

Úloha 1

Studium fotoefektu a stanovení Planckovy konstanty

1.1 Úkol měření

1. Na základě měření vnějšího fotoelektrického jevu stanovte velikost Planckovy konstanty h .
2. Určete mezní kmitočet a výstupní práci materiálu fotokatody použité fotonky. Porovnejte tuto hodnotu s výstupními pracemi jiných materiálů a odhadněte, z jakého materiálu je tato fotokatoda vyrobena.
3. Určete chybu měření pro všechny tři veličiny určené v bodech 1 a 2.
4. Vypracujte graf závislosti maximální kinetické energie elektronu na frekvenci záření $W_k = f(\nu)$.
5. Změřte závislost fotoelektrického proudu na velikosti brzdícího potenciálu pro tři vlnové délky.
6. Vypracujte graf změřené závislosti fotoelektrického proudu na velikosti brzdícího potenciálu.
7. Porovnejte hodnotu změřené Planckovy konstanty s tabulkovou hodnotou a rozdíl zhodnoťte.
8. Měření a zpracování dat v bodech 1-7 proveďte zvlášť pro obě instalované měřicí aparatury.

1.2 Obecná část

Vysvětlení fotoelektrického jevu patří k velkým úspěchům z období počátků kvantové fyziky. Pro výklad fotoefektu je nutná představa elektromagnetické vlny jako proudu fotonů, tvořících energetická kvanta. Fotoefekt nelze vysvětlit na základě spojitého šíření energie elektromagnetických vln, které vyplývá z klasické fyziky. Znamý německý fyzik Albert Einstein publikoval teorii pro fotoefekt v kovu v roce 1905. Za vysvětlení fotoefektu obdržel v roce 1921 Nobelovu cenu.

Elektromagnetické záření (proud fotonů) předává při dopadu na kovy svou energii elektronům v kovu. Energie fotonu je dána součinem jeho frekvence ν a Planckovy konstanty $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ J.s. Je-li elektron zasažen fotonem, je mu předána právě tato energie. Pokud je takto získaná energie větší než tzv. výstupní práce, vyletují elektrony z ozařovaného kovu a dochází k fotoemisi. Umístíme-li proti ozařovanému kovu sběrnou elektrodu, mohou emitované elektrony na tuto elektrodu dopadat a případně vytvářet proud ve vnějším elektrickém obvodu. Minimální energie fotonu, potřebná k vyvolání fotoemise, je rovna výstupní práci A . Má-li foton větší energii, projeví se to ve větší rychlosti (kinetické energii) emitovaných elektronů. Tyto úvahy jsou shrnuty v Einsteinově rovnici pro fotoefekt

$$h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + A. \quad (1.1)$$

Energie $h\nu$, která je fotonem předána elektronu, se rozdělí na:

- kinetickou energii elektronu $\frac{1}{2}mv^2$, kde m je hmotnost elektronu a v rychlost elektronu,
- výstupní práci A , což je energie, kterou potřebují elektrony k tomu, aby překonaly potenciálovou bariéru na povrchu kovu.

Nejmenší kmitočet, při kterém ještě dochází k fotoefektu, se nazývá *prahový kmitočet*. Odpovídající největší vlnovou délku nazýváme *mezní vlnová délka fotoelektrického jevu* λ_m . Pro většinu kovů leží v ultrafialové oblasti, pouze pro alkalické kovy leží v oblasti viditelného záření. Hodnoty pro tyto kovy jsou uvedeny v tabulce 1.1.

značka	prvek	A [eV]	λ_m [nm]
Cs	cesium	1,93	642
Rb	rubidium	2,13	582
K	draslík	2,24	554
Na	sodík	2,28	544
Li	lithium	2,36	525
Ba	baryum	2,52	492
Ce	cer	2,84	437
Ca	vápník	2,96	419

Tabulka 1.1: Výstupní práce elektronů z kovů, mezní vlnové délky fotoelektrického jevu.

