Měření vlnové délky světla

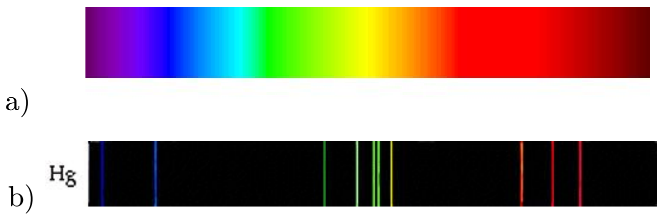
Zadání

1. Změřte mřížkovou konstantu (včetně nejistoty) optické mřížky.
2. Změřte vlnové délky vybraných spektrálních čar neznámého světelného zdroje a pokuste se ho identifikovat.

Teoretický rozbor:

Praktické použití spektrální analýzy stejně jako interferometrická měření délek vyžadují přesnou znalost vlnové délky světla. Měření vlnové délky světla je proto jednou ze základních úloh optiky. Viditelné světlo je elektromagnetické záření o vlnové délce v rozmezí asi 400—750 nm (tedy o frekvenci $4{,}0{\cdot}10^{14}$–$7{,}5{\cdot}10^{14}$ Hz). Na tyto vlnové délky je citlivé lidské oko. Vlnové délky světla leží mezi vlnovými délkami ultrafialového záření a infračerveného záření. Nejmenší frekvenci má světlo červené barvy, největší frekvenci má světlo fialové. Pro vlnovou délku to platí opačně. Červené světlo má tedy ve vakuu přibližně 750 nm a fialové 400 nm. Oko je různě citlivé na jednotlivé vlnové délky. Nejcitlivější je na světlo žlutozelené barvy o vlnové délce okolo 550 nm, která je přibližně uprostřed viditelného spektra. Světelný zdroj, který vyzařuje světlo o určité frekvenci označujeme jako zdroj monochromatického světla.

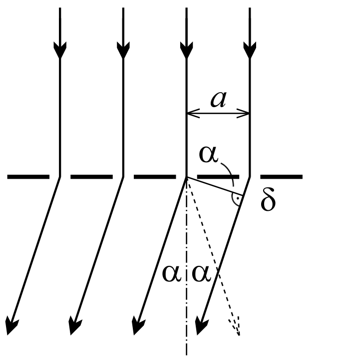
Světlo z běžných zdrojů (žárovky nebo i Slunce) ovšem nevnímáme jako barevné, ale označujeme je jako bílé světlo. Je to světlo složené z barevných světel všech vlnových délek (obr. 1a). O takových světelných zdrojích říkáme, že mají spojité spektrum. Bílé světlo, popř. světlo určité barvy, můžeme získat i mísením menšího počtu barev. Obraz barevné televize vzniká smíšením světel tří barev (např. RGB systém používá červenou, zelenou a modrou barvu). Také světlo mnohých zářivek či výbojek však obsahuje jen některé vlnové délky (obr. 1b). Potom hovoříme o diskrétním nebo čárovém spektru.



Obrázek 1: Spektrum a) zdroje bílého světla a b) rtuťové výbojky.

K ohybu světla (**difrakci**) dochází tehdy, když světlo narazí na překážku, která má velikost srovnatelnou s vlnovou délkou světla. Po ohybu kolem hrany překážky nebývá ostrá hranice světla a stínu. Světlo zčásti proniká i do oblasti, kde by byl stín, kdyby k ohybu nedošlo. Za překážkou dojde k interferenci a vznikne ohybový (difrakční) obrazec.

Ohybový jev zkoumáme obvykle na optické mřížce. **Optická mřížka** je soustava velmi úzkých štěrbin, vzdálených od sebe vždy o periodu mřížky (mřížkovou konstantu) a. Konstruuje se jako planparalelní skleněná destička, na které jsou vyryté ekvidistantní rovnoběžné vrypy stejné šířky. Vrypy jsou matné, proto nepropouštějí světlo. Neporušená místa mezi vrypy slouží jako štěrbiny, které světlo propouštějí. Rovněž se zhotovuje rytím vrypů do kovové vrstvy napařené na destičku nebo se dělá ze speciálních plastických materiálů s následným nanesením kovové vrstvy.



