Úloha 22

Studium difrakce světla (ohybu) na mřížce

Zadání

1) Určete mřížkovou konstantu optické mřížky na průchod a její nejistotu použitím monochromatického světla He-Ne laseru.

2) Pomocí optické mřížky stanovte z prvého řádu maxim viditelného světla přibližné vlnové délky červené, žluté, zelené, fialové oblasti a obou okrajů viditelného spektra. Porovnejte tyto vlnové délky s teoretickými hodnotami.

3) Pomocí polarizačního filtru stanovte polarizační rovinu světla He-Ne laseru.

Teorie

Světlo je elektromagnetické vlnění. Vlnová optika se zabývá jevy, které souvisí s vlnovou podstatou světla. Projevem vlnových vlastností světla je interference, ohyb (difrakce) a polarizace světla. Na rozdíl od geometrické optiky vlnová optika řeší jevy související s chováním světla na překážkách, jejichž rozměry jsou srovnatelné s vlnovou délkou použitého světla. V této souvislosti připomeňme Huygensův princip, který popisuje mechanismus šíření světla prostorem.
Interferencí světla rozumíme skládání světelných vln dvou či více světelných svazků, čímž vzniká interferenční pole, ve kterém se střídají geometrická místa s největší (interferenční maximum) a s nejmenší (interferenční minimum) intenzitou. Aby mohlo dojít k interferenci světla, musí být splněny následující předpoklady:

- Zdroje interferujícího světla musí být **koherentní,** tj. musí vyzařovat světlo s konstantním fázovým rozdílem.
- Světlo musí být **monochromatické** nebo alespoň **kvazimonochromatické.**
- Pro interferující svazky musí platit **princip superpozice**, což znamená, že musí být vytvořeny podmínky pro vektorové sčítání elektrických a magnetických složek těchto vlnění.

Ohyb světla (difrakce) se nazývá jev odchýlení světla od přímočarého směru šíření, např. dostává-li se světlo po dopadu na překážku do oblasti jejího geometrického stínu. Přesná teorie difrakce vychází z řešení Maxwellových rovnic s použitím okrajových podmínek, které charakterizují tvar a vlastnosti předmětu, na němž difrakce nastává. Matematické obtíže tohoto přístupu jsou ohromné a řešení je možné jen v nejjednodušších případech. Mnohem názornější a pro běžné případy zcela vyhovující je přístup vycházející z Huygensova principu, na jehož základě je proveden dále uvedený výklad. Podle stupně přiblížení se rozlišují dvě třídy difrakčních jevů Fraunhoferova difrakce a Fresnelova difrakce. Fraunhoferova difrakce nastává v případě, kdy jsou vlnoplochy difraktovaného světelného svazku rovinné v rovině překážky, na které dochází k difrakci (ohybu).

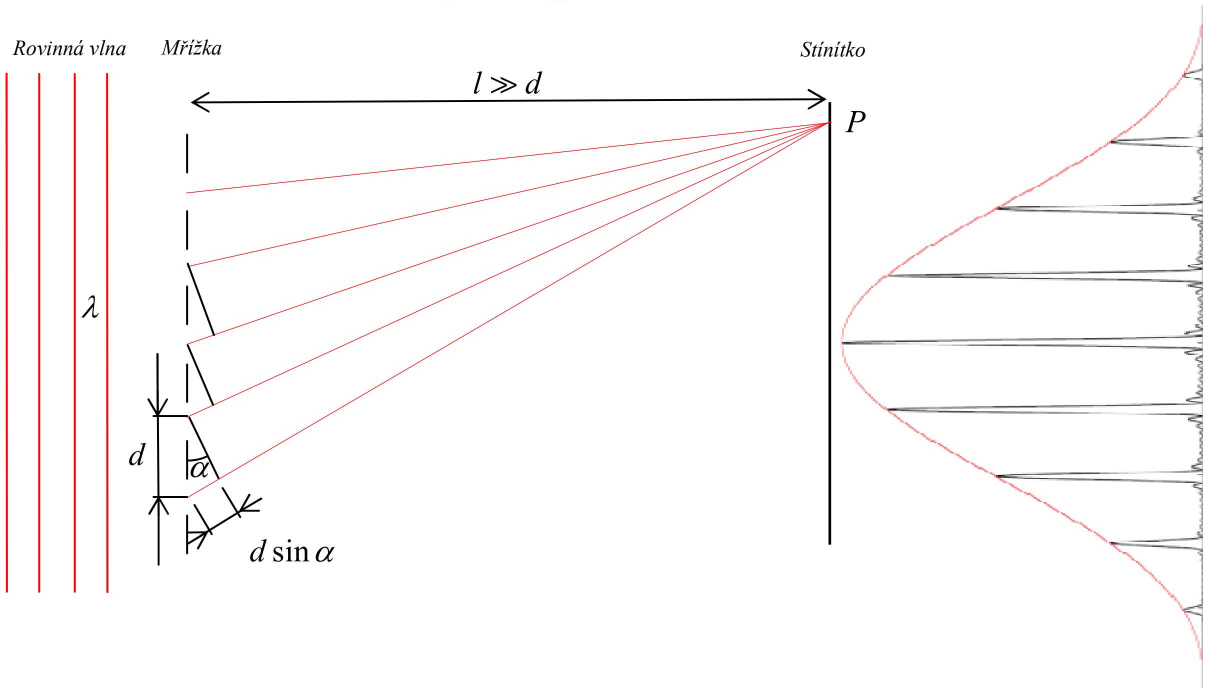
Optická mřížka M je zařízení, sestávající z velkého počtu stejných a stejně od sebe vzdálených uspořádaných objektů, na nichž dochází k ohybu světla. Optická mřížka na průchod sestává z velkého počtu stejně širokých a stejně vzdálených štěrbin, realizovaných nejčastěji systémem rovnoběžných vrypů na skle. Vzdálenost sousedních štěrbin d se nazývá **mřížková konstanta** a její převrácená hodnota udává počet vrypů na jednotku délky. U dobrých mřížek bývá toto číslo řádu několika set.