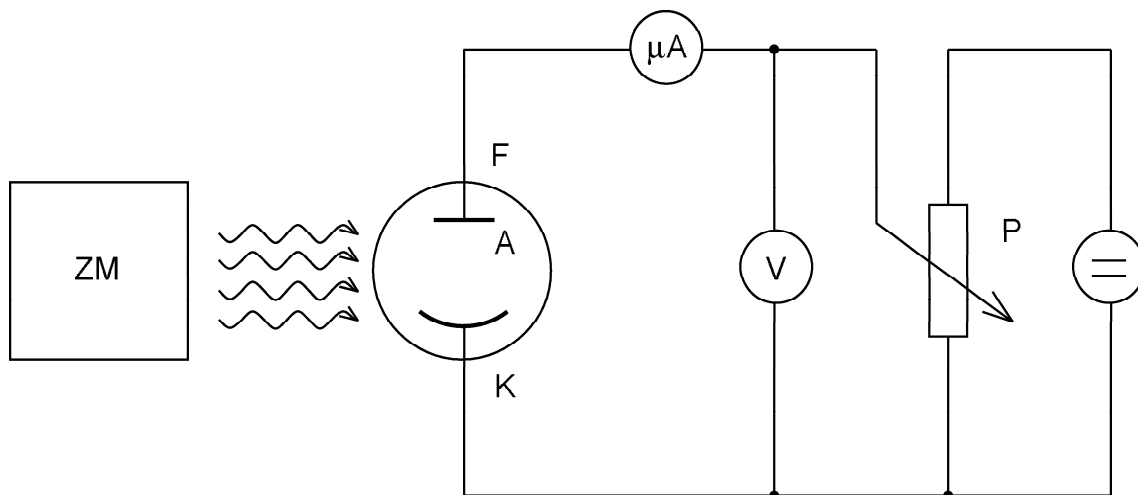
1.2.1 Vnější a vnitřní fotoefekt

Vnějšího fotoelektrického jevu je využito ve fotonkách. Fotonka je tvořena skleněnou baňkou, která má část vnitřní plochy pokrytou tenkou vrstvou kovu. Tato vrstva tvoří jednu elektrodu - fotokatodu. Sběrná elektroda - anoda - je vytvořena tenkým drátem zpravidla ve tvaru smyčky v prostoru skleněné baňky. Vnitřní prostor baňky je buď vyčerpán nebo plněn inertním plynem při velmi nízkém tlaku. Při vnějším fotoelektrickém jevu dochází

k uvolňování elektronů do okolního prostoru. Naproti tomu při vnitřním fotoelektrickém jevu dochází k uvolňování elektronů jen uvnitř látky, což zvyšuje její elektrickou vodivost. Vnitřní fotoefekt nastává u polovodičů (selen, telur, oxid měďný, galium arsenid GaAs). Využívá se např. ve fotoelektrických měničích energie (osvitoměry¹, sluneční baterie) a ve fotorezistorech.

1.3 Stanovení Planckovy konstanty

Princip metody měření Planckovy konstanty je na obr. 1.1. Monochromatické světlo známé vlnové délky λ ze zdroje ZM dopadá na fotonku F , která je zapojena v obvodu podle obrázku. Obvod umožňuje měření proudu fotonkou a přiložení nastavitelného napětí U_p mezi její elektrody.



Obrázek 1.1: Princip měřícího zařízení. ZM zdroj monochromatického světla, F fotonka, V voltmetr, μA mikroampérmetr, P potenciometr.

Podmínky experimentu umožňují vznik fotoemise, popsané rovnicí (1.1). Pro stanovení h z této rovnice však potřebujeme znát ještě výstupní práci A a kinetickou energii emitovaných elektronů W_k :

$$W_k = \frac{1}{2}mv^2. \quad (1.2)$$

Kinetickou energii W_k můžeme vykompenzovat (vynulovat) tím, že vytvoříme ve fotonce elektrické pole, které emitované elektrony zabrzdí a tedy elektrický proud procházející fotonkou bude nulový. Ve vykompenzovaném stavu platí, že kinetická energie elektronů je rovna potenciální energii, která je zabrzdila, tedy

$$W_k = \frac{1}{2}mv^2 = eU_p, \quad (1.3)$$

kde U_p je napětí (rozdíl potenciálů), při němž došlo k vykompenzování. Toto napětí měříme, takže veličina W_k je tímto způsobem určena. Pro stanovení h to však nestačí, neboť nevíme, z jakého materiálu je vrstva ve fotonce zhotovena (jaká je jeho výstupní práce

