

FYZIKÁLNÍ PRAKTIKUM

Fyzikální praktikum 3

Zpracoval: Teodor Duraković

Naměřeno: 8. dubna 2025

Obor: F

Skupina: Út 14:00

Testováno:

Úloha č. 9: Měření činnosti fotonásobiče

1. Zadání

- Stanovte závislost koeficientu sekundární emise na energii elektronů dopadajících na dynodu. Vyneste do grafu i závislost $\ln(\sigma/V) = f(V)$. 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 $S = f(U_n)$ a $M = f(U_n)$.
- Stanovte integrální citlivost fotokatody $k = f(U_n)$.
- Proveďte vliv temného proudu na přesnost měření.

2. Teorie

Fotonásobič je vakuová elektrooptická součástka sloužící k detekci velmi slabých světelných signálů. Funguje na principu fotoemise a následného zesílení proudu pomocí sekundární emise elektronů na soustavě dynod. Jeho výstupní signál je úměrný dopadajícímu světelnému toku a použitým napětím, což jej činí mimořádně citlivým detektorem světla pro laboratorní i průmyslové aplikace.

2.1. Fotoemise

Při dopadu světla na fotokatodu dochází k uvolnění elektronů díky vnějšímu fotoefektu. Energie fotonů je přeměněna na kinetickou energii elektronu a překonání výstupní práce materiálu katody. Podle Einsteinova vztahu platí:

$$h\nu = w + \frac{1}{2}mv_0^2 \quad (1)$$

Pro minimální energii potřebnou k emisi elektronu pak definujeme červený práh fotoefektu:

$$h\nu_0 = w \quad (2)$$

Počet emitovaných elektronů je úměrný intenzitě dopadajícího světla za předpokladu neměnného spektrálního složení, což vystihuje Stoletovův zákon:

$$I_f = k \cdot \Phi \quad (3)$$

kde I_f je proud z fotokatody, Φ je světelný tok a k je integrální citlivost fotokatody.

2.2. Sekundární emise

Elektrony emitované z fotokatody jsou urychleny napětím a dopadají na první dynodu, kde vyvolávají sekundární emisi. Tento proces se opakuje na každé další dynodě. Koeficient sekundární emise σ je definován jako poměr proudu sekundárních elektronů k primárním:

$$\sigma = \frac{I_{\text{sek}}}{I_{\text{prim}}} \quad (4)$$

Závislost koeficientu sekundární emise na energii elektronů dopadajících na dynodu (tj. na napětí mezi dynodami V) je dána empirickým vztahem:

$$\sigma = A \cdot E \cdot \exp(-\mu E) \quad (5)$$

kde E je energie elektronů, A a μ jsou materiálové konstanty.

Předpokládáme-li rovnoměrné napětí mezi dynodami a stejný materiál všech dynod, lze koeficient sekundární emise σ určit z proudů měřených na deváté a jedenácté dynodě:

$$\sigma = \sqrt{\frac{I_{11}}{I_9}} \quad (6)$$

2.3. Zesílení a citlivost fotonásobiče

Výsledný anodový proud I_a je dán zesílením primárního proudu I_f z fotokatody. Za předpokladu, že všechny dynody mají stejný koeficient sekundární emise, platí:

$$I_a = \sigma^n \cdot I_f, \quad (7)$$

kde n je počet dynod (v této úloze $n = 13$). Zesílení fotonásobiče definujeme jako:

$$M = \frac{I_a}{I_f} = \sigma^n \quad (8)$$

Integrální citlivost fotonásobiče na dopadající světlo je:

$$S = \frac{I_a}{\Phi} = M \cdot k \quad (9)$$

Přepisem obou vztahů získáme:

$$I_a = M \cdot k \cdot \Phi = S \cdot \Phi \quad (10)$$

Pro přímou analýzu závislosti sekundární emise na napětí lze využít logaritmický přepis vzorce:

$$\ln\left(\frac{\sigma}{V}\right) = f(V) \quad (11)$$

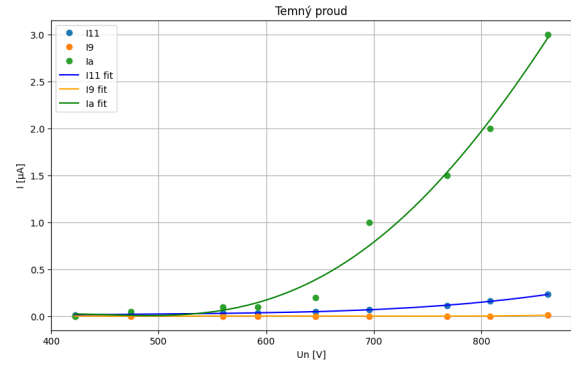
kde V je napětí mezi dvěma sousedními dynodami.

