

MĚŘENÍ PLANCKOVY KONSTANTY

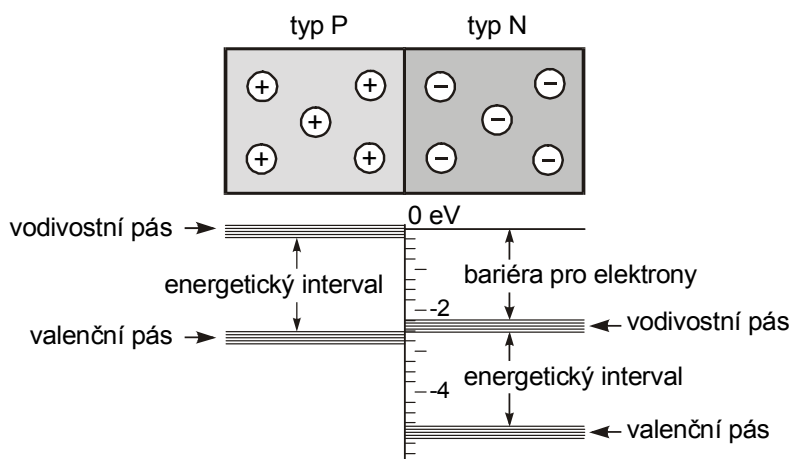
ÚKOL MĚŘENÍ:

1. Změřte napětí U_{\min} , při kterém se právě rozsvítí červená, žlutá, zelená a modrá LED. Napětí na LED regulujte potenciometrem.
2. Nakreslete graf závislosti U_{\min} na vlnové délce λ světla emitovaného LED, $U_{\min} = f(\lambda)$.
3. Pro modrou LED určete z U_{\min} Planckovu konstantu h .
4. Změřte voltampérovou charakteristiku červené LED. Extrapolací lineární části charakteristiky určete Planckovu konstantu h .
5. Změřte brzdicí potenciál V pro fotoelektrony v závislosti na frekvenci ν světla dopadajícího na fotokatodu. Světlo s různou frekvencí vybíráme v 1. řádu spektra rtuťové výbojky. Pro zelené a žluté světlo je třeba použít zelený a žlutý filtr.
6. Pomocí intenzitního filtru zjistěte, zda brzdicí potenciál V pro žluté světlo nezávisí na intenzitě dopadajícího světla.
7. Nakreslete graf závislosti brzdicího potenciálu V na frekvenci ν . Z grafu určete lineární regresí Planckovu konstantu h a výstupní práci W_0 pro emisi elektronů z fotokatody.
8. Srovnajte získané hodnoty Planckovy konstanty s tabulkovou hodnotou.