Funkci a užití mřížky si ukážeme na mřížce na průchod. Celkový počet štěrbin označíme N.
Osvětlíme-li mřížku svazkem rovnoběžných paprsků o vlnové délce λ, pak na každé štěrbině dojde k ohybu a zároveň záření ze všech štěrbin spolu interferuje a to vede ve velké vzdálenosti l od mřížky ke vzniku interferenčního obrazce.

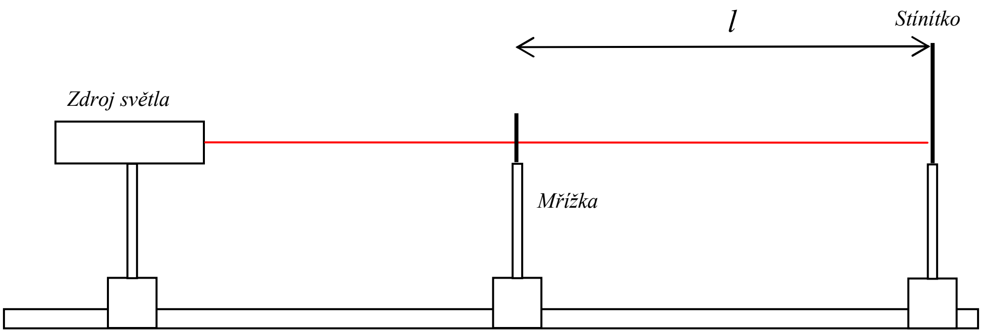
Dopadá-li kolmo na rovinu mřížky monochromatické záření, pak se každý bod vlnoplochy stává podle Huygensova principu zdrojem nového elementárního záření se stejnou vlnovou délkou. Toto záření se šíří za mřížkou všemi směry, ale lze zaznamenat některé významné směry šíření, ve kterých dochází ke vzájemnému zesilování v důsledku interference. Dráhový rozdíl, který mají interferující paprsky v bodě P (obr. 1), závisí na úhlu α. Pro úhel α_k, který splňuje vztah

$$d \sin \alpha_i = i\lambda, \text{ pro } i = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots \qquad (1)$$

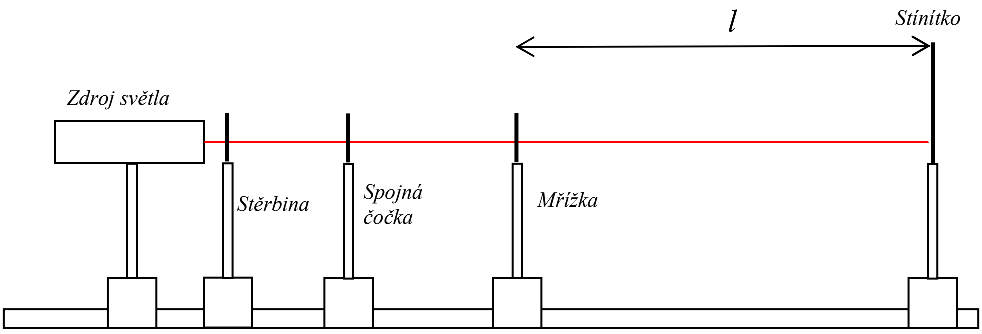
jsou kmity všech paprsků v bodě P ve fázi a interferencí v něm vznikne výrazné maximum intenzity světla. V rovnici (1) značí d mřížkovou konstantu, λ vlnovou délku dopadajícího světla a i je řádem difrakčního maxima. Na obr. 2 je znázorněno schéma experimentálního uspořádání pro měření difrakčních jevů na mřížce.



Obr. 1 Ilustrace ohybu a interference světla na optické mřížce s rozdělením intenzit jednotlivých ohybových maxim.



