

Praktikum C – Optika

Zadání úloh

Obsah

1 Měření parametrů zobrazovacích soustav	4
Úkol:	4
Klíčová slova	4
Uspořádání experimentu	4
Pomůcky	4
Teorie	5
Poznámky	9
Postup práce	9
Kontrolní otázky	10
Literatura	10
2 Měření stočení polarizační roviny polarimetrem	11
Úkol:	11
Klíčová slova	11
Uspořádání experimentu	11
Pomůcky	11
Teorie	12
Poznámky	14
Postup práce	14
Kontrolní otázky	15
Literatura	15
3 Měření vlnových délek světla mřížkovým spektrometrem	16
Úkol:	16
Klíčová slova	16
Uspořádání experimentu	16
Pomůcky	16
Teorie	17
Poznámky	22
Postup práce	22
Literatura	23
4 Harmonické kmity	24
Úkol:	24
Klíčová slova	24
Uspořádání experimentu	24
Pomůcky	24
Teorie	25
Postup práce	26
Literatura	27
5 Měření indexu lomu univerzálním refraktometrem	28
Úkol:	28
Klíčová slova	28
Uspořádání experimentu	28
Pomůcky	28
Teorie	29
Poznámky	35
Postup práce	36
Literatura	36
6 Studium fotoelektrického jevu	37
Úkol:	37
Klíčová slova	37
Uspořádání experimentu	37
Pomůcky	37
Teorie	38
Poznámky	42
Postup práce	42
Literatura	42
7 Měření absorpce světla roztoků spektrofotometrem SPEKOL	43
Úkol:	43
Klíčová slova	43
Uspořádání experimentu	43

Pomůcky.	43
Teorie.	44
Poznámky.	48
Postup práce.	48
Literatura.	49
8 Základní vlastnosti optického vlákna.....	50
Úkol:	50
Klíčová slova.	50
Uspořádání experimentu.....	50
Pomůcky.	50
Teorie.	50
Poznámky.	54
Literatura.	57
9 Měření indexu lomu kapalin pomocí dutého zrcadla.....	58
Úkol:	58
Klíčová slova.	58
Uspořádání experimentu.....	58
Pomůcky.	58
Teorie.	59
Poznámky.	62
Postup práce.	62
Literatura.	63
10 Studie Fraunhoferova ohybu laserového světla.	64
Úkol:	64
Klíčová slova.	64
Uspořádání experimentu.....	64
Pomůcky.	64
Teorie.	65
Poznámky.	68
Postup práce.	69
Kontrolní otázky.	69
Literatura.	69

1 Měření parametrů zobrazovacích soustav

Úkol:

- Určení ohniskové vzdálenosti spojky přímou metodou;
- Určení ohniskové vzdálenosti spojky Besselovou metodou;
- Určení ohniskové vzdálenosti spojky metodou příčného zvětšení;
- Srovnání výsledků měření 1, 2, a 3;
- Určení ohniskové vzdálenosti rozptylky.

Klíčová slova.

Ohnisková vzdálenost, rozlišovací schopnost, světelnost, hloubka ostrosti, čočka.



Uspořádání experimentu.

Na optické lavici jsou umístěny čočky, zdroj světla, stínítko a předmět. Po zapnutí zdroje světla paprsek prochází přes předmět a čočky, a na stínítku vzniká jeho obraz. Pomocí různých metod na základě naměřených vzdáleností předmětu a obrazu lze spočítat ohniskové vzdálenosti čoček a rozptylky.



Pomůcky.

Optická lavice s příslušenstvím, zdroj světla, milimetrové měřítko.

Teorie.

Při odvozování vlastností optických zobrazovacích soustav se obvykle nejdříve vyšetřuje průchod paraxiálních paprsků z hlediska zákonů geometrické optiky. Průchod paraxiálních paprsků soustavou je popsán základními zobrazovacími parametry, mezi něž patří hlavní a uzlové body (respektive roviny), ohniska a ohniskové vzdálenosti.

V praxi se však k zobrazování nedužívá jen paraxiálních paprsků a mimoto nás kromě geometrie zobrazení zajímají ještě jiné vlastnosti soustav. Jde zejména o vady, o vyšetřování vlastností, které jsou důsledkem omezení svazků clonami, o světelnost a konečně o vlastnosti, jež jsou důsledkem vlnové povahy světla, tj. o rozlišovací schopnost.

a) Základní zobrazovací parametry.

