VYŠETROVANIE DIFRAKCIE SVETLA VYUŽITÍM LASERA

doc. Ing. Július Štelina, CSc.

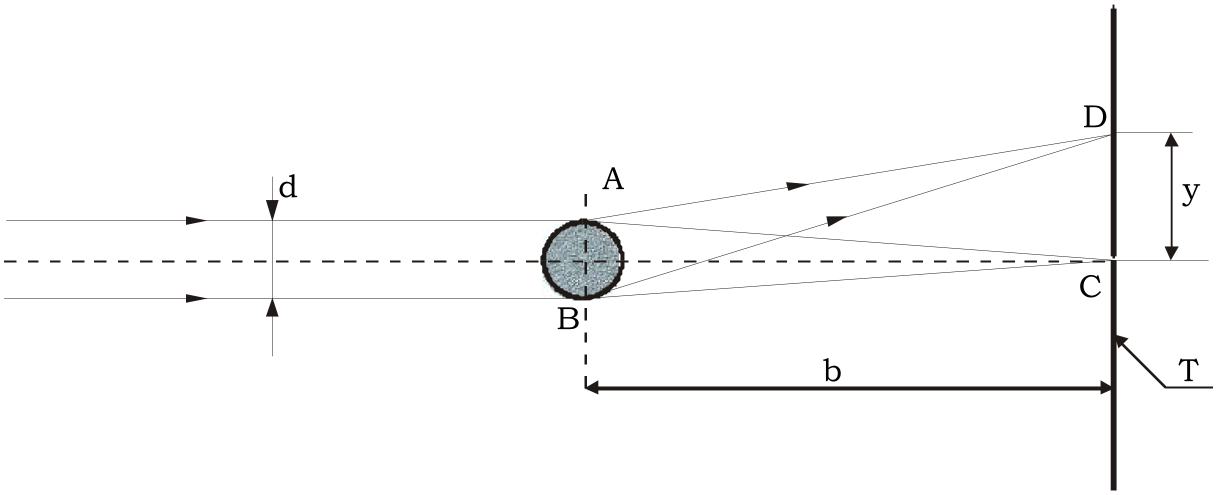
Teoretický úvod:
Pod difrakciou (ohybom) svetla rozumieme vo všeobecnosti jav, pri ktorom sa svetlo v homogénnom prostredí nešíri priamočiaro. Môžeme ho pozorovať napr. tak, že osvetlíme nejakú ostrú hranu bodovým zdrojom svetla. Na tienidle potom prechod z oblasti svetla do tieňa je postupný, pričom sa striedajú svetlejšie a tmavšie pruhy, ktoré sú stále bližšie k sebe a postupne sa strácajú.

V tejto úlohe sa budeme zaoberať štúdiom difrakcie svetla na: 1. vlákne, 2. štrbine s premennou šírkou a 3. optickej mriežke.
Ako zdroj svetla využijeme polovodičový laser s výkonom cca 3mW a vlnovou dĺžkou λ = 680 nm.

A. DIFRAKCIA SVETLA NA VALCOVOM VLÁKNE.

Valcové vlákno s priemerom d osvetlíme monochromatickým svetlom lasera tak, ako je to schématicky znázornené na obr. 1. Na tienidle T, ktoré je vo vzdialenosti b pozorujeme, že tieň nie je úplne tmavý a že hlavný tieň je obklopený svetlými a tmavými prúžkami. Okrem toho stred tieňa, ktorý by podľa očakávania geometrickej optiky mal byť najtmavší, má práve v strede jasný prúžok.

Nech body A, B sú okraje vlákna (obr. 1), v ktorých sa dopadajúce svetlo dotýka vlákna. Podľa Huygensovho princípu môžeme tieto body považovať za zdroje svetla tej istej vlnovej dĺžky a tej istej fáze. Z nich teda vychádzajú lúče všetkými smermi. V bode C na tienidle sa stretnú lúče