Obrázek 2: Difrakce na mřížce

Když mřížku osvětlíme rovnoběžnými paprsky, dojde na každé štěrbině k ohybu a za štěrbinami jsou paprsky odchýlené od původního směru o úhel α, jak znázorňuje obr. 2. Mezi dvěma paprsky vycházejícími ze sousedních štěrbin vznikne dráhový rozdíl

$$\delta = a \sin \alpha$$

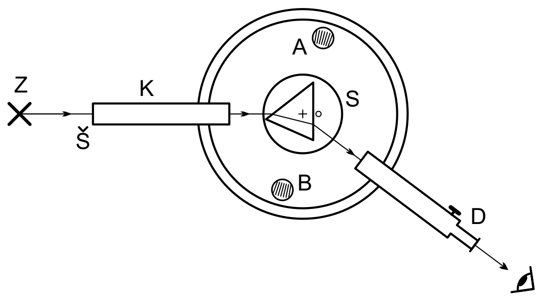
Je-li dráhový rozdíl δ roven celistvému násobku vlnové délky λ, potom v tomto směru vznikne interferenční maximum. Podmínku pro vznik interferenčního maxima pak lze zapsat

$$a \sin \alpha = n\,\lambda, \tag{1}$$

kde n je příslušný řád maxima nabývající hodnot: 0, 1, 2, 3 atd. Pro $n = 0$ je to maximum nultého řádu a vzniká ve směru paprsků dopadajících na mřížku. Maxima vyšších řádů vznikají souměrně na obou stranách od maxima nultého řádu. Nejblíže k nultému maximu je fialová barva a nejdále červená. Pro optickou mřížku vyšetřovaného typu klesá intenzita spektrálních čar s rostoucím řádem maxima, tzn. že prošlé světlo je převážně soustředěno do nultého řádu maxima.

Goniometr

Goniometr je přístroj sloužící k měření úhlových odchylek světelných paprsků, tzv. deviací. Skládá se z pevné a pohyblivé části. Pevnou část tvoří masivní podstavec spojený s děleným kruhem, ke kterému je připojen kolimátor. Pohyblivá část sestává z kruhového disku s odečítacím mikroskopem, otáčivého kolem osy děleného kruhu, a s ním pevně spojeného dalekohledu. V ose této soustavy se nachází vodorovný stolek, který se může volně otáčet nezávisle na obou částech goniometru nebo může být upevněn k jeho nepohyblivé části. Schéma goniometru ukazuje obr. 3.



Obrázek 3: Schema goniometru

Kolimátor K slouží k vytvoření rovnoběžného svazku paprsků světla ze zdroje Z. Na své vnější, vstupní, straně má stavitelnou štěrbinu Š. Na otáčivý stolek S se kladou předměty způsobující změnu chodu paprsků, obvykle hranol nebo mřížka. Dalekohled D užíváme k zachycení směru vystupujícího paprsku.

Určení mřížkové konstanty

Při určování mřížkové konstanty optické mřížky postupujeme následujícím způsobem. Dalekohled goniometru nastavíme do jedné přímky s kolimátorem tak, aby štěrbina kolimátoru byla vidět právě ve středu nitkového kříže dalekohledu. V tom případě splývá optická osa kolimátoru s optickou osou dalekohledu. Na stolek goniometru umístíme mřížku. Tu musíme nastavit tak, aby její rovina byla kolmá k dopadajícímu paprsku. Takto upravený goniometr se nazývá mřížkový spektrometr. Před kolimátor umístíme zdroj světla, jehož vlnové délky známe, např. rtuťovou výbojku.