¹expozimetry

A). Můžeme však provést kompenzaci kinetické energie emitovaných elektronů opakovaně pro různé vlnové délky λ_i dopadajícího světla. Dostaneme tak údaje, vyplňující soustavu rovnic:

$$\begin{aligned} h\nu_1 &= A + eU_{p1}, \\ h\nu_2 &= A + eU_{p2}, \\ &\vdots \\ h\nu_n &= A + eU_{pn}, \end{aligned} \tag{1.4}$$

kde $\nu_i = c/\lambda_i$ a $c = 2,998.10^8$ m.s⁻¹ je rychlost světla ve vakuu.

Z této soustavy rovnic můžeme již určit hledanou Planckovu konstantu h a výstupní práci A . K jejich výpočtu je třeba využít všechny naměřené hodnoty. Protože se jedná o soustavu většího počtu lineárních rovnic než je neznámých, je zřejmé, že nelze nalézt jejich přesné řešení. Je třeba použít vhodnou přibližnou metodu (například metodu nejmenších čtverců, popsanou v odstavci 1.3.1 a odstavci 1.6.5 v první části skript).

1.3.1 Zpracování pomocí metody nejmenších čtverců

Z výše uvedené teorie je zřejmé, že kinetická energie elektronů W_k závisí lineárně na frekvenci dopadajícího záření ν . Je tedy nutné soustavou naměřených bodů proložit přímkou o rovnici

$$W_k = eU_p = h^*\nu - A^*. \tag{1.5}$$

K tomuto je vhodná *metoda nejmenších čtverců* [2]. Tato metoda proloží body přímkou tak, že součet čtverců vzdáleností jednotlivých bodů od přímky je minimální. Parametry přímky (1.5) jsou dány vztahy:

$$h^* = \frac{n \sum_{i=1}^n \nu_i eU_{pi} - \left(\sum_{i=1}^n \nu_i \right) \left(\sum_{i=1}^n eU_{pi} \right)}{n \sum_{i=1}^n (\nu_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n \nu_i \right)^2}, \tag{1.6}$$

$$A^* = -\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n eU_{pi} + h^* \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \nu_i. \tag{1.7}$$

h^* a A^* představují aproximaci h a A získanou pomocí popsané metody. Pravděpodobnou chybu h^* a A^* určíme na základě směrodatných odchylek uvedených v odstavci 1.6.5 na straně 20².

1.4 Postup měření

Pro měření Planckovy konstanty podle popsané metody jsou v laboratoři k dispozici dva rozdílné typy měřících souprav.

²Při použití vztahů z odstavce 1.6.5 je třeba vzít v úvahu, že parametr přímky A^* má opačné znaménko.

1.4.1 Souprava se spektrálním fotometrem Spekol

Charakteristika soupravy:

- jako zdroj monochromatického světla ZM je použit mřížkový monochromátor Spekolu;
- fotonka osazená ve Spekolu je plněná plynem, což zkresluje výsledky měření;³
- pro měření proudu fotonkou je využit vnitřní zesilovač Spekolu s ručkovým měřidlem na výstupu;
- zdroj napětí U_p je součástí přiloženého přípravku.

Podrobný návod k měření pomocí spektrálního fotometru Spekol je uveden v dodatku G na straně 182.

