

4. STANOVENÍ PLANCKOVY KONSTANTY

Měřicí potřeby:

- 1) kompaktní zařízení firmy Leybold
- 2) kondenzátor
- 3) spínač
- 4) elektrometrický zesilovač se zdrojem
- 5) voltmetr do 2 V

Obecná část:

Při ozáření kovového tělesa světlem dostatečně vysoké frekvence vystupují z jeho povrchu „vyražené“ elektrony (fotoelektrický jev). Počet těchto elektronů je úměrný intenzitě dopadajícího světla, jejich energie (kinetická) však závisí pouze na frekvenci světla. Vysvětlení fotoelektrického jevu (1905 Einstein) bylo spojeno se zásadní změnou názoru vědců na podstatu elektromagnetického záření a znamenalo začátek vývoje kvantové fyziky.

Podle kvantové fyziky si můžeme světlo o frekvenci f představit jako proud mnoha stejných částic (fotonů) s energií o velikosti hf . Při interakci fotonu s elektronem uvnitř kovu (tento proces není zcela triviální, viz např. Sbírka příkladů z fyziky) převezme energii hf elektron a může ji využít pro výstup z povrchu kovu do vakua. Označíme-li jako A výstupní práci elektronu z kovu (nejmenší práce potřebná pro uvolnění elektronu z Fermiho hladiny do vakua), dostaneme pro kinetickou energii elektronu tzv. Einsteinovu rovnici:

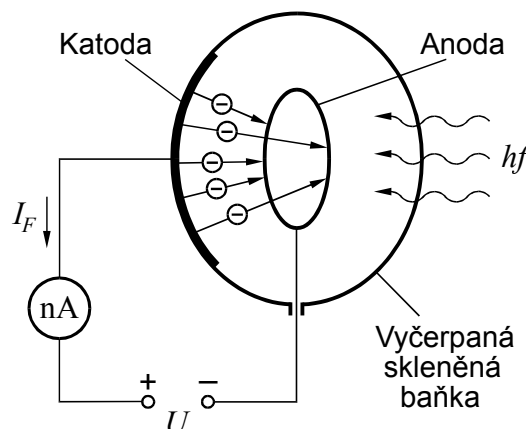
$$hf = A + \frac{1}{2}mv^2$$

kde h je Planckova konstanta, f je frekvence světla, m hmotnost elektronu a v je jeho rychlost. Tato rovnice okamžitě objasňuje závislost kinetické energie elektronů na frekvenci světla. Rovněž je zřejmé, že fotoelektrický jev může nastat pouze pro frekvence f , které jsou vyšší než tzv. prahová frekvence f_0 :

$$hf \geq hf_0 = A$$

V podmínkách školní laboratoře je výhodné studovat fotoelektrický jev na alkalické vakuové fotonce (obr. 1)

Ve vakuové skleněné baňce je na jedné vnitřní stěně vytvořena vrstva alkalického kovu (tzv. fotokatoda, většinou z draslíku, který má nízkou výstupní práci A a tedy podle předchozí rovnice i nízkou prahovou frekvenci v oblasti viditelného světla). Po osvětlení (přes průhlednou protější stěnu) vystupují z fotokatody elektrony a dopadají na protější anodu



Obr. 1 Vakuová fotonka

(kruhový platinový drátek). V elektrickém obvodu se zdrojem napětí U tak protéká fotoproud I_F .

Při polaritě napětí U tak, jak je zakresleno na obr. 1 (plus na katodě), vzniká mezi fotokatodou a anodou elektrické pole, které brzdí elektrony vystupující z fotokatody. Toho lze výhodně využít ke stanovení energie elektronů.

