

Laboratorní úloha

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 nejistotu měření pro všechny veličiny určené v bodech 1 a 2.
4. Vypracujte graf závislosti maximální kinetické energie elektronů na frekvenci záření $W_k = f(\nu)$.
5. Změřte závislost fotoelektrického proudu na velikosti brzdného potenciálu pro tři vlnové délky.
6. Do jednoho grafu vynesete pro všechny tři vlnové délky změřené závislosti fotoelektrického proudu na velikosti brzdného 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, závislosti $W_k = f(\nu)$ vynesete do jednoho (společného) grafu. Body 5-6 provádějte pouze pro soupravu se spektrálním fotometrem Spekol.

1.2 Úvodní poznámka

Dne 20. května 2019 vstoupila v platnost nová definice soustavy jednotek SI. Spolu s touto novou definicí došlo k zafixování některých fyzikálních konstant, včetně konstanty Planckovy. Planckova konstanta má nyní hodnotu

$$h = 6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34} \text{ Js,}$$

tato hodnota je z definice přesná, a Planckovu konstantu tak není třeba měřit. Faktickým cílem této laboratorní úlohy tedy není změřit hodnotu Planckovy konstanty, ale vyzkoušet si, že daná fyzikální teorie funguje, osvojit si některé experimentální techniky, a zkusit si zpracovat naměřená data.

1.3 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 (Maxwellových rovnic). Znamý německý fyzik Albert Einstein publikoval teorii pro fotoefekt v kovu v roce 1905. Za vysvětlení fotoefektu obdržel v roce 1922 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

$$h = 6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34} \text{ J s},$$

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.

1.3.1 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. Naopak 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.

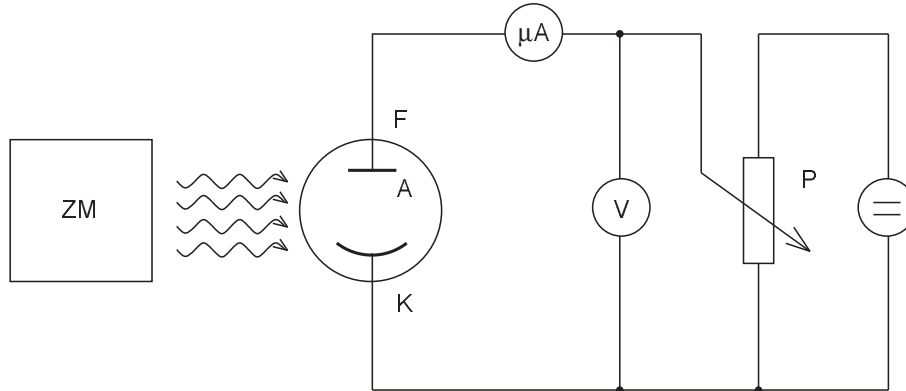
značka	prvek	A [eV]	λ_m [nm]
Cs	cesium	1,93	642
Rb	rubidium	2,13	582
K	draslík	2,24	554
Na	sodík	2,28	544
Li	lithium	2,36	525
Ba	baryum	2,52	492
Ce	cer	2,84	437
Ca	vápník	2,96	419

Tabulka 1.1: Výstupní práce elektronů a mezní vlnové délky pro některé kovy.

¹expozimetry

1.4 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 1.1. 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 vztahem (1.1). Pro stanovení Planckovy konstanty h však potřebujeme znát ještě výstupní práci A a maximální kinetickou energii emitovaných elektronů W_k :

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

Maximální kinetickou energii vyletujících elektronů 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 a $e = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$ je velikost náboje elektronu. Toto napětí měříme, takže veličina W_k je tímto způsobem určena. Pro stanovení Planckovy konstanty to však nestačí, neboť nevíme, z jakého materiálu je vrstva ve fotonce zhotovena (jaká je jeho výstupní práce A). Můžeme však provést kompenzaci kinetické energie emitovaných elektronů opakovaně pro různé vlnové délky λ_i dopadajícího světla.