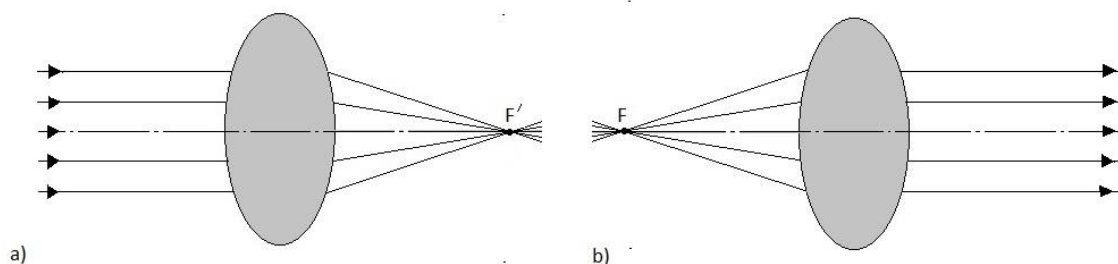


Fig.1. K definici ohniska

Předpokládejme, že na zobrazovací soustavu (Fig.1a) dopadá úzký svazek paprsků rovnoběžných s optickou osou. Po průchodu soustavou se budou paprsky protínat v jistém bodu F' , nazývaném *obrazové ohnisko* soustavy. Obráceně lze najít bod F na optické ose (Fig.1b), který má tu vlastnost, že svazek paraxiálních paprsků z něho vycházejících se po průchodu soustavou přemění ve svazek paprsků rovnoběžných a bude se šířit rovnoběžně s optickou osou. Bod F se nazývá *předmětovým ohniskem* soustavy. Rovina kolmá k optické ose procházející předmětovým, respektive obrazovým ohniskem se nazývá předmětovou, respektive obrazovou ohniskovou rovinou.

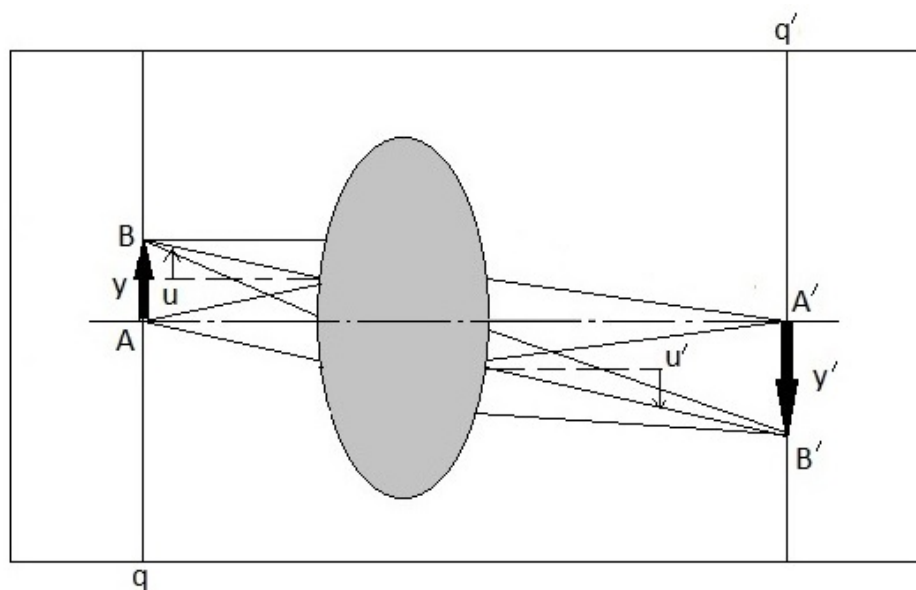


Fig.2. K definici zvětšení

Optické zobrazení v paraxiálním prostoru má tu vlastnost, že obrazem bodu je bod, obrazem přímky přímka a obrazem roviny rovina. Předpokládejme, že je obrazem roviny q , kolmé k optické ose, rovina

q^I , která k ni rovněž kolmá (Fig.2). Obrazem bodů **A**, **B** je body A^I , B^I . Proměr sdružených úseček $y^I = \overline{A^I B^I}$, $y = \overline{AB}$ se nazývá příčným zvětšením β , tedy

$$\beta = \frac{y^I}{y} \quad (1)$$

Poměr úhlů u^I , u , které svírají sdružené paprsky s optickou osou, se nazývá úhlové zvětšení γ , tedy

$$\gamma = \frac{u^I}{u} \quad (2)$$

Mezi uvedenými veličinami platí důležitý vztah, zvaný Helmholtzova-Lagrangeova rovnice

$$Nuy = N^I u^I y^I \quad (3)$$

v němž **N** a **N^I** jsou absolutní indexy lomu prostředí v předmětovém a obrazovém prostoru.

Pro popis vlastností soustavy jsou velmi důležité dvě dvojice sdružených rovin, respektive bodů - hlavní a uzlové roviny, respektive hlavní a uzlové body. *Hlavními rovinami* soustavy nazýváme dvojici sdružených rovin, kolmých k optické ose, pro něž je příčné zvětšení rovno jedné. *Hlavními body* nazýváme průsečíky hlavních rovin s optickou osou. *Uzlovými rovinami* nazýváme dvojici sdružených rovin, kolmých k optické ose, pro něž je úhlové zvětšení rovno jedné. *Uzlovými body* nazýváme průsečíky uzlových rovin s optickou osou.