1.4.2 Souprava s výbojkou a monochromatickými filtry

Charakteristika soupravy: Jako zdroj monochromatického světla ZM je použita rtuťová výbojka a sada monochromatických filtrů, umístěných na karuselu mezi výbojkou a fotonkou. Vlnové délky filtrů jsou uvedeny na karuselu a odpovídají některým čarám spektra rtuťové výbojky. Výbojka je umístěna v lampové skříni s výstupní optikou, umožňující optimální koncentraci světla výbojky na katodu fotonky a je napájena přes tlumivku ze sítě 220 V. Elektrický obvod fotonky je variantou obvodu z obr. 1.1 a na přípravku je názorně nakreslen. Proud tekoucí fotonkou (řádově 10^{-8} A) je zde pomocí vestavěného elektronického převodníku přeměněn na napětí, které se měří voltmetrem. Nulu převodníku je třeba kontrolovat při zacloněné fotonce (k tomu je určena jedna pozice na karuselu) a nelze ji na rozdíl od Spekolu nastavit. Kompenzace nuly se provede tím, že budeme při měření považovat proud tekoucí fotonkou za nulový tehdy, bude-li údaj voltmetru na výstupu převodníku shodný s hodnotou, kterou jsme obdrželi při zacloněné fotonce. Souprava je osazena vakuovou fotonkou určenou speciálně pro měření Planckovy konstanty. Použití takové fotonky je umožněno dostatečnou intenzitou monochromatického světla, poskytovaného pomocí výbojky a filtrů.

1.5 Kontrolní otázky

1. Jak se na přístrojích soustavy projeví skutečnost, že došlo k vykompenzování W_k ?
2. Jak dosáhneme odstranění brzdného elektrického pole vnuceného fotonce bez rozpojování úlohy?

³Fotonka osazená ve Spekolu je určena pro měření optické propustnosti při malých intenzitách světla, poskytovaných monochromátorem Spekolu. Pro dosažení vyšší citlivosti v původním pracovním režimu vlastního Spekolu (s kladným urychlujícím napětím na anodě) je tato fotonka plněná plynem. Při měření Planckovy konstanty (bez urychlovacího napětí) vzniká zde systematická chyba měření tím, že kinetická energie emitovaných elektronů se sníží srážkami s molekulami plynu. Kinetická energie emitovaných elektronů, naměřená pomocí brzdného potenciálu U_p , je však menší než kinetická energie bezprostředně po emisi a její závislost na kmitočtu dopadajícího záření není přesně lineární. Vypočtená hodnota h je proto vždy nižší, než skutečná.

3. Jaký průběh má mít teoreticky závislost $W_k = f(\nu)$?
4. Který parametr křivky, popisující závislost $W_k = f(\nu)$, je úměrný Planckově konstantě?
5. Kde lze na grafu $W_k = f(\nu)$ vyznačit prahovou frekvenci fotoefektu?

1.6 Seznam použitých přístrojů

Přístroj Spekol, měřící přípravek, rtuťová výbojka, voltmetr, milivoltmetr a optická lavice.

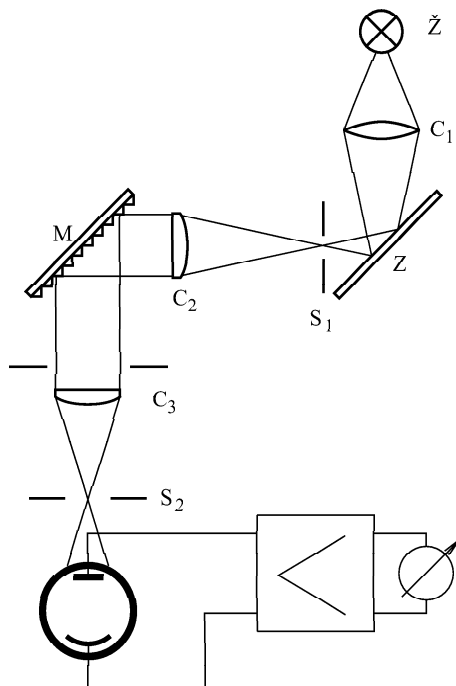
1.7 Literatura

- [1] Lego, J., Jelen, J.: Fyzika II. Praha, skriptum FEL ČVUT 1991.
- [2] Rektorys, K. a spolupracovníci: Přehled užití matematiky. Praha, SNTL, 1981.

