromagnetické vlny, na výstupní práci daného kovu a kinetickou energii elektronu. Elektron, která je takto emitován proletí fotokatody k anodě. Takovýto proud elektronů I_f se řídí rovnicí

$$I_f = k \cdot \Phi, \quad (1)$$

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

Sekundární emise je jev, který se uplatňuje přitom, kdy emitované elektrony (primární proud I_{prim}) dopadají na vhodnou elektrodu a tím uvolní další elektrony. Pakliže je energie primárních elektronů dostatečně velká, bude proud z elektrody (sekundární proud I_{sek}) větší než proud z fotokatody. Můžeme zavést koeficient sekundární emise jako

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

Tento koeficient závisí na urychlujícím se napětí V mezi sousedními dynodami jako

$$\sigma = A V e^{-\mu V} \quad (3)$$

kde A, μ jsou materiálové konstanty dynod.

V našem případě je napětí rozloženo mezi dynody rovnoměrně a proto musí platit

$$V = \frac{U_a}{n}. \quad (4)$$

kde U_a je celkové anodové napětí a n je počet dynod.

Vztahy (3) a (2) můžeme upravit do tvaru

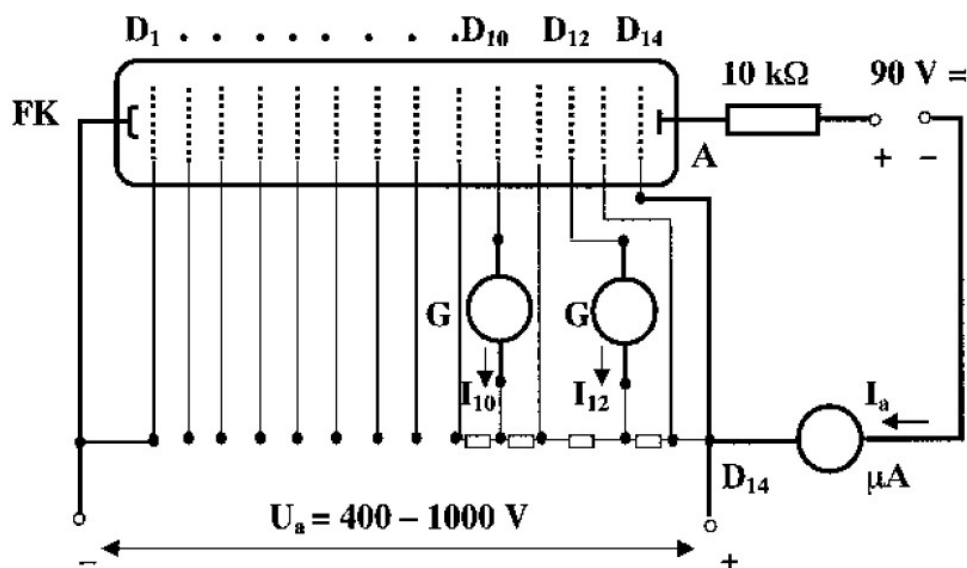
$$\ln \frac{\sigma}{V} = \ln A - \frac{\mu}{n} U_a \quad (5)$$

Celkový proud I_a je můžeme vyjádřit jako

$$I_a = MK\Phi = S\Phi, \quad (6)$$

kde S je integrální citlivost fotonásobiče.

I přesto, že fotokatodu neozařuje žádný zdroj světla, tak fotonásobič dává určitý proud. Tento proud se nazývá temný proud.



Obrázek 1: Schéma elektrického zapojení fotonásobiče. Napětí na násobiči U_a je rozděleno napěťovým děličem a je přivedeno na jednotlivé dynody. Při zapojování fotonásobiče do obvodu je třeba zapojit jen výrazně vyznačené spoje. Ostatní spoje jsou zapojeny trvale.