Poloha hlavních bodů vzhledem k poloze jednotlivých lámavých ploch je obecně různá a je třeba ji zjišťovat výpočtem či měřením pro každý konkrétní případ zvlášť. Závisí na poloměrech křivosti a polohách jednotlivých lámavých ploch a na indexech lomu mezi nimi. V některých speciálních případech je však vztah hlavních bodů k poloze lámavých ploch jednoduchý, takže určování jejich polohy odpadá.

U tenké čočky, jejíž tloušťka je proti poloměrům lámavých ploch zanedbatelná, lze také zanedbat vzájemnou vzdálenost hlavních rovin a jejich vzdálenost od vrcholů lámavých ploch. Oba hlavní body klademe tedy do průsečíku středního řezu čočky s optickou osou. Při výpočtech a konstrukcích obrazu je pak tenká čočka reprezentována rovinou tohoto řezu; k úplnému určení geometrie jejího zobrazení stačí tedy znát ohniskové vzdálenosti. Druhý důležitý případ tvoří tlusté čočky ploskovypuklé (plankonvexní) a ploskoduté (plankonkávni). Jeden z jejich hlavních bodů leží vždy na vrcholu kulové plochy; v bodu, ve kterém lámavá plocha protíná optickou osu. Poloha druhého hlavního bodu, tj. průsečíku hlavní roviny s optickou osou, nezávisí na poloměru křivosti kulové plochy; je pouze funkcí indexu lomu skla a tloušťky čočky.

b) Vady optických soustav.

Svazek Světelných paprsků při průchodu optickou soustavou změní svou strukturu. To znamená, že pro skutečnou soustavu nebude, přesně vzato, obrazem bodu bod, obrazem přímky přímka atd. příčinou toho, že se daná soustava liší od soustavy ideální, jsou různé nedokonalosti v zobrazování skutečnou soustavou, které souborně nazýváme vadami soustavy. Rozdělujeme je podle toho, vznikají-li při zobrazování monochromatickým nebo složeným světlem. V prvním případě mluvíme o vadách monochromatických, ve druhém o vadách barevných či chromatických.

Z vad monochromatických rozeznáváme vadu kulovou (otvorovou), zkreslení, astigmatismus, komu a zklenutí, z vad chromatických vadu polohy a velikosti. Kulová vada a barevná vada polohy se projevují při průchodu paprsků rovnoběžných s optickou osou, ostatní druhy vad při průchodu paprsků mimo-osových.

Kulová vada se projevuje při studiu zobrazení bodu ležícího na optické ose. *Barevné vady* optické soustavy jsou důsledkem toho, že index lomu skla, a tedy i ohnisková vzdálenost soustavy, jsou závislé na vlnové délce světla. Z toho vyplývá, že na vlnové délce budou záviset všechny veličiny, které jsou funkcí ohniskové vzdálenosti. Speciálně bude na ni záviset poloha obrazu a příčné zvětšení. Závislost těchto dvou veličin na vlnové délce světla se v praxi obvykle zjišťuje. V prvním případě mluvíme o barevné vadě polohy, v druhém o barevné vadě velikosti.

c) Omezení svazku procházejícího soustavou.

Světelný svazek je při průchodu optickou soustavou omezen bud ohrubami čoček, nebo zvláštními clonami. Ty jednak omezují průřez světelných svazků, které mohou projít soustavou, jednak vymezují velikost předmětů, jež mohou být soustavou zobrazeny.

d) Světelnost optických zobrazovacích soustav.

V každé reálné optické soustavě nastávají ztráty světelného toku.

e) Rozlišovací schopnost optické zobrazovací soustavy.

Na dokonalost obrazů vytvořených optickými soustavami mají vliv nejen vady těchto soustav, ale i vlnová povaha světla.

Základní metody měření ohniskových vzdáleností tenkých čoček.

Hlavní a uzlové body tenké čočky spolu splývají a leží v průsečíku optické osy s rovinou středního řezu čočky. K úplnému určení geometrie zobrazení tenké čočky stačí tedy znát její ohniskové vzdálenosti.

1) Stanovení ohniskové vzdálenosti tenké spojky z polohy obrazu a předmětu.

Poloha obrazu a předmětu při zobrazení tenkou spojkou je daná zobrazovací rovnicí, která má v případě, že je předmět umístěn "před" ohniskem, tvar

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f} \quad (4)$$

přičemž a , a' jsou vzdálenosti obrazu a předmětu od středu čočky v absolutních hodnotách a f ohnisková vzdálenost. Změříme-li a , a' , můžeme (4) použít k určení ohniskové vzdálenosti f . Platí

$$f = \frac{aa'}{a + a'} \quad (5)$$

2) Stanovení ohniskové vzdálenosti tenké spojky z příčného zvětšení.

Pro příčné zvětšení β platí podle Fig.3.