Dodatek G

Spektrální fotometr Spekol

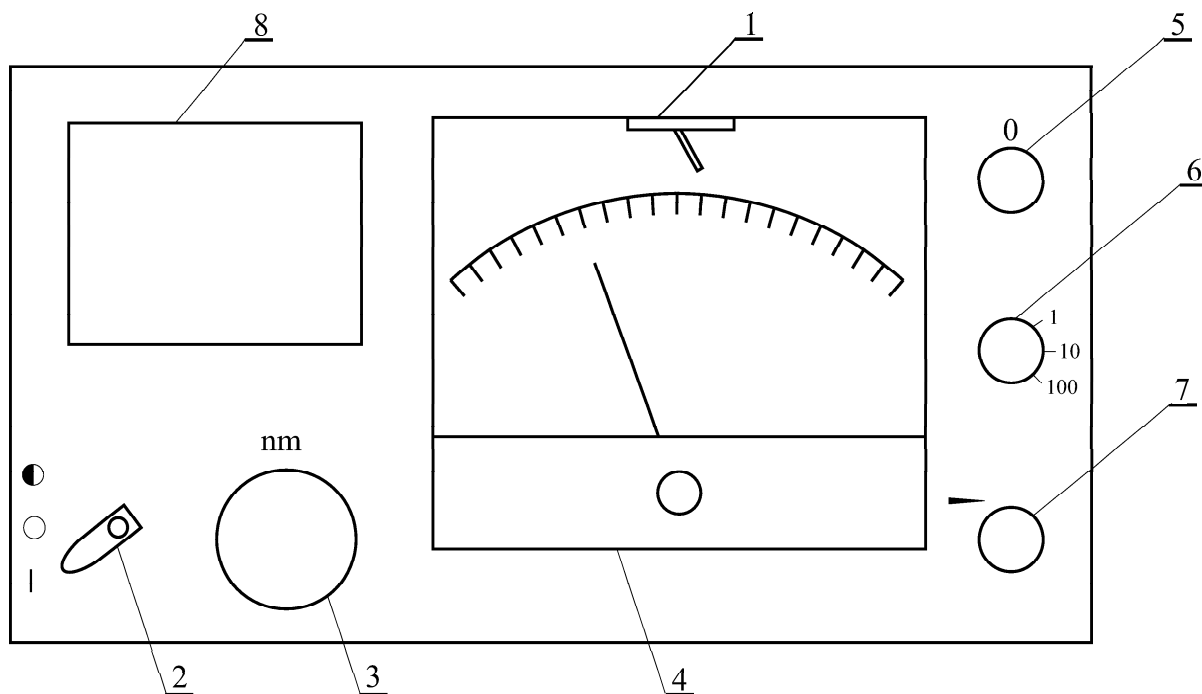
Spektrální fotometr Spekol je určen k měření optické absorpce a propustnosti. Jeho schéma je na obr. G.1. Monochromátorová část přístroje vytváří záření v úzkém pásu vlnových délek o šířce 10 nm. Střední vlnová délka pásu je plynule volitelná. Zdrojem světla je žárovka \mathcal{Z} . Kondenzor C_1 spolu s rovinným zrcadlem Z soustřeďuje paprsky na vstupní štěrbinu monochromátoru S_1 , umístěnou v ohniskové rovině kolimátorové čočky C_2 . Disperzní soustavou monochromátoru je mřížka na odraz M . V ohniskové rovině objektivu C_3 se vytváří reálný obraz spektra, z něhož výstupní štěrbina S_2 vybírá úzkou spektrální oblast v okolí požadované vlnové délky. Štěrbiny i čočky jsou nastaveny pevně, žádaná vlnová délka se nastavuje natáčením mřížky kolem osy rovnoběžné s vrypy mřížky. Natáčení provádíme mikrometrickým šroubem, na jehož děleném bubínku lze odečítat vlnovou délku v nm. Šířka štěrbin je nastavena tak, že šířka pásma propustnosti monochromátoru je přibližně 10 nm. Do cesty světla vycházejícího z výstupní štěrbinu je v naší úloze posta-



Obrázek G.1: Schéma Spekolu.