1.4.1 Zpracování pomocí metody nejmenších čtverců

Pro jednotlivé různé nastavené vlnové délky λ_i změříme příslušné maximální kinetické energie vyletujících elektronů W_{ki} . Vypočteme-li kmitočty dopadajícího světla pomocí vztahu $\nu_i = c/\lambda_i$, kde c je rychlost světla ve vakuu², dostaneme dvojice hodnot (ν_i, W_{ki}) , které by měly ležet na přímce

$$W_k = h\nu - A, \quad (1.4)$$

²Platí $c = 2,998 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$.

nicméně díky přítomnosti chyb měření leží spíš v jejím okolí. Odhad skutečných hodnot h a A dostaneme tak, že dvojice hodnot (ν_i, W_{ki}) aproximujeme metodou nejmenších čtverců přímkou (polynomem prvního stupně) ve tvaru

$$W_k = a_1\nu + a_0. \quad (1.5)$$

Použijeme-li pro určení koeficientů a_0 a a_1 kinetické energie W_{ki} v elektronvoltech³ a kmitočty dopadajícího světla v petahertzích⁴, pro odhad výstupní práce fotokatody v elektronvoltech dostaneme

$$A = -a_0$$

a pro odhad Planckovy konstanty v joule-sekundách

$$h = 1,602 \times 10^{-34} a_1.$$

K nalezení koeficientů a_0 a a_1 (a k vyhotovení grafů) můžete použít *Univerzální nástroj pro kreslení grafů* na serveru <http://herodes.feld.cvut.cz>.

1.5 Postup měření

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

1.5.1 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;⁵
- 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 1.7 na straně 5.

³Jeden elektronvolt je kinetická energie, kterou elektron získá (ztratí) v potenciálovém rozdílu 1 volt, takže platí $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$. Číselná hodnota maximální kinetické energie vyletujících elektronů v elektronvoltech se tedy rovná číselné hodnotě brzdného napětí, při kterém fotoelektrický proud poklesne na nulu.

⁴Platí $1 \text{ PHz} = 10^{15} \text{ Hz}$.

⁵Fotonka 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 snížila 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.

1.5.2 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.

1.6 Literatura

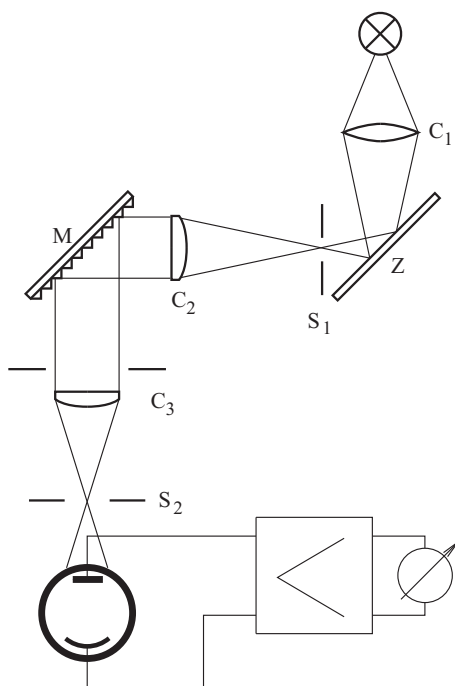
[1] Lego, J., Jelen, J.: Fyzika II. Praha, skriptum FEL ČVUT 1991.

1.7 Dodatek: Spektrální fotometr Spekol

Spektrální fotometr Spekol je určen k měření optické absorpce a propustnosti. Jeho schéma je na obr. 1.2. 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 \check{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 štěrbinu S_2 vybírá úzkou spektrální oblast v okolí požadované vlnové délky. Štěrbinu 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 postavena 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 štěrbinu. 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 štěrbinu. Podobně i ovládání zesilovače je u některých typů rozšířeno o možnost stupňovité volby zesílení zvláštním přepínačem.

1.7.1 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.