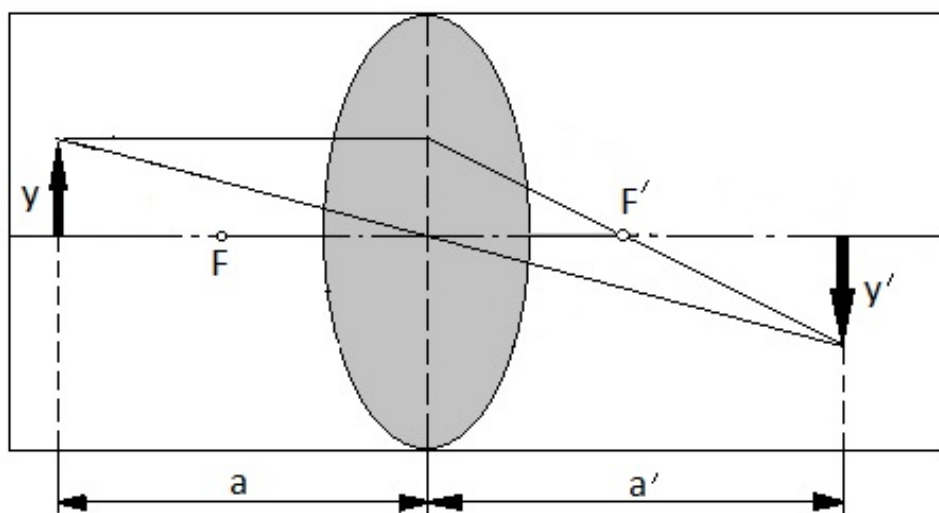


Fig.3. K měření ohniskové vzdálenosti z příčného zvětšení.

$$|\beta| = \left| \frac{y'}{y} \right| = \frac{a'}{a} \quad (6)$$

Přepíšeme-li rovnici (5) do tvaru

$$f = a' \frac{1}{1 + \frac{a'}{a}} \quad (7)$$

a dosadíme-li z rovnice (6), dostaneme pro ohniskovou vzdálenost

$$f = a' \frac{1}{1 + |\beta|} \quad (8)$$

3) Stanovení ohniskové vzdálenosti tenké spojky Besselovou metodou.

V obou předešlých bodech je třeba měřit veličinu a , respektive a' , což jsou vzdálenosti měřené od středu čočky. Přesné měření těchto vzdáleností je v praxi obtížné; výsledky jsou zpravidla zatíženy systematickou chybou.

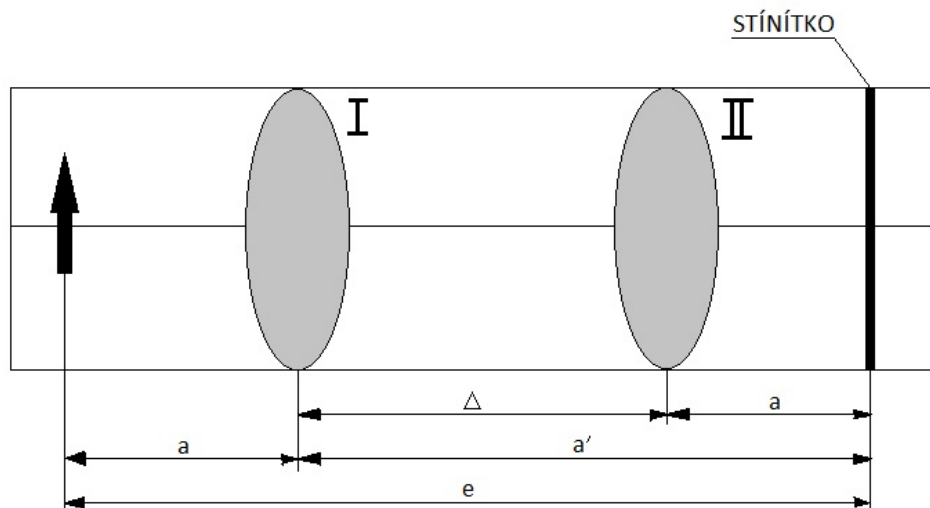


Fig.4. K výkladu Besselovy metody.

Besselova metoda tuto obtíž odstraňuje. Uvažujme uspořádání podle Fig.4. Vzdálenost e předmětu od stínítka ponechme pevnou. Dá se ukázat, že pro $e > 4f$ existují dvě polohy čočky I, II, ve kterých se na stínítku vytvoří ostrý obraz předmětu (v poloze I zvětšený, v poloze II zmenšený). Je patrné, že obě polohy budou položeny symetricky vzhledem ke středu vzdálenosti mezi předmětem a stínítkem. Pak lze psát

$$\begin{aligned} a + a' &= e, \\ a' - a &= \Delta \end{aligned}$$

a dosazením do rovnice (5)

$$f = \frac{e^2 - \Delta^2}{4e} \quad (9)$$

Odtud, změříme-li e , a , Δ , můžeme f vypočítat.