1. TEORETICKÝ ÚVOD

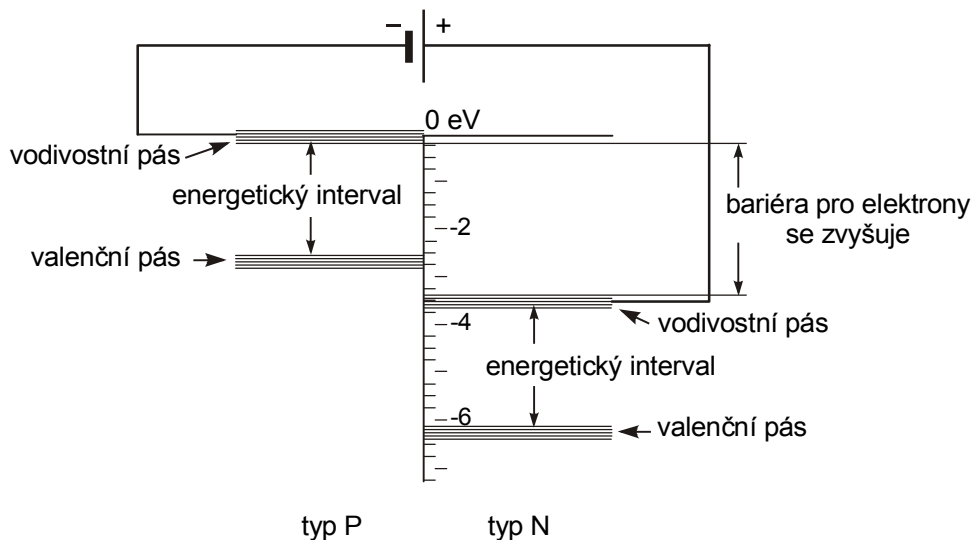
1.1 Princip činnosti LED

LED (light emitting diode – dioda emitující světlo) je vytvořena spojením polovodiče typu N a polovodiče typu P (viz úloha č. 12). Elektrony v pevných látkách (tedy i v polovodičích) se mohou podle pásové teorie pevných látek nacházet v různých stavech. Elektrony s nejvyššími energiemi nemohou pevnou látku opustit, ale mohou se v ní volně pohybovat, nejsou tedy vázány k určitému atomu (nacházejí se v tzv. vodivostním pásu). Elektrony s nižšími energiemi jsou již vázány k určitému atomu, který nemohou samy opustit (nacházejí se v tzv. valenčním pásu).* Není-li dioda připojena ke stejnosměrnému zdroji, vodivostní pásy v polovodiči typu P a typu N nejsou propojeny a diodou neprotéká proud (viz obr. 1).



Obr. 1 Dioda nepřipojená ke zdroji

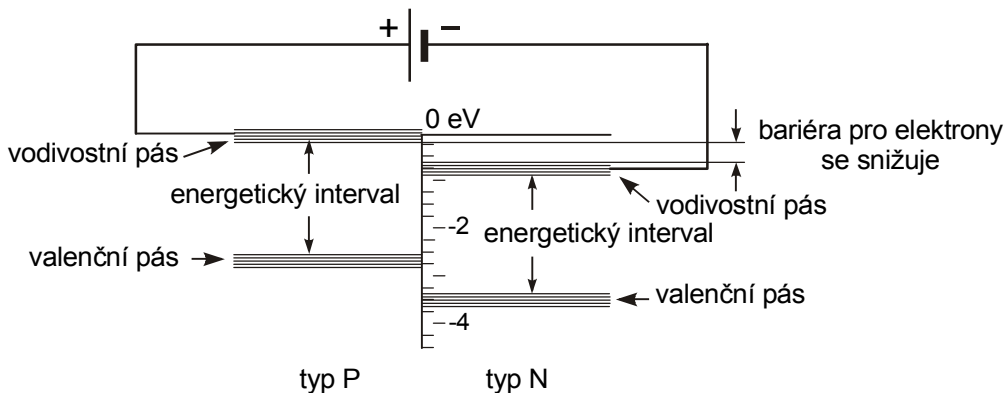
* Energetický interval mezi vodivostním a valenčním pásem (viz obr. 1-4) se často označuje jako zakázaný pás.



Obr. 2 Dioda v závěrném směru

Při zapojení diody v závěrném směru (záporný pól stejnosměrného zdroje je připojen k polovodiči typu P a kladný pól k polovodiči typu N) se bariéra pro přechod elektronů z N do P zvyšuje a diodou neprotéká proud (viz obr. 2).

Při zapojení diody v propustném směru (záporný pól stejnosměrného zdroje je připojen k polovodiči typu N a kladný pól k polovodiči typu P) se bariéra pro přechod elektronů z N do P snižuje (viz obr. 3).