Obr. 2 Experimentální uspořádání měření s mřížkou a laserem



Obr. 3 Experimentální uspořádání měření s mřížkou a zdrojem bílého světla

Obr. 4 Fotografie pracoviště úlohy

Měření

Vlnová délka záření použitého laseru v prvním úkolu je $\lambda = 632{,}9\,\text{nm}$. Vzdálenost mezi polohou mřížky a stínítka volte v intervalu od $0{,}5\,\text{m} - 0{,}7\,\text{m}$. Při vhodném nastavení mřížky (kolmém k optické lavici) odečtěte polohy všech difrakčních maxim v obou směrech na stínítku. Za hodnotu vzdálenosti poloh příslušných maxim od nulového maxima vezměte aritmetický průměr jejich vzdáleností z obou stran. Mřížkovou konstantu určíme ze vztahu pro každé difrakční maximum

$$d_i = \frac{i\,\lambda}{\sin\alpha_i}, \tag{2}$$

kde za i dosazujeme pořadové číslo difrakčního maxima, $\sin\alpha_i$ je dán vztahem

$$\sin\alpha_i = \frac{x_i}{\sqrt{x_i^2 + l^2}}, \tag{3}$$

kde x_i je průměrná vzdálenost i-tého maxima (určená z obou poloh) od nultého maxima, l je pevná vzdálenost mezi polohou mřížky a stínítka v experimentálním uspořádání. Z vypočtených hodnot d_i určíme průměrnou hodnotu mřížkové konstanty $\overline{d}$ a pro hodnotu d_i, která bude nejblíže hodnotě $\overline{d}$ určíme její nejistotu typu B.

V druhém úkolu použijte jako zdroj bílého světla nízkonapěťovou žárovku a proměřte difrakční maxima prvního řádu na obou stranách od nultého maxima. V tomto uspořádání je třeba použít stěrbinu a čočky k vytvoření úzkého světelného svazku, který až pak necháme dopadat na mřížku.
Porovnejte jeho barvu s nultým maximem u bílého světla a u monochromatického zdroje v předchozím úkolu.
Proměřte polohy fialového okraje a červeného okraje viditelného světla, střed fialové, žluté, zelené a červené oblasti spektra.
Mřížkové konstanta použité mřížky v tomto úkolu je dána údajem 600 vrypů na mm. Určete vlnové délky těchto oblastí a porovnejte je se známými spektrálními údaji. Tato část úlohy slouží k demonstraci rozkladu světla mřížkou, která se často používá v optických spektrálních přístrojích (obvykle v monochromátorech, spektrofluorimetrech apod.) jako disperzní prvek.

Střední hodnoty vlnových délek jednotlivých pásů barev ve viditelném spektru ($3{,}6.10^{-7}\,m - 7{,}8.10^{-7}\,m$)

barva fialová:	$4{,}1\,.10^{-7}\,\text{m}$
barva zelená:	$5{,}3\,.10^{-7}\,\text{m}$
barva žlutá:	$5{,}9\,.10^{-7}\,\text{m}$
barva červená:	$7{,}1\,.10^{-7}\,\text{m}$

V třetí části úkolu studujte polarizaci světla. Polarizace je projevem vlnového charakteru světla. Pomocí polarizátoru sledujeme rozdíl mezi polarizovaným světlem laseru a nepolarizovaným světlem žárovky. Polarizátor je optický prvek, který propouští pouze složku světla polarizovanou v jeho polarizační rovině. Dopadá-li na polarizátor nepolarizované světlo, je toto světlo po průchodu tímto prvkem polarizováno. U nepolarizovaného světla tak lze vybrat jakýkoliv směr polarizace. Naopak je tomu u záření laseru, které bývá obvykle lineárně polarizováno. Je-li rovina polarizace dopadajícího světla rovnoběžná s polarizační rovinou filtru, prochází světlo prakticky beze ztrát, jsou-li tyto roviny navzájem kolmé, je dopadající světlo v polarizátoru silně pohlceno. Ověřte tuto vlastnost laserového záření metodou zkřížených polarizačních filtrů.

Nejistoty měření

Mřížková konstanta d je nepřímo měřená veličina, kterou vypočítáme z přímo měřených veličin λ, x a l. Z charakteru vyhodnocení vyplývá, že budeme určovat standardní nejistotu typu B. Pro zjednodušení výpočtu odhadneme přímo nejistotu výrazu $s = \sqrt{x^2 + l^2}$. Předpokládáme-li, že hodnota vlnové délky He-Ne laseru je dostatečně přesně určena, relativní nejistota u_{rdB} souvisí s nejistotami u_{rxB} a u_{rsB}. Ty můžeme odhadnout z maximálních chyb, kterých se dopouštíme při měření pásovým měřidlem s nejmenším dílkem $1\,\mathrm{mm}$. Maximální chybu určení veličiny x_i odhadneme tedy $m(x_i) = 3\,\mathrm{mm}$. Maximální chybu určení veličiny s odhadneme $m(s) = 3\,\mathrm{mm}$. Pro relativní nejistotu typu B mřížkové konstanty d platí následující vztah

$$u_{rdB} = \sqrt{u_{rxB}{}^2 + \frac{1}{4} u_{rsB}{}^2}\,. \tag{4}$$

Literatura: Kohout Z., Budinská Z., Králová R., Pospíšil J., Bláhová I., Solar M.: *Laboratorní cvičení z fyziky*. 1vyd. Praha: ČVUT 2003.