2.4. Temný proud

Fotonásobič vykazuje malý proud i bez dopadajícího světla, tzv. temný proud, způsobený především termoemisí. Tento proud je nutné při zpracování dat odečíst, zejména pokud je jeho velikost srovnatelná s měřenými hodnotami.

3. Měření

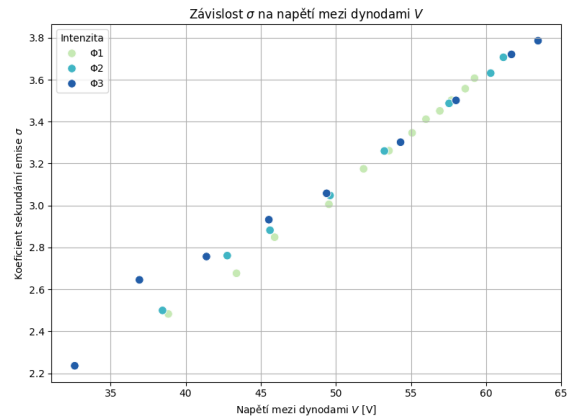
Nejprve stanovíme hodnotu temných proudů. Z měření závislosti proudů na napětí fotonásobiče získáváme data pro dynodové proudy i proud anody. Následně tato data fitujeme polynomm III. stupně pro získání spojitě závislosti temného proudu na napětí fotonásobiče. Výsledek lze pozorovat na Obr. 1.



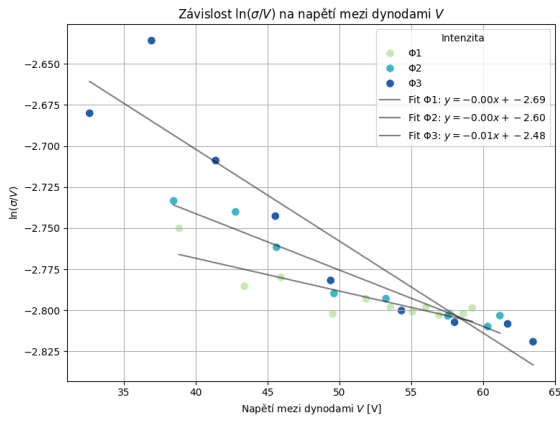
Obrázek 1: Závislost měřených temných proudů na napětí

Získané funkce temného proudu na napětí využíváme pro kompenzaci temného proudu u ostatních měřených dat. Kompenzace dává smysl zejména pro proud I_9 , tam totiž tvoří až třicet procent měřené hodnoty. U ostatních proudů se jedná o max. jednotky procent

Z měřené závislosti dynodových proudů na napětí mezi dynodami získáváme pomocí formule (6) koeficient sekundární emise. Následně analyzujeme závislost sekundární emise na napětí, získáváme data na obr. 2 a 3. Pozorujeme, že koeficient sekundární emise s napětím roste, což je očekávané.

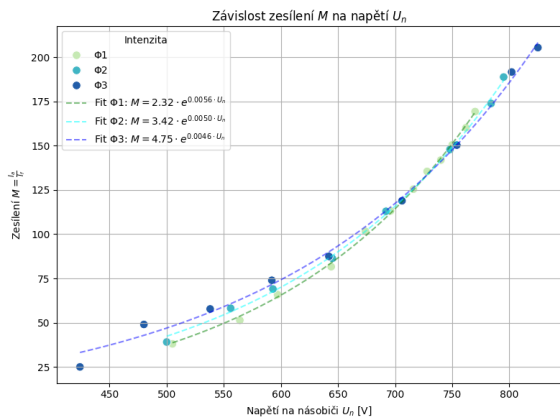


Obrázek 2: Závislost koeficientu sekundární emise na napětí mezi dynodami (energií elektronů), intenzita je úroveň zapuštění optického klínu, index s větším číslem znamená méně dopadajícího světla