Při měření Besselovou metodou lze užít stejného předmětu jako v bodu 1).

d) Stanovení ohniskové vzdálenosti tenké rozptylky.

Rozptylky vytvářejí vždy neskutečné obrazy skutečných předmětů. Ve všech dosud probraných metodách se však obraz vytvořený měřenou čočkou pozoruje na matnici. Není proto možné žádnou z těchto metod použít k měření ohniskové vzdálenosti rozptylky. V tomto případě se postupuje tak, že se k měřené rozptylce přidá spojka takovým způsobem, aby obě čočky tvořily soustavu s kladnou optickou mohutností.

Uvažujme uspořádání podle Fig.5. Svazek paprsků vycházejících z bodu A předmětu se po projití spojnou čočkou S sbíhá v bodě A' obrazu. Zařadíme-li tomuto svazku do cesty rozptylku R tak, aby bod A' ležel mezi ní a jejím předmětovým ohniskem, nebude se skutečný svazek paprsků sbíhat v bodě A' , nýbrž v bodě A'' . Bod A'' představuje obraz bodu A vytvořený soustavou obou čoček. Pro rozptylku představuje bod A' neskutečný předmět, takže platí zobrazovací rovnice

$$\frac{1}{a'} - \frac{1}{a} = -\frac{1}{f},$$

v níž f je prostá hodnota ohniskové vzdálenosti rozptylky, a , a' vzdálenost předmětu a obrazu, brané rovněž absolutně. Odtud

$$f = \frac{aa'}{a' - a} \quad (10)$$

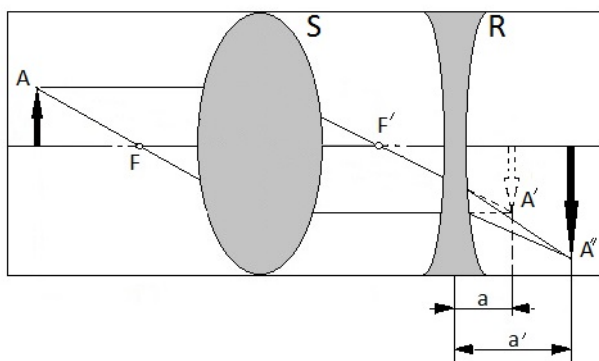


Fig.5. K měření ohniskové vzdálenosti tenké rozptylky.

Poznámky.

- Všechna měření provádějte desetkrát, s přesností na milimetry.
- Měření zpracujte do tabulek. Nezapomeňte uvést písemné označení čočky kterou jste měřili (A, B, C, D). Každá tabulka musí mít výstižný název a veškeré další náležitosti (ustálené zkratky veličin, jejich jednotky a další parametry, z nichž je patrné a ověřitelné vaše statistické zpracování naměřených hodnot).
- V případě statistického zpracování naměřených údajů pomoci kalkulatoru tuto skutečnost uveďte v poznámce za tabulkou, včetně chyby měřidla.
- Pro měření ohniskové vzdálenosti rozptylky se doporučuje použít pomocnou spojku s označením "B" a "D" (rozptylka).

Postup práce.

- 1) Zapněte zdroj světla který je na jednom konci optické lavice.
- 2) Na konci optické lavice před zdrojem světla umístěte předmět.
- 3) Na druhém konci optické lavice umístěte matnici (stínítko), na které se bude tvořit obraz.
- 3) Měření ohniskové vzdálenosti spojky přímou metodou:
 - Umístěte čočku poblíž předmětu a posouvejte ji tak dlouho, až získáte na matnici ostrý obraz.
 - Udělat měření desetkrát a zpracovat do tabulky.
- 4) Měření ohniskové vzdálenosti spojky Besselovou metodou:
 - Osvětlený předmět a stínítko umístíte na optickou lavici v určité vzdálenosti od sebe.
 - Mezi nimi umístěte dvě čočky s určitou vzdáleností a (Fig. 4).
 - Posouváním měřené čočky mezi nimi zjistíme, nejdříve hrubě, dosáhneme-li pro dvě polohy čočky ostrého obrazu na stínítku. V opačném případě musíme vzdálenost stínítka a předmětu zvětšit.
 - Udělat měření desetkrát a zpracovat do tabulky.
- 5) Měření ohniskové vzdálenosti spojky z příčného zvětšení:
 - Jako předmět použijte plastové měřítko, které se bude zobrazovat na matnici opatřené rovněž milimetrovým dělením. Toto uspořádání umožňuje snadno odečítat zvětšení.
 - Z hlediska dosažení maximální přesnosti při měření a' je vhodné volit tuto vzdálenost co největší, a taky musíme brát zřetel na to, aby obraz byl dostatečně veliký.
 - Udělat měření a' a β desetkrát a zpracovat do tabulky.
- 6) Měření ohniskové vzdálenosti rozptylky:
 - Na optické lavici před zdrojem světla umístíte předmět, spojnou čočku a matnici.
 - Posouváním matnice najdeme ostrý obraz zobrazovaného předmětu a změříme jeho polohu.
 - Zařadíte mezi spojnou čočku a nalezený obraz měřenou rozptylku a posouváním matnice najdeme opět ostrý obraz.
 - Změříme polohu tohoto obrazu.
 - Vypočítat vzdálenosti a , a' .