3. Postup

Zapojil jsem obvod podle schématu na obrázku 1. Nejdříve jsem měřil temný proud. Naměřené hodnoty jsou v tabulce 1. Jak je vidět, při napětí $U_a = 803$ V má temný proud hodnotu $0,09 \mu\text{A}$. V měření jsem dále měřil největší hodnotu napětí $U_a = 801$ V (viz tabulka 4), při které nejmenší hodnota proudu I_{12} dosahovala velikosti $1,51 \mu\text{A}$, dostal bych tak maximální relativní odchylku měření způsobenou temným proudem okolo 6 %, při největším proudu, tedy proudu $I_{12} = 9,03 \mu\text{A}$, by byla největší relativní odchylka okolo 1 %. Protože jsou tyto odchylky dosti malé, nebudu dále v protokolu započítávat odchylku způsobenou temným proudem.

Dále jsem změřil pro 3 různé světelné toky závislost veličin I_a , I_{10} a I_{12} na U_a . Dbal jsem na to, aby hodnota I_a nepřekročila $90 \mu\text{A}$.

Nakonec jsem naměřil pro tři různé hodnoty napětí závislost světelného toku Φ , na proudech I_a , I_{10} , I_{12} z čehož jsem dokázal zjistit, zda-li závisí koeficient sekundární emise σ na světelném toku dopadající na fotokatodu.

4. Naměřené hodnoty

Tabulka 1: Naměřené hodnoty temných proudů v závislosti na zvyšujícím se napětí.

| U_a [V] | I_a [μ A] | I_{10} [μ A] | I_{12} [μ A] |
|-----------|------------------|---------------------|---------------------|
| 407 | 0,0 | 0,00 | 0,02 |
| 505 | 0,0 | 0,00 | 0,03 |
| 600 | 0,0 | 0,00 | 0,04 |
| 701 | 0,0 | 0,00 | 0,06 |
| 803 | 0,0 | 0,00 | 0,09 |
| 902 | 0,5 | 0,00 | 0,16 |
| 1003 | 3,0 | 0,00 | 0,32 |

Tabulka 2: Naměřené hodnoty I_a , I_{10} , I_{12} v závislosti na měnících se světelných tocích pro $U_a = 669$ V.

| Φ | I_a [μ A] | I_{10} [μ A] | I_{12} [μ A] |
|--------|------------------|---------------------|---------------------|
| 0,90 | 16,0 | 0,17 | 2,12 |
| 0,68 | 13,0 | 0,14 | 1,71 |
| 0,52 | 10,5 | 0,11 | 1,38 |
| 0,42 | 7,0 | 0,08 | 1,00 |
| 0,34 | 5,0 | 0,06 | 0,72 |
| 0,27 | 4,0 | 0,04 | 0,57 |
| 0,21 | 3,0 | 0,03 | 0,46 |
| 0,16 | 2,0 | 0,03 | 0,41 |

Tabulka 3: Naměřené hodnoty I_a , I_{10} , I_{12} v závislosti na měnících se světelných tocích pro $U_a = 777$ V.

| Φ | I_a [μ A] | I_{10} [μ A] | I_{12} [μ A] |
|--------|------------------|---------------------|---------------------|
| 0,90 | 76,0 | 0,49 | 7,65 |
| 0,68 | 59,0 | 0,38 | 5,95 |
| 0,52 | 47,0 | 0,30 | 4,73 |
| 0,42 | 33,0 | 0,21 | 3,39 |
| 0,34 | 24,0 | 0,15 | 2,40 |
| 0,27 | 18,0 | 0,12 | 1,86 |
| 0,21 | 14,0 | 0,09 | 1,48 |
| 0,16 | 12,0 | 0,08 | 1,33 |

Tabulka 4: Naměřené hodnoty I_a, I_{10}, I_{12} v závislosti na měnících se světelných tocích pro $U_a = 801$ V.

| Φ | I_a [μ A] | I_{10} [μ A] | I_{12} [μ A] |
|--------|------------------|---------------------|---------------------|
| 0,90 | 89,0 | 0,55 | 9,03 |
| 0,68 | 70,0 | 0,42 | 6,96 |
| 0,52 | 56,0 | 0,34 | 5,55 |
| 0,42 | 40,0 | 0,24 | 3,94 |
| 0,34 | 27,0 | 0,17 | 2,75 |
| 0,27 | 21,0 | 0,13 | 2,13 |
| 0,21 | 16,0 | 0,10 | 1,70 |
| 0,16 | 14,0 | 0,09 | 1,51 |