Abychom korigovali možnou chybu vzniklou nastavením mřížky, budeme odečítat na goniometru úhly φ_1 a φ_2, které určují směry odchýlených paprsků na levou a pravou stranu od nultého řádu a odchylku paprsku α vypočteme ze vztahu

$$\alpha = \frac{1}{2}\left(\varphi_2 - \varphi_1\right). \tag{2}$$

Vybereme ze spektra zvoleného zdroje světla spektrální čáru o známé vlnové délce λ_0. Označíme-li odchylku paprsku α_0, lze úpravou rovnice (1) vypočítat mřížkovou konstantu

$$a = \frac{n\,\lambda_0}{\sin\alpha_0}. \tag{3}$$

Chceme-li stanovit nejistotu mřížkové konstanty, najdeme ji jako nejistotu vypočtené veličiny. Obecná funkce v příslušném vzorci je dána rovnicí (3). Pak je

$$\triangle a = \sqrt{\left(\frac{n}{\sin\alpha_0}\,\triangle\lambda_0\right)^2 + \left(\frac{n\lambda_0\cos\alpha_0}{\sin^2\alpha_0}\,\triangle\alpha_0\right)^2}\,. \tag{4}$$

Jelikož pro malé úhly (cca do 5°) platí poměrně přesně $\sin\alpha = \alpha$ (pokud α je vyjádřeno v radiánech), lze vztah (4) přepsat do jednoduššího tvaru

$$\triangle a = a\sqrt{\left(\frac{\triangle\lambda_0}{\lambda_0}\right)^2 + \left(\cos\alpha_0\,\frac{\triangle\alpha_0}{\alpha_0}\right)^2}\,. \tag{5}$$

Nejistota vlnové délky λ_0 se stanoví jako nejistota její tabulkové hodnoty (nejistota typu B). Nejistota odchylky α_0 se najde jako nejistota typu A z opakovaných měření a to tak, že čteme střídavě hodnoty φ_1 a φ_2. Stanovíme z nich střední hodnoty $\bar{\varphi}_1$ a $\bar{\varphi}_2$ a jejich nejistoty $\triangle\varphi_1$ a $\triangle\varphi_2$. Střední hodnoty $\bar{\varphi}_1$ a $\bar{\varphi}_2$ dosadíme do (2) a najdeme odchylku α. Její nejistota $\triangle\alpha$ bude vzhledem k tvaru (2) přibližně

$$\triangle\alpha = \frac{1}{2}(\triangle\varphi_1 + \triangle\varphi_2)\,. \tag{6}$$

Je potřeba ještě upozornit, že hodnoty φ_1 a φ_2 měříme v míře úhlové, tedy ve stupních, minutách a vteřinách. Rovněž tak dostáváme i α_0 a $\triangle\alpha_0$. Ve vzorci (4) je však nutno převést $\triangle\alpha_0$ do míry obloukové!

Měření vlnové délky světla

Známe-li již mřížkovou konstantu a a změříme odchylku paprsku α (stejně jako v předchozím případě) pro neznámý zdroj světla, můžeme z podmínky (1) vypočítat vlnovou délku světla

$$\lambda = \frac{a\,\sin\alpha}{n}. \tag{7}$$

Nejistotu vlnové délky bychom dle rovnice (7) a zákona šíření nejistot určili

$$\triangle\lambda = \sqrt{\left(\frac{\sin\alpha}{n}\,\triangle a\right)^2 + \left(\frac{a\cos\alpha}{n}\,\triangle\alpha\right)^2} = \lambda\sqrt{\left(\frac{\triangle a}{a}\right)^2 + \left(\cos\alpha\,\frac{\triangle\alpha}{\alpha}\right)^2}\,.. \tag{8}$$

Při stanovení úhlu α a jeho nejistoty postupujeme stejně jako u hodnot α_0 a $\triangle\alpha_0$.