- Udělat měření desetkrát a zpracovat do tabulky.

7) Vypočtete ohniskové vzdálenosti pro každou metodu a srovnejte výsledky pro metody 1), 2), 3).



Kontrolní otázky.

1. Co rozumíme pod pojmem tzv. obrazové a předmětové ohnisko soustavy?
2. Základní zobrazovací parametry?
3. Co jsou Vady optických soustav a jaké Vady existují?
4. Objasněte základní principy Omezení svazku procházejícího soustavou, Světelnost optických zobrazovacích soustav, Rozlišovací schopnost optické zobrazovací soustavy?
5. Základní metody měření ohniskových vzdáleností tenkých čoček a jaký je rozdíl mezi nimi?



Literatura.

BROŽ, J., aj. *Základy fyzikálních měření I.* 1. vyd. Praha: SPN, 1983.

2 Měření stočení polarizační roviny polarimetrem

Úkol:

- V teorii měření popište do protokolu stručně princip a funkci polarimetru;
- Změřte závislost stočení polarizační roviny na koncentraci cukerného roztoku;
- Naměřené hodnoty graficky zpracujte do závislosti úhlu stočení polarizační roviny na koncentraci roztoku;
- Vypočítejte měrnou stáčivost.

Klíčová slova.

Optická aktivita látek, Měrná stáčivost, Polarimetr.



Uspořádání experimentu.

Vstupní štěrbina kruhového polarimetru je osvětlena zdrojem světla. Světlo výbojky prochází postupně jednotlivými částmi kruhového polarimetru: prvním polarizátorem, kyvetou s opticky aktivní látkou (cukerným roztokem) a druhým polarizátorem. Natáčením druhého polarizátoru lze ovlivnit intenzitu prošlého světla a stanovit úhel otočení polarizační roviny světla způsobené průchodem opticky aktivní látkou. Na základě naměřeného úhlu, délky kyvety a koncentrace roztoku lze určit měrnou stáčivost aktivní látky.



Pomůcky.

Kruhový polarimetr Metra, sodíková výbojka, cukr, lžička, líc, destilovaná voda, kyveta, váhy, kádinky.

Teorie.

Optická aktivita je vlastnost některých látek stáčet polarizační rovinu lineárně polarizovaného procházejícího světla. Tzv. pravotočivé sloučeniny stáčí rovinu polarizovaného světla ve směru pohybu hodinových ručiček, levotočivé opačně. Optická aktivita je způsobena asymetrickou stavbou molekul těchto látek, danou obvykle u organických sloučenin asymetrickým rozložením atomů uhlíku v molekule. Mezi opticky aktivní látky (pravotočivé) patří např. **sacharóza** $C_{12}H_{22}O_{11}$, což je řepný nebo třtinový cukr.

Studiem optické aktivity se počátkem 19. století zabýval zejména J. B. Biot, který stanovil empiricky, že úhel stočení polarizační roviny α je úměrný tloušťce zkoumané látky d . Podle toho je

$$\alpha = \eta d . \quad (1)$$

Veličina η se nazývá měrnou stáčivostí. Jde-li o roztoky, ve kterých má opticky aktivní látka koncentraci c , lze psát

$$\alpha = \eta c d \quad (2)$$

Měrná stáčivost závisí, podobně jako index lomu, na teplotě a vlnové délce. V případě závislosti na vlnové délce mluvíme o tzv. rotační disperzi.

Polarimetr.

Přístroje sloužící k měření stáčení polarizační roviny nazýváme polarimetry. Základní částí každého polarimetru jsou polarizační zařízení, které slouží jednak jako polarizátor, jednak jako analyzátor. Kromě toho obsahují některé přístroje tzv. kompenzátor, kterým je možné vykompenzovat stočení polarizační roviny vyvolané měřenou látkou.

Uspořádání měření

Na obrázku vidíte základní schéma polarimetru. Světlo z monofrekvenčního zdroje Z (sodíkové výbojky), soustředěné kondenzorem K , se průchodem polarizátorem P lineárně polarizuje a prochází trubicí T (kyvetou) s roztokem opticky aktivní látky. Analyzátor A je otočný a jeho úhel natočení je odečitatelný na stupnici s jemným dělením. Pozorovatel sleduje výsledný jas zorného pole dalekohledem D .

