



evropský  
sociální  
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání  
pro konkurenceschopnost



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Ústav fyzikální elektrotechniky  
Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita, Brno

## Fyzikální praktikum 3

### Úloha 1. Studium činnosti fotonásobiče

#### Úkoly

1. Stanovte závislost koeficientu sekundární emise na napětí mezi dynodami. Vyneste do grafu závislost  $\ln(\sigma/V) = f(U_a)$ . Ověřte, že koeficient sekundární emise  $\sigma$  nezávisí na intenzitě osvětlení fotokatody.
2. Stanovte a vyneste do grafu závislost integrální citlivosti fotonásobiče a zesílení fotonásobiče na anodovém napětí  $S = f(U_a)$  a  $M = f(U_a)$ .
3. Stanovte integrální citlivost fotokatody  $k = I_f/\Phi$ .
4. Provéřte vliv temného proudu na přesnost měření.

#### Teorie

Fotonásobič je elektro-optický přístroj používaný pro proměňování velmi nízkých světelných intenzit (například optických spekter). Příkladem použití jsou scintilační detektory, regulace jasu a expozice u některých rentgenových přístrojů nebo citlivé měřiče osvětlení a světelného toku. Jeho činnost je založena na využití dvou druhů elektronové emise: fotoemise a sekundární emise.

#### Fotoemise

Fotoemise nebo také vnější fotoefekt je charakterizována emisí elektronů z povrchu osvětleného tělesa. Podstatou jevu je přeměna energie světelného kvanta na výstupní práci a kinetickou energii elektronu, který pak může uskutečnit elektrickou vodivost průletem od jedné elektrody k druhé. Pro vnější fotoefekt platí následující zákony:

1. Počet elektronů emitovaných za jednotku času je úměrný intenzitě dopadajícího světla, tj. počtu dopadajících fotonů. Takto formulovaný Stoletovův zákon platí za předpokladu, že při změně intenzity světla zůstane spektrální složení světla nezměněno.
2. Rychlost elektronů vystupujících z povrchu fotokatody na intenzitě světla nezávisí.
3. Počáteční rychlost elektronů  $v_0$  vystupujících z fotokatody roste se zvyšující se frekvencí dopadajícího záření podle Einsteinova zákona:

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

kde  $h\nu$  je energie kvanta monochromatického světla o kmitočtu  $\nu$  a  $w$  je efektivní výstupní práce elektronů z materiálu fotokatody.

Einsteinův zákon vede k představě tzv. červeného práhu fotoefektu. Vyberme-li takový nejnižší kmitočet dopadajícího světla  $\nu_0$ , že platí:

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

pak elektrony vystupují z katody s rychlostí  $v_0 = 0$ . Je-li efektivní výstupní práce  $w > h\nu$  nemožno z fotokatody vystoupit žádné elektrony, protože energie světelného kvanta je nedostatečná. Kmitočet  $\nu_0$  se nazývá červený práh fotoefektu, závisí na materiálu fotokatody. U většiny kovů leží v ultrafialové části spektra, jen u alkalických kovů spadá do viditelné části spektra.

Stoletovův zákon definuje počet emitovaných elektronů - velikost fotoproudu z fotokatody pod vlivem dopadajícího světelného toku s konstantním spektrálním složením

$$I_f = k(\lambda)\Phi. \quad (3)$$

Konstanta úměrnosti  $k(\lambda)$  ve Stoletovově zákonu závisí na vlnové délce dopadajícího světla. V uvedeném vztahu je  $I_f$  primární proud elektronů z fotokatody a  $\Phi$  je světelný tok dopadající na fotokatodu. Závislost  $k(\lambda) = f(\lambda)$  se nazývá spektrální charakteristika fotokatody.

### Sekundární emise

Dopadem urychlených elektronů s dostatečnou energií na vhodnou elektrodu (s energií vyšší jak výstupní práce materiálu elektrody), se z této elektrody mohou uvolnit nové elektrony. Mezi tyto tzv. sekundární elektrony zahrnujeme jak elektrony pouze odražené od povrchu, tak i nově uvolněné elektrony. Je-li energie primárních (dopadajících) elektronů dostatečně velká (několikanásobek výstupní práce materiálu elektrody), může počet sekundárních elektronů převýšit počet elektronů primárních. Poměr proudu sekundárních elektronů  $I_{sek}$  a proudu primárních elektronů  $I_{prim}$  se nazývá koeficientem sekundární emise  $\sigma$  a platí tedy:

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

a jeho velikost závisí na materiálu elektrod a na urychlujícím napětí podle vztahu:

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

kde  $A$  a  $\mu$  jsou konstanty závislé na materiálu elektrod (tzv. dynod),  $V$  je napětí mezi dvěma sousedními dynodami.