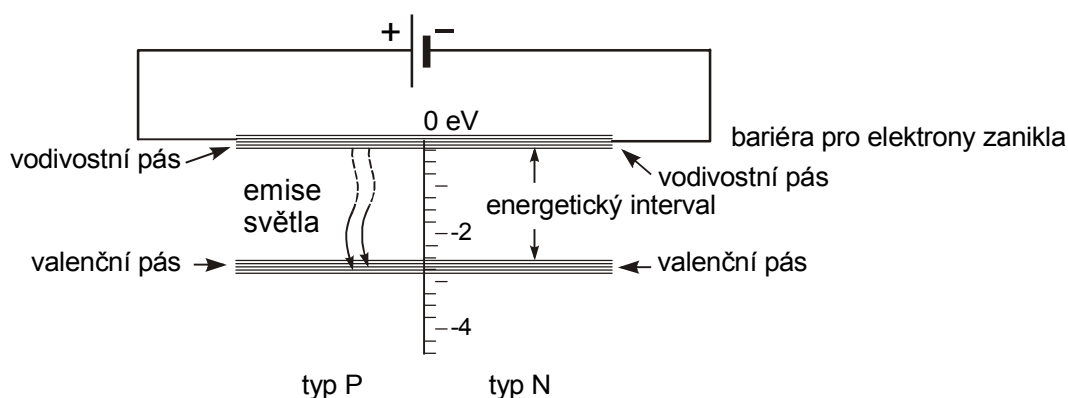
Obr. 3 Dioda v propustném směru

Zvyšujeme-li napětí U stejnosměrného zdroje při zapojení diody v propustném směru, dojde pro určitou hodnotu napětí U k zániku bariéry bránící přechodu elektronů z polovodiče typu N do polovodiče typu P (vodivostní pásy v N a P jsou propojeny). Vodivostní elektrony volně přecházejí z N do P, diodou teče proud (viz obr. 4).

Vodivostní elektrony mohou zaplňovat díry ve valenčním pásu v polovodiči typu P a také vyrážet při srážkách valenční elektrony z valenčního do vodivostního pásu. Při přechodu elektronu z vodivostního do valenčního pásu (zaplnění díry ve valenčním pásu) může být uvolněná energie E , rovná rozdílu energií vodivostního a valenčního pásu, vyzářena ve formě fotonu. Pro energii tohoto fotonu platí:

$$E = \frac{hc}{\lambda}, \quad (1)$$

kde λ je vlnová délka fotonu, h Planckova konstanta, c rychlost světla.



Obr. 4 Tok proudu diodou

1.2 Fotoelektrický jev

Dopadá-li světlo o určité frekvenci ν na fotokatodu vakuové fotodiody, dochází k fotoelektrickému jevu*. Z fotokatody jsou uvolňovány elektrony s kinetickou energií

$$E_k = h\nu - W_0, \quad (2)$$

kde W_0 je výstupní práce potřebná k uvolnění elektronu z fotokatody a h je Planckova konstanta. Tyto elektrony dopadají na anodu vakuové fotodiody.

Vakuovou fotodiodu můžeme považovat za kondenzátor, který se postupně nabíjí (fotoelektrony se hromadí na anodě). Napětí na fotodiodě (kondenzátoru) tedy roste. Jakmile napětí dosáhne hodnoty brzdícího potenciálu $V = E_k/e$ (e je velikost náboje elektronu, tj. elementární náboj), elektrostatické pole uvnitř fotodiody (kondenzátoru) zabrání elektronům uvolněným z fotokatody v dosažení anody a fotodiodou přestane téci proud. Fotoelektrony již tedy nedopadají na anodu a napětí na fotodiodě se stabilizuje na hodnotě brzdícího potenciálu V , pro který platí:

$$V = \frac{h}{e} \nu - \frac{W_0}{e}. \quad (3)$$

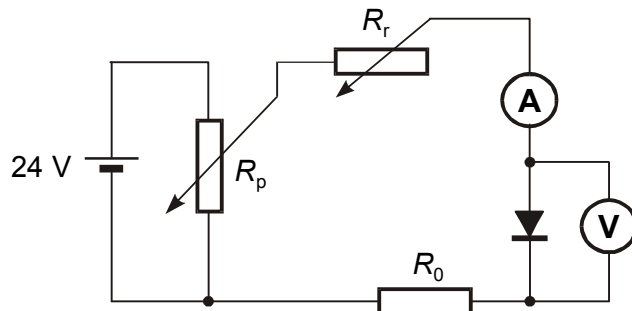
Tento vztah umožňuje určení Planckovy konstanty h ze směrnice lineární závislosti brzdícího potenciálu V na frekvenci ν fotonu dopadajícího na fotokatodu. Ze vztahu (3) vyplývá, že hodnota brzdícího potenciálu V závisí lineárně na frekvenci ν světla a nezávisí na intenzitě světla. V případě menší intenzity světla je třeba delší doby ke stabilizaci napětí na fotodiodě na hodnotě brzdícího potenciálu V .