Obr. 1

z bodov A, B s dráhovým rozdielom rovným nule a teda výsledkom ich vzájomnej interferencie je zosilnenie (svetlý prúžok). Ak v bode D na tienidle, vzdialenom od bodu C o y, bude dráhový rozdiel lúčov, ktoré vychádzajú z bodov A, B rovný nepárnemu násobku počtu polvĺn, potom sa svetlo interferenciou zoslabuje, prípadne ruší, a preto sa tam objaví tmavý prúžok. Pre body D, v ktorých dopadajúce lúče majú dráhový rodziel rovný párnemu násobku vlnovej dĺžky, dochádza k zosilneniu. svetla. Svetlým prúžkom potom hovoríme difrakčné maximá a tmavým difrakčné minimá. Z geometrie obrázku je možné odvodiť vzťah pre polohu difrakčného maxima

$$y_{k\,max} = 2k\frac{b}{d}\frac{\lambda}{2} \qquad (1)$$

a pre difrakčné minimum

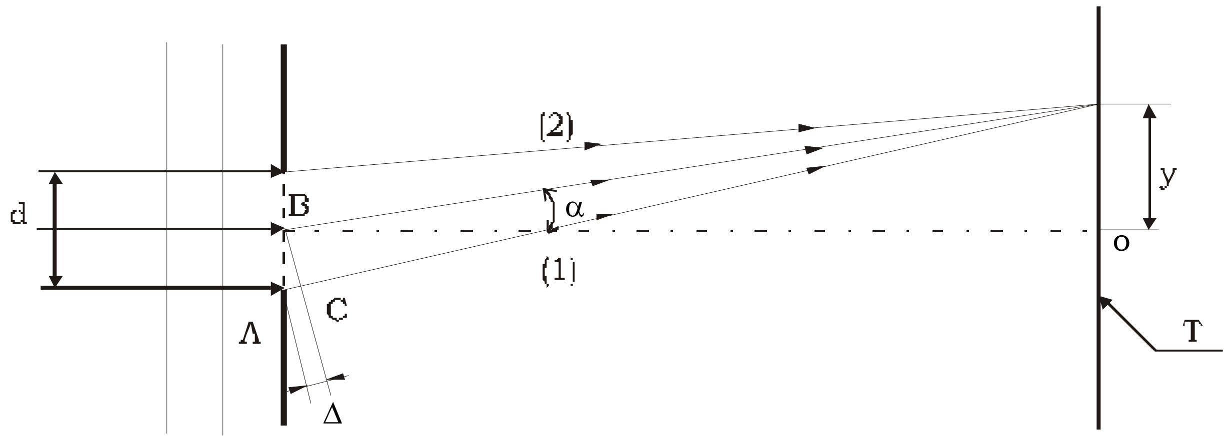
$$y_{k\,min} = (2k-1)\frac{b}{d}\frac{\lambda}{2} \tag{2}$$

.

V týchto vzťahoch je λ vlnová dĺžka svetla laserového lúča, k je celé číslo a má hodnotu k=1 pre prvý prúžok, k=2 pre druhý prúžok, atď. Tiež hovoríme, že k udáva rád maxima, resp. minima. Intenzita svetelných prúžkov s narastajúcim y klesá.

B. DIFRAKCIA SVETLA V ŠTRBINE.

Predstavme si, že nepriehľadná stena má štrbinu šírky d. Ak na túto stenu dopadá rovinná harmonická vlna, vychádzajú podľa Huygensovho princípu z jednotlivých bodov štrbiny elementárne valcové svetelné vlny.



Obr. 2

Uvažujme svetelné lúče (1) a (2) na obr. 2. Pretože bod B leží v strede štrbiny, potom pre úsečku AC = Δ platí, AC = Δ = $(d/2)\ \sin\alpha$. Táto úsečka predstavuje dráhový rozdiel medzi uvažovanými lúčmi svetla, ktoré po prechode šošovkou na tienidle v mieste y od osi symetrie interferujú.