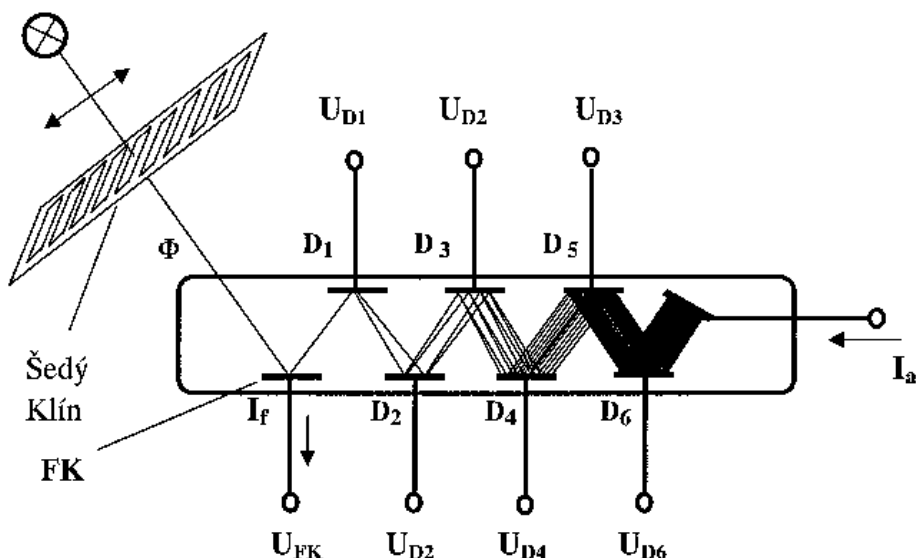
### Princip činnosti fotonásobiče

Zjednodušené, základní schéma fotonásobiče je na Obr. 1, jeho hlavní součásti jsou fotokatoda  $FK$ , řada dynod  $D_i$  a anoda  $A$ . Napětí přivedené na jednotlivé elektrody je voleno tak, že postupně roste od katody přes jednotlivé dynody až k anodě.

Fotoelektrony emitované z fotokatody, například bílým světlem, dopadají na první dynodu, když jsou urychleny jejím potenciálem na dostatečnou energii. Na první dynodě dojde k sekundární emisi, takže ji opouští celkem  $I_1 = \sigma I_f$  elektronů. Tyto sekundární elektrony první dynody se stávají primárními elektrony druhé dynody, kde se děj opakuje. Tvar dynod a rozložení potenciálu kolem nich je takové, že téměř všechny elektrony, které opouští  $n$ -tou dynodu jsou urychleny polem  $n+1$  dynody a na tuto dynodu dopadají. Elektrony z poslední dynody pak dopadají na anodu.

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:

$$I_f = k \cdot \Phi, \quad (6)$$



Obrázek 1: Fotonásobič se šesti dynodami a koeficientem sekundární emise  $\sigma = 2$ .  $\Phi$  je světelný tok, FK je fotokatoda,  $D_1 \sim D_6$  jsou jednotlivé dynody, A je anoda. Pro potenciály elektrod platí  $U_A > U_{D6} > \dots > U_{D1} > U_{FK}$ .

kde konstanta úměrnosti  $k$  odpovídá citlivosti fotokatody na bílé světlo obsahující fotony všech vlnových délek a proto se nazývá integrální citlivostí fotokatody. Nedochází-li v násobiči k žádným ztrátám elektronů, pak výsledný proud anody je dán vztahem:

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

kde  $n$  je počet dynod. Zesílení  $M$  fotonásobiče je pak dáno poměrem anodového proudu a fotoproudu podle vztahu:

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

Vzájemným dosazením uvedených výrazů dostaneme vztahy mezi zesílením, světelným tokem a výsledným anodovým proudem:

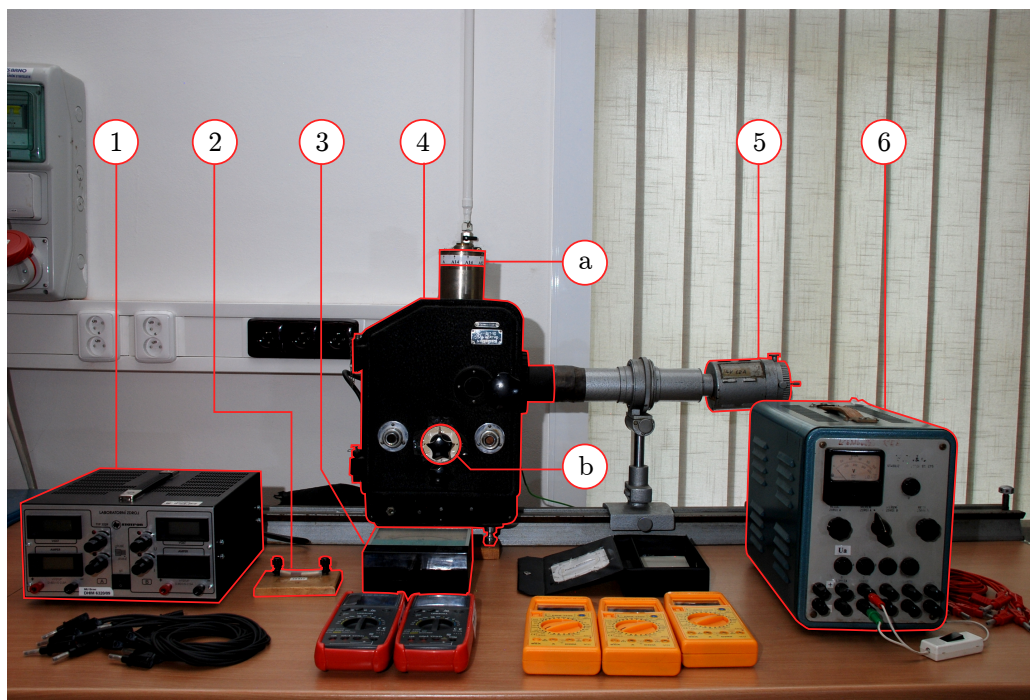
$$I_a = Mk \Phi = S \Phi, \quad S = Mk, \quad (9)$$

kde  $S$  je integrální citlivost fotonásobiče (citlivost na bílé světlo obsahující fotony všech vlnových délek),  $k$  je zmíněná integrální citlivost fotokatody. Závislost zesílení na anodovém napětí  $M = f_1(U_a)$  a závislost integrální citlivosti na anodovém napětí  $S = f_2(U_a)$  charakterizují vlastnosti fotonásobiče.

Fotonásobič dává určitý nežádoucí proud i bez osvětlení - tzv. temný proud. Vzniká hlavně termoemisí z fotokatody a lze jej ochlazením fotokatody potlačit. Zpravidla je nutno tento temný proud při použití fotonásobiče respektovat a příslušné veličiny (proudy fotokatody, dynodami a anodou) na tento temný proud opravit.

## Postup měření

Na Obr. 3 je znázorněno celé zapojení fotonásobiče. Veškerá měření provedeme v tomto zapojení. Počet dynod je 14. Část dynod je zapojena trvale, pouze mezi napěťovým děličem a 10. a 12. dynodou jsou zařazeny citlivé mikroampérmetry na měření proudu dynodami (určení koeficientu



Obrázek 2: Aparatura pro měření úlohy: (1) Zdroj anodového proudu  $I_a$ . (2) Ochranný odpor. (3) Mikroampérmetr pro měření anodového proudu. (4) Komora fotonásobiče: a) Patice pro elektrické zapojení fotonásobiče. b) Otočný šroub šedého klínu. (5) Zdroj světla. (6) Zdroj vysokého napětí  $U_a$ .

sekundární emise). Vysokonapěťový stejnosměrný zdroj dodává proměnné napětí 400 – 600 V na napěťový dělič mezi fotokatodu a 14. dynodu. Mezi anodou a 14. dynodou je zařazen ochranný odpor, mikroampérmetr s rozsahem  $100 \mu\text{A}$  a urychlující stejnosměrný zdroj 90 V s polaritou + obrácenou směrem k anodě.

Osvětlení fotokatody je třeba provádět velmi pozorně, aby nedošlo k jejímu poškození. Světelný tok lze řízeně měnit šedým klínem, umístěným před vstupem světla na fotokatodu. Popis ovládání šedého klínu je k úloze připojen včetně přiloženého grafu z kterého lze odečítat hodnoty světelného toku  $\Phi$ .

Poškození citlivé vrstvy fotokatody může nastat při příliš silném osvětlení, kdy fotokatoda ztrácí trvale svoji citlivost. Při připojeném napětí  $U_a$  mezi fotokatodou a anodou, nesmí být fotokatoda vystavena dennímu světlu v žádném případě.