Tabulka 5: Naměřené hodnoty U_a, I_a, I_{10} a I_{12} pro světelný tok $\Phi = 0,90 \cdot 10^{-4}$ [Lm].

| $\Phi = 0,90 \cdot 10^{-4}$ [Lm] | | | |
|----------------------------------|------------------|---------------------|---------------------|
| U_a [V] | I_a [μ A] | I_{10} [μ A] | I_{12} [μ A] |
| 604 | 5,5 | 0,08 | 0,89 |
| 650 | 14 | 0,14 | 1,46 |
| 670 | 19 | 0,18 | 2,22 |
| 690 | 25 | 0,21 | 2,88 |
| 704 | 32 | 0,25 | 3,44 |
| 719 | 38 | 0,29 | 4,06 |
| 732 | 45 | 0,32 | 4,68 |
| 741 | 50 | 0,35 | 5,18 |
| 750 | 56 | 0,38 | 5,68 |
| 760 | 63 | 0,41 | 6,30 |

Tabulka 6: Naměřené hodnoty U_a, I_a, I_{10} a I_{12} pro světelný tok $\Phi = 0,42 \cdot 10^{-4}$ [Lm].

| $\Phi = 0,42 \cdot 10^{-4}$ [Lm] | | | |
|----------------------------------|------------------|---------------------|---------------------|
| U_a [V] | I_a [μ A] | I_{10} [μ A] | I_{12} [μ A] |
| 605 | 3 | 0,04 | 0,89 |
| 650 | 6 | 0,07 | 1,46 |
| 670 | 8 | 0,18 | 2,22 |
| 690 | 10 | 0,21 | 2,88 |
| 730 | 18 | 0,25 | 3,44 |
| 750 | 23 | 0,29 | 4,06 |
| 773 | 31 | 0,32 | 4,68 |
| 799 | 42 | 0,35 | 5,18 |
| 814 | 51 | 0,38 | 5,68 |
| 826 | 59 | 0,41 | 6,30 |

Tabulka 7: Naměřené hodnoty U_a , I_a , I_{10} a I_{12} pro světelný tok $\Phi = 0,21 \cdot 10^{-4}$ [Lm].

| $\Phi = 0,21 \cdot 10^{-4}$ [Lm] | | | |
|----------------------------------|------------------|---------------------|---------------------|
| U_a [V] | I_a [μ A] | I_{10} [μ A] | I_{12} [μ A] |
| 635 | 2 | 0,02 | 0,39 |
| 711 | 6 | 0,05 | 0,79 |
| 755 | 10 | 0,07 | 1,15 |
| 804 | 17 | 0,10 | 1,73 |
| 822 | 21 | 0,11 | 2,03 |
| 850 | 29 | 0,14 | 2,63 |
| 872 | 35 | 0,15 | 3,14 |
| 885 | 41 | 0,18 | 3,63 |
| 897 | 48 | 0,19 | 4,08 |
| 915 | 58 | 0,22 | 4,74 |

5. Zpracování měření

Po výpočet jednotlivých veličin a koeficientů jsem použil následující vztahy.

$$\sigma = \sqrt{\frac{I_{12}}{I_{10}}} \quad (7)$$

$$V = \frac{U_a}{14} \quad (8)$$

$$M = \sigma^{14} \quad (9)$$

$$S = \frac{I_A}{\Phi} \quad (10)$$

$$k = \frac{S}{M} \quad (11)$$

Tabulka 8: Naměřené hodnoty U_a , I_a , I_{10} a I_{12} pro světelný tok $\Phi = 0,90 \cdot 10^{-4}$ [Lm].