Keď teda

$$\frac{d}{2}\sin\alpha = \frac{\lambda}{2}, \tag{3}$$

potom svetelné lúče (1) a (2) sa pri interferencii navzájom kompenzujú. Tiež sa kompenzujú aj všetky ostatné dvojice lúčov, ktoré zo štrbiny vychádzajú vo vzájomnej vzdialenosti $d/2$. Difrakčné minimum v mieste y vznikne teda pre všetky lúče, ktoré vystupujú zo štrbiny pod uhlom α_{min}, pričom je splnený vzťah

$$\sin\alpha_{min} = \frac{\lambda}{d}. \tag{4}$$

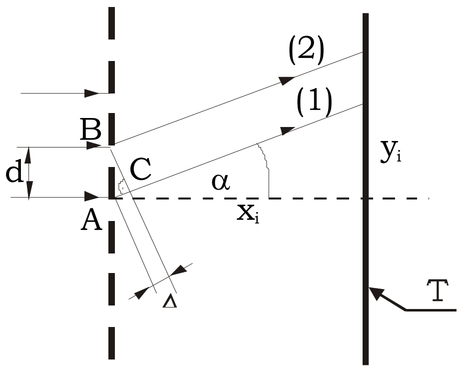
Podobnou úvahou môžeme odvodiť vzťah pre prvé vedľajšie maximum (t.j. 1. svetelný pruh smerom od osvetleného stredu), ktoré vzniká interferenciou lúčov, ktoré zo štrbiny vystupujú pod uhlom α_{max} spĺňajúce vzťah

$$\sin\alpha_{max} = \frac{3}{2}\frac{\lambda}{d}. \tag{5}$$

Treba si uvedomiť, že pre malý pomer λ/d sú aj uhly α_{min} a α_{max} malé a teda celý interferenčný obraz je koncentrovaný do nepatrného priestoru na rozhraní svetla a tieňa. Inými slovami, dobre viditeľné interferenčné obrazce dosiahneme vtedy, keď je šírka štrbiny d porovnateľná s vlnovou dĺžkou, t.j. keď pomer $\lambda/d \doteq 1$. Preto d nemá byť podstatne väčšie ako λ, lebo potom nemožno, alebo len veľmi ťažko, ohyb svetla pozorovať. O tejto skutočnosti sa môžeme presvedčiť, keď použijeme štrbinu s premennou šírkou.

C. DIFRAKCIA SVETLA NA MRIEŽKE.

Optická mriežka je sklenená doska, na ktorej je vyryté niekoľko sto vzájomne rovnobežných a rovnako vzdialených vrypov na jeden mm dĺžky. Vrypy predstavujú nepriehľadné miesta, pričom medzery medzi nimi sa uplatňujú ako štrbiny. Vzdialenosť stredov dvoch susedných vrypov d (alebo vzdialenosť stredov dvoch susedných štrbín, pozri obr. 3) je tzv. mriežkový parameter. Optickú mriežku je tiež možno realizovať fotografickou cestou na celuloidovom filme. Schematicky je mriežka znázornená na obr. 3



Obr. 3

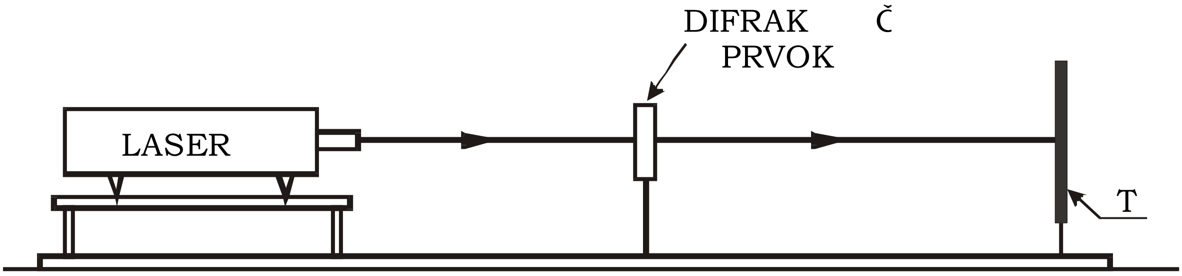
Nech na optickú mriežku dopadá kolmo monochromatický zväzok rovnobežných svetelných lúčov (obr. 3). Všetky body v jednotlivých štrbinách mriežky sa podľa Huygesovho princípu stávajú zdrojmi elementárnych vĺn, ktoré sa šíria za mriežkou na všetky strany. Na mriežke vzniká ohyb svetla, ktorý sa na tienidle prejaví vznikom interferenčného obrazca. Poloha maxím a miním pri tomto ohybe svetla závisí len od mriežkoveho parametru d. Keď opäť uvážime lúče (1) a (2), ktoré vychádzajú z bodov A, B mriežky a zvierajú s pôvodným smerom postupu svetla uhol α, bude dráhový rozdiel medzi týmito lúčmi $\Delta = AC = d.\sin\alpha$. Keď sa tento dráhový rozdiel rovná práve vlnovej dĺžke použitého svetla, alebo celočíselnému násobku vlnovej dĺžky, potom sa interferenciou zosilňujú nielen tieto dva lúče, ale aj všetky ostatné lúče, ktoré vychádzajú z jednotlivých štrbín mriežky pod tým istým uhlom α, ak sme ich spojnou šošovkou sústredili do jedného miesta tienidla. Difrakčné maximá intenzity osvetlenia vznikajú teda vo všetkých smeroch lúčov, pre ktoré je splnený vzťah