Budeme-li zvyšovat napětí U , pak při určité hodnotě napětí U_0 klesne fotoproud na nulu:

$$I_F = 0.$$

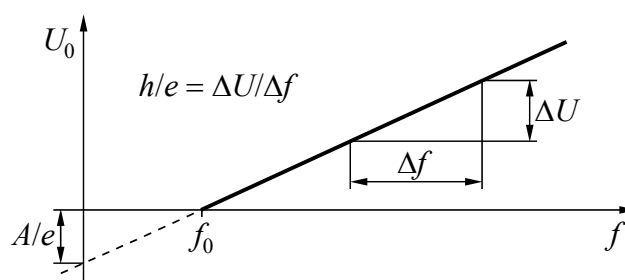
Znamená to, že se celá kinetická energie elektronů přeměnila na potenciální energii elektrického pole a směr pohybu elektronů (letících k anodě) se obrátil dříve, než mohli dopadnout na anodu. Podle zákona zachování energie platí:

$$\frac{1}{2}mv^2 = eU_0.$$

Po dosazení do Einsteinovy rovnice získáme vztah mezi brzdícím napětím U_0 a frekvencí světla f :

$$U_0 = \frac{h}{e}f - \frac{A}{e}$$

Dostáváme jednoduchou lineární závislost, tj. přímku v souřadnicích U_0 a f (viz obr. 2).



Obr. 2

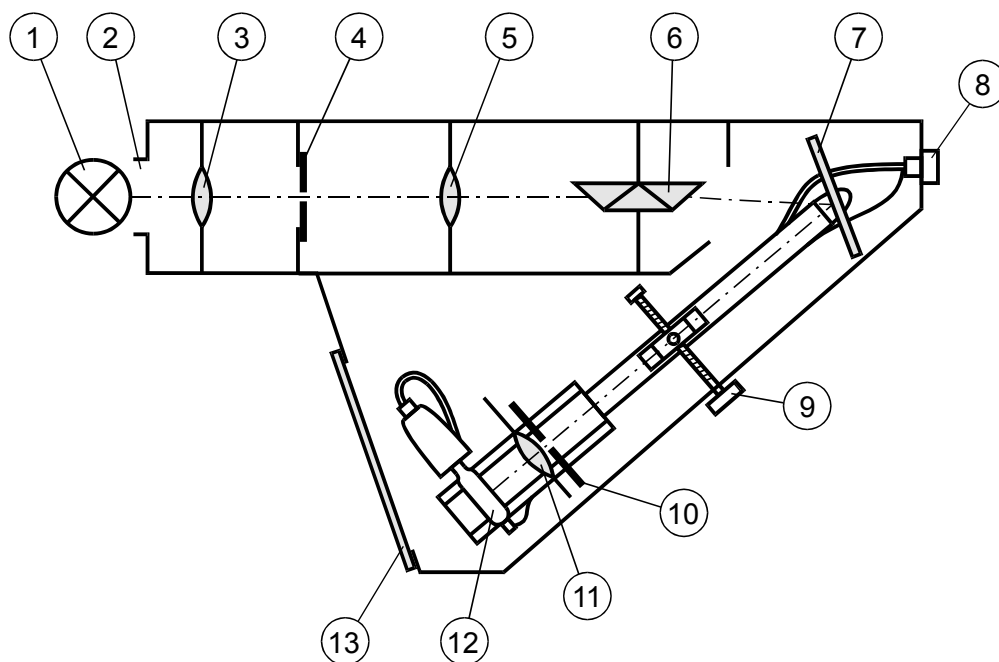
Znalost této lineární závislosti umožní stanovit Planckovu konstantu ze směrnice přímky, případně výstupní práci a prahovou frekvenci f_0 .

Měření:

Podle předchozího odstavce je nutno stanovit lineární závislost brzdného napětí U_0 (při kterém je nulový fotoproud) na frekvenci f dopadajícího světla.

K dispozici tedy musí být monochromatické světlo několika frekvencí (vlnových délek). Z tohoto hlediska je výhodná rtuťová výbojka, která jen ve viditelném oboru světla intenzívně vyzařuje na pěti až šesti vlnových délkách (viz přiložené spektrum a kalibrační tabulka vlnových délek u úlohy). Dále musí být monochromatická světla různých vlnových délek od sebe prostorově oddělena. Je tedy potřebné použít monochromátor nebo spektrograf, nejlépe hranolový (u mřížky dochází k určitým ztrátám světla ve vyšších řádech interference).