| $\Phi_1 = 0,90 \cdot 10^{-4}$ [Lm] | | | | | | |
|------------------------------------|---------|-----------------|----------------|--------------------|------------------|-------------------------------|
| σ | V [V] | $\ln(\sigma/V)$ | M [10^7] | S [ALm $^{-1}$] | I_f [μ A] | k [10^{-9} ALm $^{-1}$] |
| 3,335 | 43,143 | -2,560 | 2,109 | 0,061 | 0,261 | 28,975 |
| 3,229 | 46,429 | -2,666 | 1,341 | 0,156 | 1,044 | 115,961 |
| 3,512 | 47,857 | -2,612 | 4,341 | 0,211 | 0,438 | 48,635 |
| 3,703 | 49,286 | -2,588 | 9,125 | 0,278 | 0,274 | 30,443 |
| 3,709 | 50,286 | -2,607 | 9,340 | 0,356 | 0,343 | 38,070 |
| 3,742 | 51,357 | -2,619 | 10,541 | 0,422 | 0,360 | 40,054 |
| 3,824 | 52,286 | -2,615 | 14,311 | 0,500 | 0,314 | 34,938 |
| 3,847 | 52,929 | -2,622 | 15,554 | 0,556 | 0,321 | 35,719 |
| 3,866 | 53,571 | -2,629 | 16,671 | 0,622 | 0,336 | 37,324 |
| 3,920 | 54,286 | -2,628 | 20,225 | 0,700 | 0,311 | 34,610 |

Tabulka 9: Naměřené hodnoty U_a , I_a , I_{10} a I_{12} pro světelný tok $\Phi = 0,42 \cdot 10^{-4}$ [Lm].

| $\Phi_2 = 0,42 \cdot 10^{-4}$ [Lm] | | | | | | |
|------------------------------------|---------|-----------------|----------------|---------------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| σ | V [V] | $\ln(\sigma/V)$ | M [10^7] | S [ALm^{-1}] | I_f [μA] | k [10^{-9}ALm^{-1}] |
| 4,717 | 43,214 | -2,215 | 269,967 | 0,071 | 0,001 | 0,265 |
| 4,567 | 46,429 | -2,319 | 171,705 | 0,143 | 0,003 | 0,832 |
| 3,512 | 47,857 | -2,612 | 4,341 | 0,190 | 0,184 | 43,881 |
| 3,703 | 49,286 | -2,588 | 9,125 | 0,238 | 0,110 | 26,094 |
| 3,709 | 52,143 | -2,643 | 9,340 | 0,429 | 0,193 | 45,887 |
| 3,742 | 53,571 | -2,661 | 10,541 | 0,548 | 0,218 | 51,950 |
| 3,824 | 55,214 | -2,670 | 14,311 | 0,738 | 0,217 | 51,575 |
| 3,847 | 57,071 | -2,697 | 15,554 | 1,000 | 0,270 | 64,294 |
| 3,866 | 58,143 | -2,711 | 16,671 | 1,214 | 0,306 | 72,840 |
| 3,920 | 59,000 | -2,711 | 20,225 | 1,405 | 0,292 | 69,455 |

Tabulka 10: Naměřené hodnoty U_a , I_a , I_{10} a I_{12} pro světelný tok $\Phi = 0,21 \cdot 10^{-4}$ [Lm].