* Urbanová M., Hofmann J.: Fyzika II, VŠCHT Praha 2000, kap. 5.2.2.

2. PRINCIP METODY A POSTUP MĚŘENÍ

2.1 Měření pomocí LED

K dispozici jsou 4 diody s vlnovými délkami emitovaného světla uvedenými v laboratoři (vlnové délky odpovídají světlu, které dioda emituje s maximální intenzitou): červená, žlutá, zelená a modrá. Obvod zapojíme podle schématu na obr. 5. Napětí na diodě zvyšujeme nejprve potenciometrem R_p , pak zvyšujeme proud i napětí reostatem R_r .



Obr. 5 Schéma zapojení

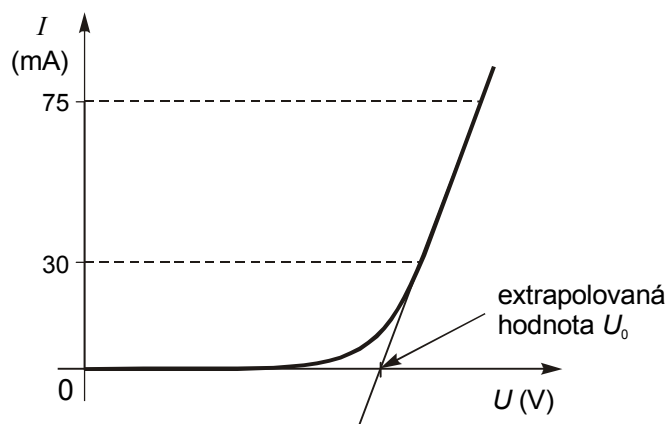
POSTUP MĚŘENÍ:

1. Do obvodu podle obr. 5 zapojte postupně červenou, žlutou, zelenou a modrou LED (jednotlivé diody jsou na panelu odlišeny) a voltmetrem měřte napětí U_{\min} , při kterém se příslušná LED právě rozsvítí. Nejistotu $u_{U_{\min}}$ spočítejte ze vztahu $u_{U_{\min}} = \frac{\Delta z_{\max}}{\Theta}$, kde Δz_{\max} určíte z třídy přesnosti voltmetru. Parametr Θ volte $\Theta = \sqrt{3}$.
2. Naměřené hodnoty U_{\min} spolu s vlnovou délkou příslušné diody запиšte do tabulky a nakreslete graf závislosti U_{\min} na vlnové délce λ světla emitovaného LED, $U_{\min} = f(\lambda)$.
3. Pro modrou LED určete z hodnoty U_{\min} Planckovu konstantu h pomocí vztahu: $h = \frac{eU_{\min}}{c} \lambda$, kde e je elementární náboj, $e = 1,6021773 \cdot 10^{-19}$ C, c je rychlost světla ve vakuu, $c = 299792458$ ms⁻¹. Nejistotu u_h Planckovy konstanty h určete ze vztahu

$$u_h = h \sqrt{\left(\frac{u_{U_{\min}}}{U_{\min}}\right)^2 + \left(\frac{u_\lambda}{\lambda}\right)^2},$$

nejistota u_λ je zadána v laboratoři.