Těmto požadavkům odpovídá složení kompaktního zařízení firmy Leybold (viz obr. 3). Vysokotlaká rtuťová výbojka **1** osvětluje přes vstupní otvor **2** a čočku **3** vstupní štěrbinu **4**. Obraz této štěrbiny je vytvořen čočkou **5**, hranolem **6** a zrcadlem **7** v rovině výstupního okénka **13**. Současně nastává na přímohledném hranolu **6** rozklad světla podle vlnových délek, proto ve výstupním okénku **13** vidíme více obrazů vstupní štěrbiny v různých barvách (tzv. „čárové“ spektrum rtuťové výbojky). Toto spektrum je viditelné pouze v horní části okénka **13**, neboť dolní část je zastíněna štěrbinou **10** a čočkou **11**, které soustřeďují světlo na



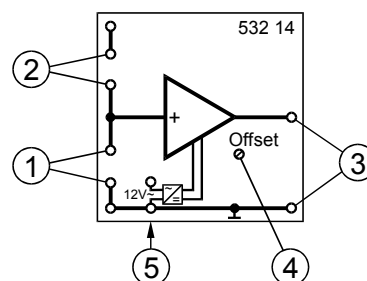
Obr. 3 Zařízení k měření Planckovy konstanty

fotonku **12**. Posouváním nosného ramene fotonky pomocí stavěcího šroubu **9** pak můžeme nastavit fotonku na jednu vybranou barvu (vlnovou délku) dopadajícího světla. Katoda a anoda fotonky jsou vyvedeny na konektor **8** a pro měření je musíme zapojit do vhodného elektrického obvodu.

Napětí U_0 můžeme měřit přesně podle definice v minulém odstavci – tzn. s použitím nějakého regulovatelného zdroje, jehož napětí budeme zvyšovat až k hodnotě U_0 , kdy fotoproud klesne na nulu.

Existuje však možnost, jak se bez tohoto zdroje obejít: postačí kvalitní kondenzátor (bez svodu), který připojíme mezi katodu a anodu fotonky. Fotoproud pak nabíjí tento kondenzátor, takže jeho napětí postupně roste. Tím však zároveň roste i elektrické brzdné pole mezi anodou a katodou, to postupně snižuje fotoproud, až se nakonec celý proces nabíjení zastaví. V tom okamžiku je kondenzátor nabit na napětí U_0 .

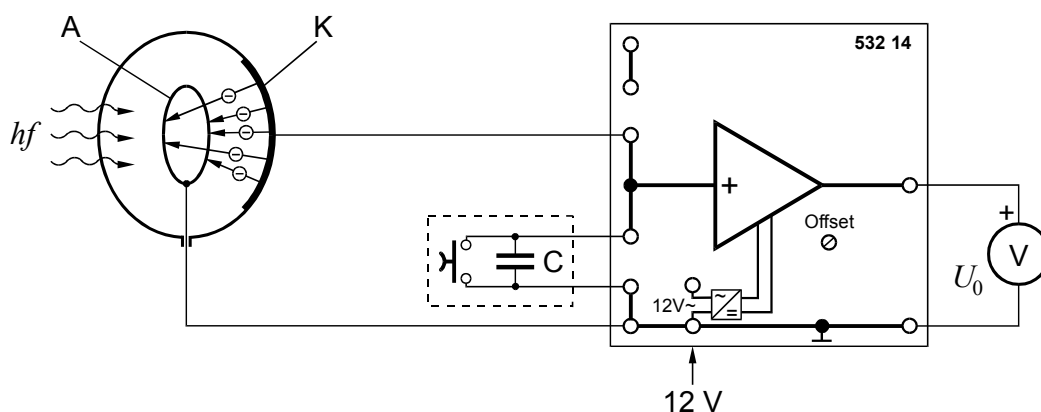
Fotoproud je velice malý (řádově pikoampéry) a proto podmínkou této jednoduché metody je, že dokážeme měřit napětí na kondenzátoru statickou metodou, tj. bez odběru proudu z kondenzátoru. K tomu je vhodný tzv. elektrometrický zesilovač (viz obr. 4). Svorky **1** jsou vysokoohmový vstup zesilovače, **2** jsou pomocné svorky, nízkoohmový výstup je na svorkách **3**. Napájecí napětí zesilovače je nutno přivést z boku skříňky na konektor **5**. Trimrem **4** se nastaví nulové výstupní napětí při nulovém vstupním napětí.