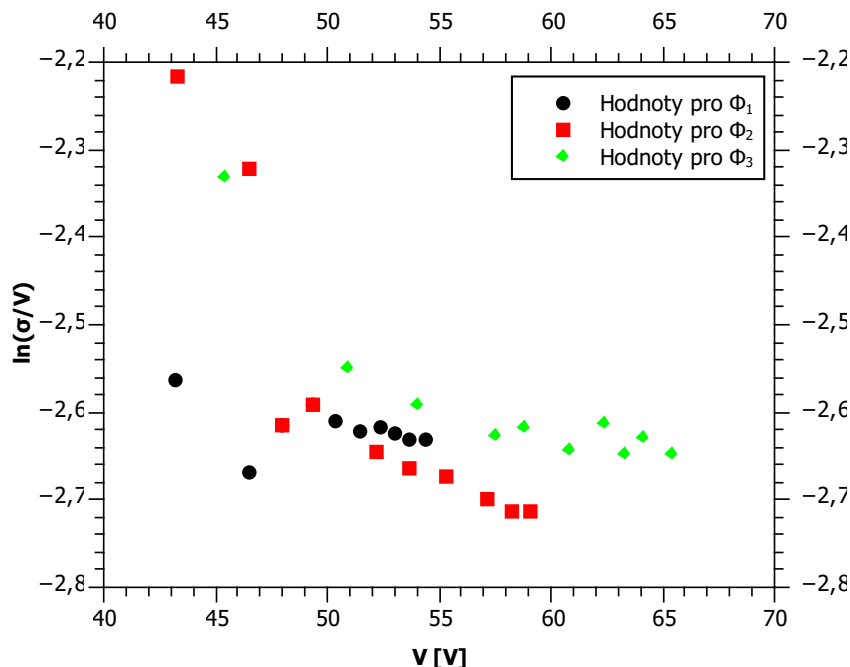
| $\Phi_3 = 0,21 \cdot 10^{-4}$ [Lm] | | | | | | |
|------------------------------------|---------|-----------------|----------------|---------------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| σ | V [V] | $\ln(\sigma/V)$ | M [10^7] | S [ALm^{-1}] | I_f [μA] | k [10^{-9}ALm^{-1}] |
| 4,416 | 45,357 | -2,329 | 107,212 | 0,095 | 0,002 | 0,888 |
| 3,975 | 50,786 | -2,548 | 24,581 | 0,286 | 0,024 | 11,623 |
| 4,053 | 53,929 | -2,588 | 32,300 | 0,476 | 0,031 | 14,743 |
| 4,159 | 57,429 | -2,625 | 46,379 | 0,810 | 0,037 | 17,454 |
| 4,296 | 58,714 | -2,615 | 72,899 | 1,000 | 0,029 | 13,718 |
| 4,334 | 60,714 | -2,640 | 82,565 | 1,381 | 0,035 | 16,726 |
| 4,575 | 62,286 | -2,611 | 176,144 | 1,667 | 0,020 | 9,462 |
| 4,491 | 63,214 | -2,645 | 135,656 | 1,952 | 0,030 | 14,392 |
| 4,634 | 64,071 | -2,627 | 210,545 | 2,286 | 0,023 | 10,856 |
| 4,642 | 65,357 | -2,645 | 215,521 | 2,762 | 0,027 | 12,815 |

Integrální citlivosti fotokatody k vypočítaný pro jednotlivé světelné toky.

$$k_{90} = (45 \pm 25) \cdot 10^{-9} \text{ ALm}^{-1} \quad (12)$$

$$k_{42} = (43 \pm 26) \cdot 10^{-9} \text{ ALm}^{-1} \quad (13)$$

$$k_{21} = (12 \pm 5) \cdot 10^{-9} \text{ ALm}^{-1} \quad (14)$$



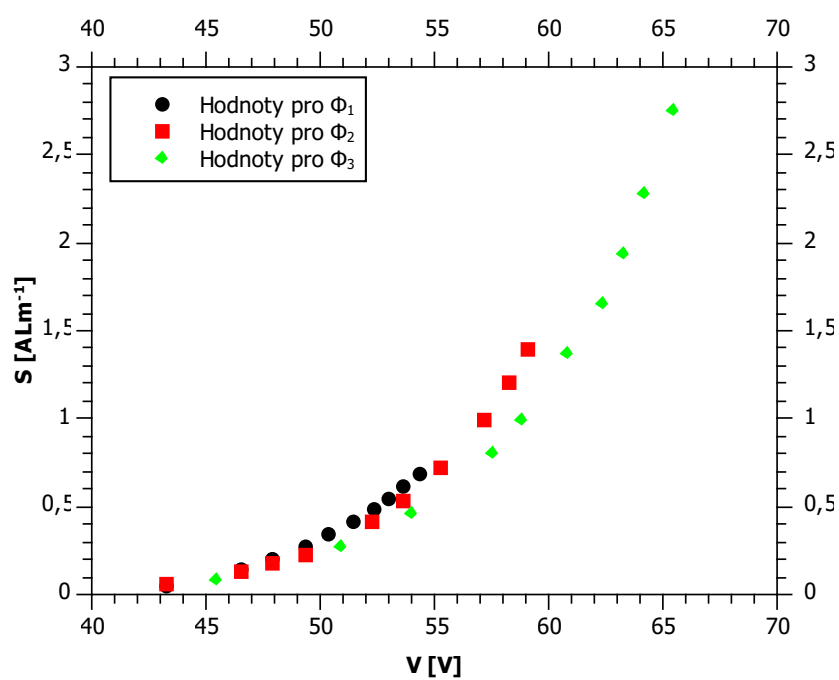
Obrázek 2: Závislost pro tři hodnoty světelných toků.