$$d \sin\alpha = k\lambda \tag{6}$$

kde k je celé číslo $k = 1, 2, 3, \dots$.
Podľa toho aká hodnota prislúcha číslu k, hovoríme o maxime prvého, druhého atď. až k-tého rádu. Podobnou úvahou je možné ukázať, že vo všetkých ostatných smeroch, ktoré nespĺňajú vzťah (6) sa interferenciou svetlo ruší, a teda v týchto smeroch sa svetlo nešíri.

Pomocou vzťahu (6) môžeme ľahko určiť vlnovú dĺžku použitého svetla (napr. lasera) ak z merania určíme uhol α odchyľujúceho lúča príslušného maxima pri známom mriežkovom parameteri. Je možný aj opačný postup, t.j. určenie mriežkového parametra d pri známej vlnovej dĺžke λ.

Popis meracieho zariadenia:
Pre meranie využijeme zariadenie schematicky znázornené na obr. 4. Pre štúdium difrakcie táto zostava pozostáva z optickej lavice, polovodičového lasera a prvku, na ktorom dochádza k difrakcii (vlákno, štrbina, optická mriežka). Na optickej lavici je lišta s milimetrovou stupnicou a posuvným bežcom, pomocou ktorých určujeme vzdialenosť difrakčného prvku od tienidla T.



Obr. 4

Laserom je možné posúvať v smere kolmom na optickú os a potom ho zafixovať. Svetelný lúč po difrakcii napr. na vlákne (štrbine, mriežke) pripevnenom v špeciálnom prípravku dopadá na tienidlo alebo matnicu, na ktorom je možné pomocou mm stupnice určovať polohu jednotlivých maxím resp. miním intenzity svetelného lúča.

Pretože rez laserového lúča je kruhový, difrakčné maximá nebudú mať tvar prúžkov, ale kruhov.

Upozornenie: I keď výkon laserového zväzku je v tomto prípade len 3 mW, musíme byť pri meraní veľmi opatrní. Laserové žiarenie je pre ľudské oko veľmi nebezpečné. Nikdy nesmieme z optickej lavice demontovať tienidlo, pokiaľ je laser v prevádzke!

Metóda merania a postup pri meraní:

Napájací zdroj lasera pripojíme k sieťovému zdroju. Do zvolenej vzdialenosti napr. 0,50 m od tienidla na optickej lavici umiestnime difrakčný prvok (vlákno, štrbinu, optickú mriežku). Ak sa jedná napr. o štrbinu po zmačknutí spínača lasera posúvame priečne na optickú lavicu držiak štrbiny tak, aby stred laserového lúča dopadal na stred štrbiny. Na tienidle potom pozorujeme priamy zväzok ako nulté difrakčné maximum a vo vzdialenosti niekoľkých centimetrov vpravo i vľavo pozorujeme difrakčné maximá vyšších rádov, ktorých polohu y_i (ich stredy) môžeme určiť na stupnici. Vzdialenosť štrbín od tienidla je daná súradnicou x_i na stupnici optickej lavice. Znalosť súradníc x_i a y_i nám umožňuje určiť $sin\alpha_i$ podľa vzťahu

$$sin\alpha_i = \frac{y_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}} . \tag{7}$$

Po dosadení vzťahu (7) do vzťahu (5) získame vzťah pre výpočet šírky štrbiny, t.j.:

$$d = \frac{3}{2} \frac{\lambda \sqrt{x_i^2 + y_i^2}}{y_i} . \tag{8}$$

Ak pre štúdium difrakcie ako difrakčný prvok použijeme tenké vlákno, postupujeme podobne. Potom po odčítaní polohy y_i difračného maxima a vzdialenosti b_i t.j. polohy vlákna od tienidla pomocou vzťahu (1) určíme priemer (hrúbku) daného vlákna d. Pre prípad, že pri meraní využívame 1. difrakčné maximum bude vo vzťahu (1) $k = 1$.