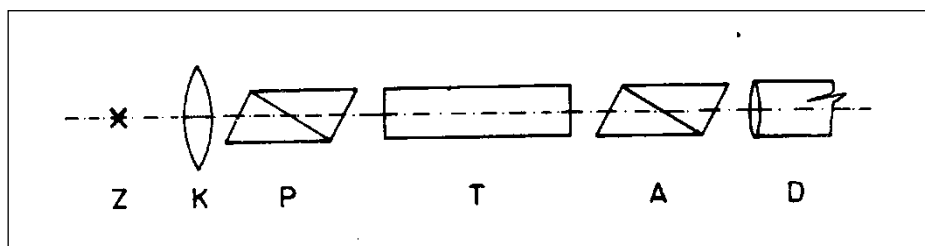


Fig.1. Schéma měření na polarimetru

Polarizační zařízení.

Jak je známo, vzniká polarizace světla při lomu, odrazu a dvojlomu. V dnešní době má pro výrobu polarizačních zařízení praktický význam pouze dvojlom, přičemž se užívá jak látek, které poskytují oba paprsky o stejné intenzitě, tak látek jevících dichroismus.

Klasickým zařízením je *Nikolův hranol*. V pozdější době vzniká řada zařízení konstruovaná ve snaze dosáhnout většího zorného úhlu. Z optického hlediska je nejdokonalejší hranol *Glanův-Thompsonův*, u kterého je možné dosáhnout zorného úhlu až 34° .

Polostínová metoda.

Při měření v monochromatickém světle se k přesnější indikaci polohy polarizační roviny analyzátoru užívá tzv. polostínové metody. Vystupující polarizované světlo se vyznačuje dvěma kmitosměry, svírajícími úhel 2δ . V zorném poli dalekohledu vidí pozorovatel kruh, rozdělený svisle na dvě poloviny s rozdílným jasnem (Fig.2 a 3).

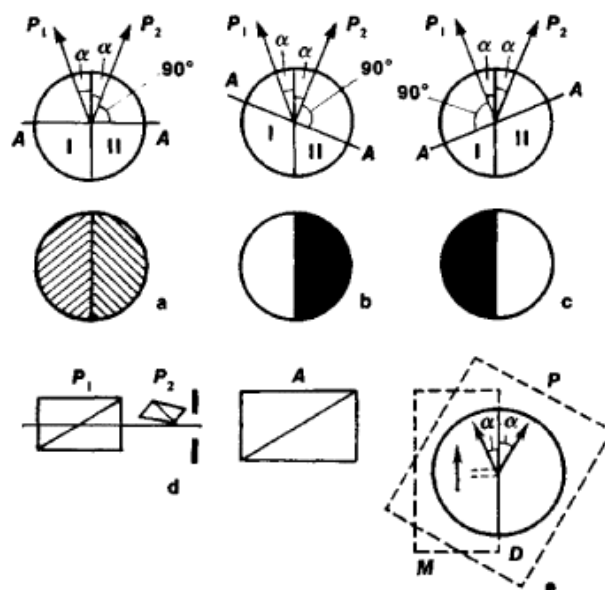


Fig. 2. Polostínový polarizátor. Šipky ukazují směr kmitů polarizovaného světla.

Místo původního temného zorného pole se používá k vlastnímu měření tzv. **polostín**, tedy vzájemná poloha polarizátoru a analyzátoru, kdy jsou obě poloviny zorného pole stejně slabě osvětleny (mají našedlou barvu). Měření je přesnější, protože lidské oko je velmi citlivé na porovnání jasů dvou sousedních ploch.

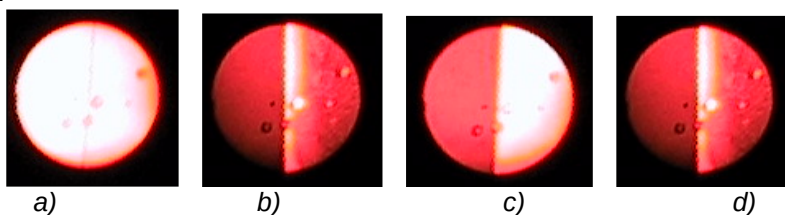


Fig. 3. Zorné pole kruhového polarimetru:

- a) maximální jas; b) polostín – obraz na počátku měření; c) obraz po vložení kyvety s opticky aktivní látkou; d) polostín – stav na konci měření.

Jelletův-Cornuův dvojhranol je polarizační zařízení, které již samo o sobě poskytuje dva svazky polarizovaného světla, jejichž polarizační roviny spolu svírají určitý úhel. Polarizační roviny obou svazků zůstávají navíc stočeny symetricky pro všechny vlnové délky, takže lze tohoto zařízení použít i pro bílé světlo.

Typy polarimetrů.

Polarimetry bývají konstruovány dvěma způsoby. Buď se přístroj vyrovnává otáčením analyzátoru podle optické osy soustavy (polarimetr kruhový), nebo je analyzátor pevný a stočení polarizační roviny se vyrovnává pomocí kompenzátoru, který je vložen před analyzátor (polarimetr klínový). Polarimetr Metra je konstruován pro měření v monochromatickém světle. Přístroj je určen pro měření kapalin. Jako polarizátor, který zároveň tvoří základ polostínového pole, je použit Jelletův-Cornuův dvojhranol. Jako analyzátor slouží hranol Glanův-Thompsonův. Polostínové pole se pozoruje dalekohledem. Stočení roviny se odečítá pomocí lupy na kruhové stupnici s noniem. Stupnice je dělena buď v úhlových stupních nebo ve speciálních stupních vhodných pro sacharimetrii.