Na grafu 2 při zanedbání počátečního „šumu“, kdy prvních několik hodnot mohlo být zatíženo nějakou hrubou chybou, je vidět, že $\ln(\sigma/V)$ je nepřímo úměrné V .

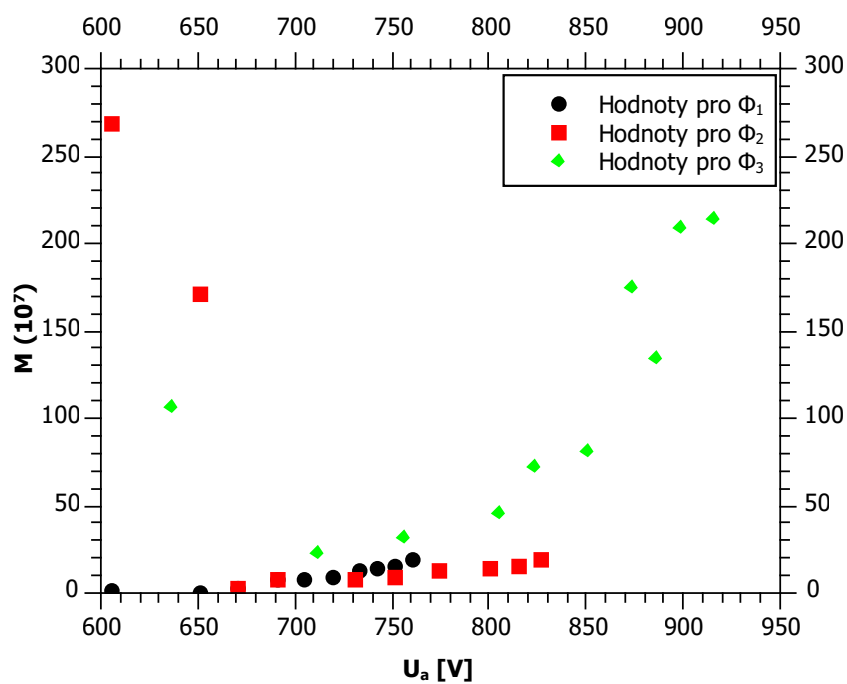
Na grafu 3 je viditelná jednoznačná exponenciální závislost mezi integrální citlivostí fotonásobiče S na urychlujícím napětí V .

Z grafu 4 je zřejmé exponenciální závislosti zesílení fotonásobiče M na anodovém napětí U_a pro tok Φ_3 , pakliže z měření odebereme první hodnotu, která je i pro ostatní případy zjevně v určitém počátečním pásmu „šumu“. V případě Φ_1 a Φ_2 můžeme vidět na grafu náběhovou část exponenciály nebo přímou úměrnost. K tomu by bylo nutno změřit další hodnoty.