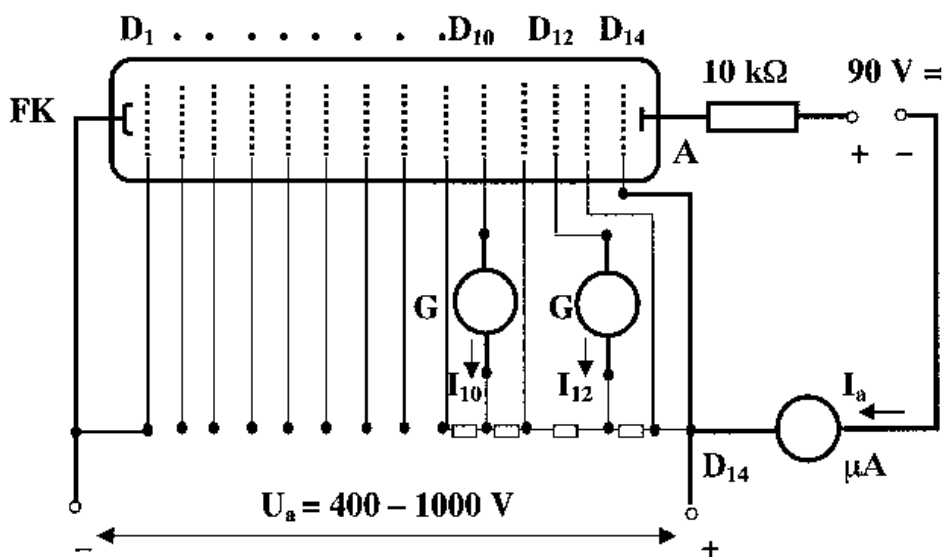
Pro 3 různé hodnoty světelného toku  $\Phi \neq 0$  a pro 4. hodnotu  $\Phi = 0$  změřte závislost anodového proudu  $I_a$  a proudu desátou ( $I_{10}$ ) a dvanáctou ( $I_{12}$ ) dynodou na anodovém napětí  $U_a$ .

Ověření nezávislosti koeficientu sekundární emise  $\sigma$  na intenzitě osvětlení fotokatody proveďte tak, že pro konstantní anodové napětí ( $U_a = 650 - 700 \text{ V}$ ) budete měřit pro všech 7 různých světelných toků  $\Phi_1, \dots, \Phi_7$ , proudy desátou a dvanáctou dynodou  $I_{10}$  a  $I_{12}$ .

Předpokládáme-li, že dynody v násobiči jsou z téhož materiálu a že napětí mezi dvěma sousedními dynodami jsou stejná, lze koeficient sekundární emise určit z proudů  $I_{10}$  a  $I_{12}$  pomocí vztahu:

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

Budeme-li vycházet z platnosti zmíněných předpokladů a ze vztahu pro anodový proud  $I_a = \sigma^n \cdot I_f$  můžeme určit proud fotokatody  $I_f$ . Postup plnění zbývajících úkolů je zřejmý. V následující tabulce jsou uvedeny názvy naměřených a vypočtených veličin pro jednu hodnotu světelného toku, který dopadá na fotokatodu fotonásobiče. Tabulka by měla obsahovat asi 8-10 řádků naměřených a vypočtených veličin.



Obrázek 3: Schéma elektrického zapojení fotonásobiče. Anodové napětí  $U_a$  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.

Klín č. 1: $\Phi = 0.9 \cdot 10^{-4}$ (Lm)										
$U_a$ (V)	$I_a$ ( $\mu$ A)	$I_{10}$ ( $\mu$ A)	$I_{12}$ ( $\mu$ A)	$\sigma$	$V = \frac{U_a}{14}$ (V)	$\ln(\sigma/V)$	M	S (A Lm $^{-1}$ )	$I_f$ (A)	k (A Lm $^{-1}$ )
atd.										

Tabulka 1: Naměřené a vypočtené hodnoty pro světelný tok:  $\Phi = 0.9 \cdot 10^{-4}$  (Lm)

Během měření, při němž měníme anodové napětí, je výhodné postupovat tak, že napětí zvyšujeme po takových krocích, aby anodový proud  $I_a$  rostl přibližně o stejnou hodnotu, nejlépe od nuly po 10  $\mu$ A do 90 – 100  $\mu$ A. Podle velikosti temného proudu na dynodách  $I_{10}, I_{12}$  a na anodě  $I_a$ , při nulovém světelném toku na fotokatodu  $\Phi = 0$ , rozhodneme zda budeme provádět opravu při vyhodnocování měření s nenulovým světelným tokem ( $\Phi \neq 0$ ).

**Anodový proud  $I_a$  použitého fotonásobiče nesmí přesáhnout 100  $\mu$ A. Při vyšších proudech může dojít ke zničení anody.**

## Literatura

- [1] Chudoba T. a kol.: Fyzikální praktikum III. , skriptá Přír. fak. UJEP v Brně (MU v Brně), SPN Praha 1986.
- [2] Čečík, Fajňštejn, Lifšic: Elektronnyje umnožiteli, Moskva 1954.
- [3] Ondráček Z. : Elektronika pro fyziky, Skriptum Přír. fak. MU, Brno 1998