vena fotonka, která je přes stejnosměrný zesilovač s regulovatelným zesílením připojena

k mikroampérmetru na panelu přístroje (a též k měřicímu přípravku). Aby bylo možno nastavit nulu stejnosměrného zesilovače, je přístroj vybaven clonou, která umožňuje přerušit světelný tok do výstupní štěrbině. Fotonka pak negeneruje žádný proud a nulovacím potenciometrem je možno nastavit nulovou výchylku měřidla. U některých provedení Spekolu má ovládací páčka clony tři polohy: kromě zcela otevřené nebo zcela zacloněné i polohu umožňující částečné zaclonění výstupní štěrbině. Podobně i ovládání zesilovače je u některých typů rozšířeno o možnost stupňovité volby zesílení zvláštním přepínačem.



Obrázek G.2: Ovládací prvky Spekolu. 1 - přepínač komutace měřidla, 2 - ovládání clony, 3 - nastavení vlnové délky, 4 - mikroampérmetr, 5 - potenciometr pro nastavení nuly zesilovače, 6 - dělič pro nastavení zesílení zesilovače, 7 - potenciometr pro jemné nastavení zesílení zesilovače, 8 - přípravek s fotonkou.

G.1 Měření závislosti kompenzačního napětí na vlnové délce

1. Přepněte komutaci měřidla do polohy normál (prvek 1)
2. Přesvědčte se o tom, že zdroj kompenzačního napětí je vypnutý
3. Vypínačem na zdroji spekolu zapněte zdroj světla
4. Uzavřete aperturu (prvek 2)
5. Nastavte vlnovou délku světla na 375 nm (prvek 3)
6. Nastavte přepínač rozsahu zesilovače na 100 (prvek 6)
7. Otáčejte prvkem pro nulování, dokud měřicí přístroj neukáže nulu (prvek 5)

8. Otevřete aperturu (prvek 2)
9. Pomocí regulace zesílení nastavte výchylku ručičky na 100 (prvek 7)
10. Zapněte zdroj kompenzačního napětí
11. Zvětšujte kompenzační napětí, až měřicí přístroj na Spekolu ukáže nulu. Zapište hodnotu kompenzačního napětí na voltmetru.
12. Vypněte zdroj kompenzačního napětí
13. Opakuj body 4 až 12 pro další vlnovou délku

Měříme pro vlnové délky 375 nm - 475 nm s krokem 25 nm. Pro každou vlnovou délku je nutné zvlášť nastavit nulu i výchylku na 100, aby byla zajištěna stále stejná intenzita světla. Takto můžeme určit brzdné napětí pro každou vlnovou délku.

G.2 Měření závislosti proudu fotonkou na kompenzačním napětí

1. Přepněte komutaci měřidla do polohy normál (prvek 1)
2. Přesvědčte se o tom, že zdroj kompenzačního napětí je vypnutý
3. Vypínačem na zdroji spekolu zapněte zdroj světla
4. Uzavřete aperturu (prvek 2)
5. Nastavte požadovanou vlnovou délku světla (prvek 3)
6. Nastavte přepínač rozsahu zesilovače na 100 (prvek 6)
7. Otáčejte prvkem pro nulování, dokud měřicí přístroj neukáže nulu (prvek 5)
8. Otevřete aperturu (prvek 2)
9. Pomocí regulace zesílení nastavte výchylku ručičky na 100 (prvek 7)
10. Zapněte zdroj kompenzačního napětí
11. Pomocí potenciometru na zdroji kompenzačního napětí nastavíme výchylku ručičky na 100
12. Přečteme na přístroji proud protékající fotonkou a na voltmetru příslušné kompenzační napětí.
13. Pomocí potenciometru na zdroji kompenzačního napětí zvětšete kompenzační napětí tak, aby proud fotonkou klesl o deset dílků.
14. opakuj body 4 až 13 pokud fotonkou protéká proud

Měříme pro vlnové délky 375 nm - 475 nm s krokem 25 nm. Pro každou vlnovou délku je nutné zvlášť nastavit nulu i výchylku na 100, aby byla zajištěna stále stejná intenzita světla.