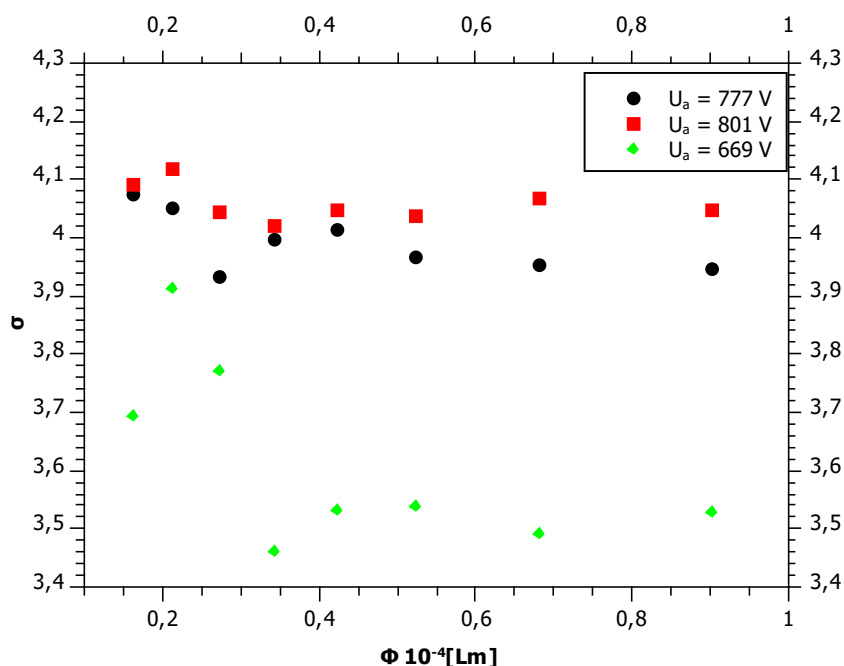
Na grafu 5 můžeme pro napětí $U_a = 777 \text{ V}$ a $U_a = 801 \text{ V}$ vidět konstantní průběh. Tedy, že koeficient sekundární emise nezávisí na světelném toku. Pakliže vynecháme první tři hodnoty u napětí $U_a = 669 \text{ V}$, můžeme podobný konstantní průběh vidět i při tomto napětí.



Obrázek 3: Závislost S na V pro tři hodnoty světelných toků.



Obrázek 4: Závislost M na U_a pro tři hodnoty světelných toků.



Obrázek 5: Závislost σ na Φ pro tři hodnoty napětí U_a .

6. Závěr

Nejdříve jsem provedl měření temného proudu a z hodnot v tabulce 1 vyhodnotil, že pakliže se nedostanu s měřením nad 900 V nemá smysl žádnou korekci na temný proud provádět. A protože jsem se v této úloze dostal s napětím pouze jedinkrát nad 900 V, žádnou korekci jsem neprováděl.

Dále jsem měřil závislost veličin I_a , I_{10} , I_{12} na U_a pro tři různé světelné toky. Naměřené hodnoty jsou v tabulkách 5, 6 a 7. Z těchto veličin jsem následně dopočítal σ , V , $\ln \sigma / V$, S , I_f , k , které jsou v tabulkách 8, 9, 10. Z každé tabulky jsem určil koeficient integrální citlivosti. To vyjadřují rovnice (12), (13) a (14). Už pouze z odchylek měření je vidět, že toto měření bylo zcela neprůkazné. Protože relativní odchylka u tohoto měření se pohybuje okolo 50 % a koeficient integrální citlivosti fotokatody pro světelný tok $\Phi = 0,21 \cdot 10^{-4} [Lm]$ je zcela odlišný než předchozí dva není možné z měření zjistit zcela nic, krom toho, že bylo z nějakého důvodu velmi nepřesné. Měl jsem dále vynést závislosti $\ln(\sigma / V)$ na V , která je na obrázku 2, závislost S na V , která je na obrázku 3 a závislost M na U_a , která je na obrázku 4.

Nakonec jsem ověřoval, jestli je koeficient sekundární emise σ nezávislý na světelném toku. Z grafu na obrázku 5 je zřejmé, že z mého měření lze potvrdit, že koeficient sekundární emise σ nezávisí na světelném toku, alespoň pro napětí $U_a = 777 V$ a $U_a = 801$. U napětí $U_a = 669$ je na začátku určitý šum, při jehož zanedbání má také konstantní průběh.