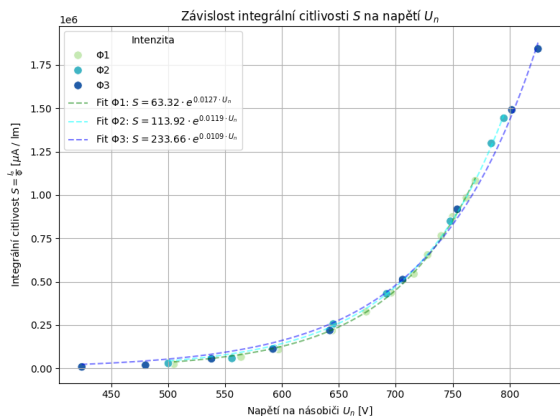


Obrázek 3: závislost logaritmu σ/V na napětí mezi dynodami V

Použitím formule (8), resp. (9) získáváme závislosti zesílení, resp. integrální citlivosti fotonásobiče na napětí. Výsledky lze pozorovat na obr. 4 a 5.



Obrázek 4: Závislost zesílení na napětí

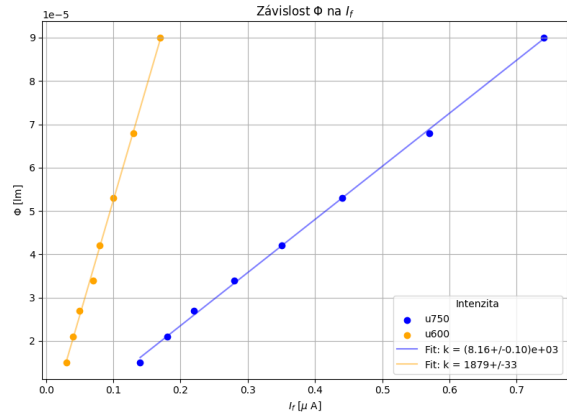


Obrázek 5: Závislost integrální citlivosti na napětí

Jelikož pro integrální citlivost a integrální citlivost fotokatody platí $S = I_a/\Phi$ a $k = I_f/\Phi$, musí platit $k \propto S$.

3.1. Integrální citlivost fotokatody

Pro měření závislosti proudů na proměnném světelném toku získáváme konstantu integrální citlivosti fotokatody pro napětí 600, 750V, jak lze pozorovat na obr. 6.



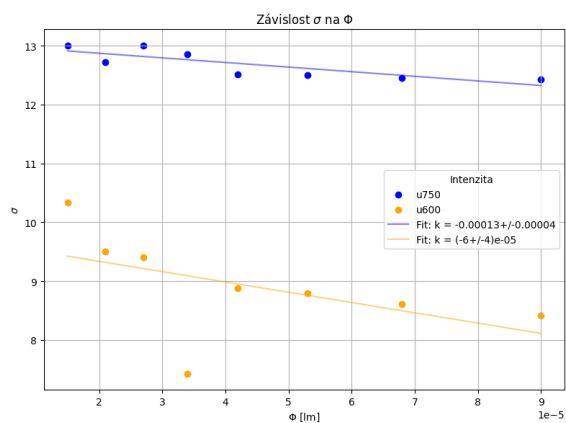
Obrázek 6: Závislost světelného toku na proudu fotokatody

$$k_{750} = 8200 \pm 100 \mu A \cdot \text{lm}^{-1}$$

$$k_{600} = 1880 \pm 30 \mu A \cdot \text{lm}^{-1}$$

3.2. Závislost σ na světelném toku

Při vykreslení závislosti koeficientu sekundární emise na světelném toku (Obr. 7) pozorujeme klesání hodnoty koeficientu při větším světelném toku. Tento výsledek není očekáván a získaná data ani nelze brát jako důkaz skutečného poklesu, tento výsledek může být ovlivněn větším příspěvkem temných proudů pro malé hodnoty Φ . I samotné odchylky směrnice fitované přímky dokazují, že je nejistota klesání poměrně vysoká.



Obrázek 7: Závislost σ na světelném toku

4. Závěr

Úspěšně se nám podařilo změřit parametry foto-násobiče. Přestože nemáme referenční data, se kterými lze naše výsledky srovnat, dosahují předpokládaných hodnot (zesílení i integrální citlivost s napětím skutečně rostou).