Keď difrakčným prvkom bude optická mriežka, popísaným postupom môžeme určiť mriežkový parameter d podľa vzťahu (6), ak $sin\alpha$ určíme analogicky ako sme to popísali pri štrbine, t.j. použijeme vzťah (7), a tento dosadíme do (6). Potom napr. pri meraní na prvom difrakčnom maxime $k = 1$ a výpočet realizujeme podľa vzťahu

$$d = \lambda \frac{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}}{y_i} = \lambda \sqrt{1 + \left(\frac{x_i}{y_i}\right)^2} \ . \tag{9}$$

Merania vykonáme pre $i = 1, 2, \ldots, 10$ polôh difrakčného prvku na optickej lavici.

Úlohy:

1. Využitím difrakčného obrazca určite hrúbku d rôznych vzoriek valcových vlákien. Pre výpočet použite vzťah (1).
2. Využite štrbinu s premennou šírkou:
   a) Menením šírky štrbiny zistite, kedy je už difrakcia pozorovateľná voľným okom.
   b) Voľte postupne rôzne šírky štrbiny a z difrakčného obrazca stanovte ich príslušné hodnoty.
3. Určite mriežkový parameter danej mriežky.

Spracovanie výsledkov:

Odčítané súradnice b_i, x_i, y_i pre rôzne polohy difrakčných prvkov spracujeme do tabuliek.

a) Vlákno:

i	b_i [m]	y_i [m]	d_i [m]	Δ_i [m]	Δ_i^2 [m^2]
1				$\Delta_1 = d_1 - \bar{d}$	Δ_1^2
2				$\Delta_2 = d_2 - \bar{d}$	Δ_2^2
.				.	.
			$\bar{d}$		$\sum_{i=1}^{n} \Delta_i^2$

b) c) Štrbina, mriežka

ix	x_i [m]	y_i [m]	sin α	d_i [m]	Δ_i [m]	Δ_i^2 [m^2]
1				d_1	$\Delta_1 = d_1 - \bar{d}$	
2				d_2		
.						
				$\bar{d}$		$\sum_{i=1}^{n} \Delta_i^2$

Stredná hodnota $\bar{d}$ v prípade a) reprezentuje skutočnú hodnotu (hrúbku) meraného vlákna. Stredná kvadratická chyba aritmetického priemeru je potom daná vzťahom

$$\delta_{\bar{d}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta_i^2}{n(n-1)}} \ , \tag{10}$$

kde n je počet meraní. Hrúbku meraného vlákna potom vyjadríme $d = \bar{d} \pm \delta_{\bar{d}}$.

Analogicky postupujeme v prípade b) a c), keď difrakcia vzniká na štrbine alebo na optickej mriežke.

Kontrolné otázky:

1. Vysvetlite vznik difrakcie svetla na valcovom vlákne.
2. Využitím vzťahu (1) napíšte vzťah pre hrúbku vlákna d.
3. Vysvetlite vznik difrakcie svetla na štrbine.
4. Čo je to optická mriežka?
5. Vysvetlite vznik difrakcie na optickej mriežke.
6. Čo je to difrakčné maximum (minimum)?
7. Využitím vzťahov (4) a (5) napíšte vzťahy pre k-té difrakčné minimum (maximum).
8. Čo je to rád maxima?

Úloha je prevzatá, doplnená a opravená, zo skrípt:

Doc. RNDr. Drahoslav Vajda, CSc., Doc. Ing. Július Štelina, CSc., RNDr. Jaroslav Kovár, Ing. Ctibor Musil, CSc., RNDr. Ivan Bellan, Doc. Ing. Igor Jamnický, CSc. *„Návody k laboratórnym cvičeniam z fyziky"*, vydala Žilinská univerzita vo vydavateľstve EDIS, 2. nezmenené vydanie, rok 2003.