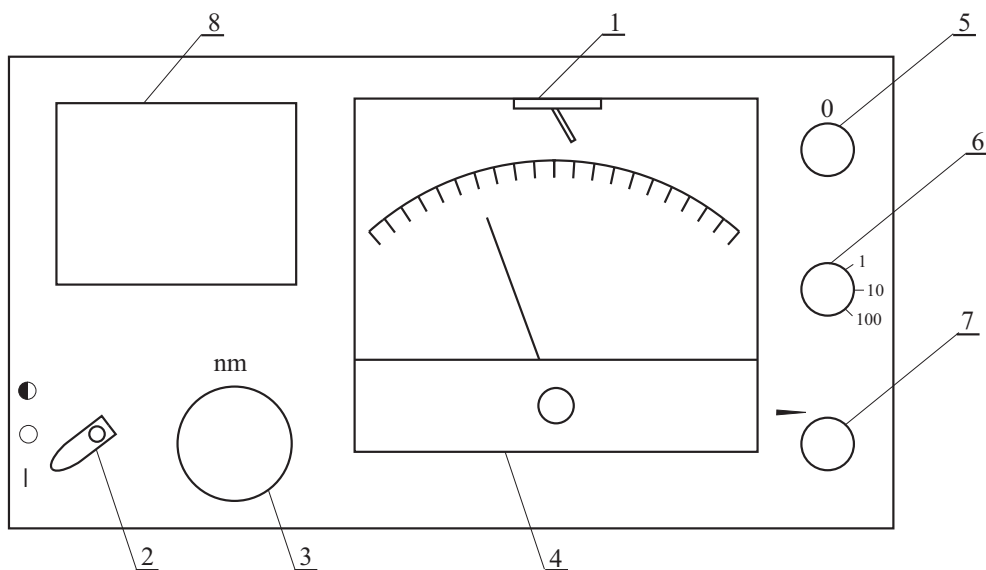
Obrázek 1.2: Schéma Spekolu.

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 měřící 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 měřící přístroj na Spekolu ukáže nulu. Zapište hodnotu kompenzačního napětí na voltmetru.
12. Vypněte zdroj kompenzačního napětí.
13. Opakuje body 4 až 12 pro další vlnovou délku.

Měřte pro vlnové délky 375 nm – 475 nm s krokem 25 nm. Pro každou vlnovou délku je nutné zvlášť nastavit nulu i výchylku na 100. Takto lze určit brzdné napětí pro každou vlnovou délku.

1.7.2 Měření závislosti proudu fotonkou na kompenzačním napětí

1. Přepněte komutaci měřidla do polohy normál (prvek 1) a řesvědčte se o tom, že zdroj kompenzačního napětí je vypnutý. Vypínačem na zdroji Spekolu zapněte zdroj světla.
2. Uzavřete aperturu (prvek 2), nastavte požadovanou vlnovou délku světla (prvek 3).
3. Nastavte přepínač rozsahu zesilovače na 100 (prvek 6).



Obrázek 1.3: 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.

4. Otáčejte prvkem pro nulování, dokud měřící přístroj neukáže nulu (prvek 5).
5. Otevřete aperturu (prvek 2).
6. Pomocí regulace zesílení nastavte výchylku ručičky na 100 (prvek 7).
7. Zapněte zdroj kompenzačního napětí. Pomocí potenciometru na zdroji kompenzačního napětí nastavte výchylku ručičky na 100.
8. Odečtěte na přístroji fotoelektrický proud a na voltmetru příslušné kompenzační napětí.
9. Pomocí potenciometru na zdroji kompenzačního napětí zvětšete kompenzační napětí tak, aby proud fotonkou klesl o deset dílků.
10. Opakujte body 2 až 9 pokud fotonkou protéká proud.

Měřte pro tři různé vlnové délky v intervalu 375 nm – 475 nm. Pro každou vlnovou délku je nutné zvlášť nastavit nulu i výchylku na 100.