Obr. 4

| | | |
|-----------------------------|---------------------|--------------------|
| Technické údaje zesilovače: | vstupní odpor | $> 10^{13} \Omega$ |
| | výstupní odpor | $< 1 \Omega$ |
| | max. vstupní napětí | $\pm 10 \text{ V}$ |
| | napěťové zesílení | 1,00 |

Elektrometrický zesilovač je tedy v principu měnič impedancí s extrémně vysokým vstupním odporem, malým výstupním odporem a zesílením 1 (tj. vstupní napětí se rovná výstupnímu napětí). Na výstup zesilovače lze tedy připojit libovolný obyčejný voltmetr a přitom napětí na vstupu zesilovače bude měřeno prakticky bez odběru proudu (statické měření). Schéma zapojení pro měření Planckovy konstanty je na obr. 5.



Obr. 5 Zapojení pro měření Planckovy konstanty

Postup měření

Rtuťovou výbojku zapneme asi 10 minut před vlastním měřením. Na výstup elektrometrického zesilovače připojíme voltmetr s rozsahem 1,5 V (viz obr. 5). Na výstupním okénku **13** ponecháme polopropustnou matnici, na které pozorujeme spektrum výbojky. Na levé straně okénka musí být vidět žlutý pruh, na pravé straně pak fialový pruh. Pro informaci je spektrum znázorněno na papíru přiloženém u úlohy. Otáčením knoflíku **9** měníme polohu fotonky ve spektru. Její polohu poznáme podle rysky umístěné nad štěrbinou fotonky **10**. Tato ryska (svislý drátek) vrhá stín na stínítko.

Nejprve nastavíme fotonku do žluté barvy. Pak vyjmeme z výstupního okénka **13** matnici a okénko zakryjeme neprůhlednou záklopkou (eliminujeme rušivé vnější světlo a odrazy od matnice).

Asi na jednu vteřinu stiskneme vybíjecí tlačítko (tím se vybije kondenzátor). Pak sledujeme zvyšující se napětí na kondenzátoru do doby, až se přestane zvyšovat a zůstane konstantní (což může trvat až několik desítek vteřin). Tuto hodnotu zaznamenáme. Měření napětí 5-krát zopakujeme, z hodnot vypočítáme aritmetický průměr.

Potom sejmeme neprůhlednou záklopku z okénka **13**, zasuneme opět matnici, nastavíme další barvu a opakujeme měření.

Pracovní úkol:

- 1) Proveďte měření brzdného napětí U_0 pro pět spektrálních čar rtuťové výbojky:

| | |
|----------|-------------------------|
| 576,0 nm | žlutá |
| 546,1 nm | světle zelená |
| 491,6 nm | tyrkysová (modrozelená) |
| 435,8 nm | modrá |
| 404,7 nm | fialová. |
- 2) Měření napětí pro každou vlnovou délku 5-krát zopakujte a vypočítejte aritmetický průměr. Přepočítejte vlnové délky na frekvence podle vztahu: $f = \frac{c}{\lambda}$.
- 3) Vyneste do grafu naměřené a vypočítané hodnoty jako funkci $U_0 = U_0(f)$ a proložte přímkou. Přesnou rovnici přímky stanovte lineární regresí.
- 4) Z rovnice přímky vypočítejte Planckovu konstantu h , určete výstupní práci A a prahovou frekvenci f_0 (a vlnovou délku λ_0).
- 5) Vypočítejte dále chybu parametrů rovnice přímky (viz kapitola „Chyby měření“, odst. D) a z nich stanovte chybu v určení Planckovy konstanty a výstupní práce. Zjištěné veličiny zapište včetně chyb standardním způsobem (viz kap. „Chyby měření“, odst. E).