4. Změřte voltampérovou charakteristiku červené LED (závislost proudu I diodou na napětí U na diodě) v zapojení podle obr. 5. Extrapolací lineární části voltampérové charakteristiky určete napětí U_0 , které by odpovídalo nulovému proudu I . Voltampérová charakteristika červené LED je lineární pro $I \geq 30$ mA (obr. 6). V této oblasti měňte proud I s krokem 5 mA od 75 mA do 30 mA a odečtěte na voltmetru odpovídající hodnoty napětí U . Planckovu konstantu h určete z napětí U_0 pomocí vztahu: $h = \frac{eU_0}{c} \lambda$. Nejistotu u_{U_0} určete obdobně jako nejistotu U_{\min} , nejistotu u_h Planckovy konstanty h pak ze vztahu



Obr. 6 Voltampérová charakteristika červené LED

$$u_h = h \sqrt{\left(\frac{u_{U_0}}{U_0}\right)^2 + \left(\frac{u_\lambda}{\lambda}\right)^2}.$$

2.2 Měření pomocí fotoelektrického jevu

Rtuťová výbojka emituje světlo o frekvencích: ultrafialové ($8,20264 \cdot 10^{14}$ Hz), fialové ($7,40858 \cdot 10^{14}$ Hz), modré ($6,87858 \cdot 10^{14}$ Hz), zelené ($5,48996 \cdot 10^{14}$ Hz) a žluté ($5,18672 \cdot 10^{14}$ Hz). Světlo rtuťové výbojky dopadá na difrakční mřížku (600 vrypů/mm). Pod určitými úhly pozorujeme na bílém stínítku interferenční maxima (viz úloha č. 7). Stínítko detektoru určeného k měření Planckovy konstanty je vyrobeno ze speciálního materiálu, takže na něm můžeme pozorovat díky fluorescenci i ultrafialové světlo (ověřte, že ultrafialovou čáru na ruce nevidíte). Pro měření Planckovy konstanty otáčíme detektor tak, aby světlo z interferenčního maxima 1. řádu příslušné frekvence ν dopadalo na štěrbinu ve stínítku. Odklopením kruhové clony ověříme, že světlo dopadá i na vstupní okénko vakuové fotodiody, takže dochází k fotoelektrickému jevu.

POSTUP MĚŘENÍ:

1. Zapněte detektor (napájení zesilovače).
2. Připojte digitální voltmetr ke svorkám OUTPUT a zem ⏏ .
3. Vybijte fotodiodu (kondenzátor) stlačením tlačítka DISCHARGE (držíme tak dlouho, až voltmetr ukazuje 0 V).
4. Voltmetrem měřte brzdicí potenciál pro modré světlo. Napětí na fotodiodě roste, až se stabilizuje na hodnotě brzdicího potenciálu V . Při měření pro světlo jiné frekvence opakujte body 3. a 4. Pro zelené a žluté světlo je třeba umístit na stínítko zelený a žlutý filtr. Filtry drží pomocí magnetů. Odfiltrují rozptýlené světlo z okolí a ultrafialové světlo (interferenční maxima 2. řádu).
5. V úkolu č. 6 umístěte na stínítko žlutý filtr. Poté vložte na štěrbinu stínítka intenzitní filtr (plochy označené 20%, 40%, 60%, 80% udávají, kolik procent intenzity dopadajícího světla filtr propouští) a zjistěte, zda brzdicí potenciál V nezávisí na intenzitě dopadajícího světla, jak vyplývá z teorie fotoelektrického jevu. Povšimněte si, že při menší intenzitě světla (menší počet dopadajících fotonů) je příslušná hodnota stabilizovaného napětí dosažena za delší dobu.
6. V úkolu č. 7 nakreslete graf závislosti brzdicího potenciálu V na frekvenci ν . Ze vztahu (3) plyne očekávaná lineární závislost brzdicího potenciálu V na frekvenci ν ve tvaru:

$$V = a\nu + b, \quad (4)$$

kde konstanty a , b a jejich nejistoty u_a , u_b určíte z lineární regrese (kapitola III, str. 24). Hodnoty Planckovy konstanty h a výstupní práce W_0 určíte porovnáním (3) a (4): $h = ae$, $W_0 = -be$. Při určení nejistot u_h a u_{W_0} vyjděte z předpokladu, že $u_e = 0$, pak $u_h = e u_a$, $u_{W_0} = e u_b$.

7. V úkolu č. 8 porovnejte hodnoty Planckovy konstanty získané v úkolech č. 3, 4 a 7 s tabulkovou hodnotou Planckovy konstanty $h = 6,626076 \cdot 10^{-34}$ Js.