Před měřením je nutné zaostřit dalekohled tak, aby se kruhové zorné pole jevílo ostře ohraničené a rozdělené svisle na dvě poloviny. Při vyrovnání přístroje, jež je určeno tím, že obě pole jsou stejně jasná, musí být stupnice na nulové hodnotě. Po vložení měřené látky se přístroj opět vyrovná a na stupnici se odečte příslušný úhel stočení polarizační roviny. K výpočtu měrné stáčitosti, respektive koncentrace lze použít vzorce (1), respektive (2). Přístroj dovoluje odečítání úhlů s přesností $\pm 0,005^\circ$.

Příprava roztoků.

a) Základní pravidla.

- Při přípravě roztoků je důležitá čistota a pořádek. Pokuste se na svůj stůl nahlížet jako na kuchyňskou linku, na které připravujete chutnou krmí pro sebe a své drahé. Čistý stůl je přehlednější a příznivě se tak odrazí na kvalitě a efektivitě vaší práce.
- Sklo, lžičky, míchací tyčinky i pipety umyjte před započítím práce, ale i po jejím skončení.
- Při přípravě roztoků raději vsypávejte látku do rozpouštědla (vody).
- Látku v rozpouštědle rozmíchávejte míchací tyčinkou, nejlépe skleněnou.

b) Jednoduchý roztok v hmotnostní koncentraci.

Nejsnáze se připraví roztok v tzv. hmotnostní koncentraci. Vztah

$$C_{\theta} = \frac{m_a}{m_{\theta}}$$

určuje koncentraci roztoku C_{θ} jako podíl hmotnosti rozpouštěné látky m_a a hmotnosti roztoku m_{θ} , přičemž platí, že $m_{\theta} = m_a + m_{H_2O}$. V 15% cukerném roztoku tedy tvoří cukr 15% z jeho hmotnosti. Např. 100 g roztoku tedy obsahuje 15 g cukru a zbytek (85 g) tvoří voda.

c) Vytvoření roztoku z jiného roztoku o známé koncentraci.

Jednoduchou úvahou nad tím, jaké množství čisté látky obsahuje roztok o dané hmotnosti a koncentraci a zapracováním výsledku do vztahu pro určení koncentrace získáme vztah

$$C_{\theta} = \frac{m_{\theta} C_{\theta}}{m_{\theta} + m_{H_2O}}.$$

V něm veličiny m_{θ} a C_{θ} znamenají hmotnost a koncentraci "starého" roztoku, který používáme jako látku pro přípravu nového roztoku. Veličina m_{H_2O} je hmotnost vody, kterou do roztoku musíme dolít, aby měl požadovanou koncentraci C_{θ} .

Poznámky.

- Kruhový polarimetr má dvě stupnice. Jedna udává úhel stočení v úhlových stupních: -120° až $+120^{\circ}$, druhá udává stočení ve stupních Ventzkého. Úhel stočení polarizační roviny odečítejte v úhlových stupních.
- Kyveta má délku 200mm a objem 10 ml.
- Zaostrte okulár tak, abyste v něm spatřili ostře ohraničené kruhové pole, svisle rozdělené na dvě poloviny. Při měření budete aplikovat polostínovou metodu. Polostínové pole v polarimetru je při měření třeba vyrovnat na stejný jas obou polovin, kdy nastává optická rovnováha. To lze provést obecně ve dvou polohách analyzátoru. V poloze, kdy je celé pole světlejší a kdy je tmavší. Lepší porovnání mezi "jasem" obou polovin se provádí při poloze analyzátoru, kdy jsou pole tmavší.
- K otáčení analyzátoru polarimetru slouží dva šrouby. Jeden, umístěný na spodní části obvodu, slouží k jemnému pohybu, jeho posunutím vzhůru k hrubému posunu.

Postup práce.

- 1) Zapněte zdroj světla.
- 2) Nespoléhejte před měřením na to, že váš předchůdce důkladně omyl kyvetu a raději ji znovu pečlivě omyjte destilovanou vodou, případně lihem. Předejdete tak obtížím při měření.
- 3) Nastavte nulovou polohu stupnice při kyvetě naplněné destilovanou vodou. Optická rovnováha nastane při stejném jasu obou polovin a teoreticky by se měla krýt nula kruhové stupnice s nulou na noniu.
- 4) Odečtěte úhel stočení polarizační roviny α , opakujte tento bod 5-krát, vypočtěte aritmetický průměr a krajní chybu aritmetického průměru. Zpracujte do tabulky.
- 5) Vložte do polarimetru kyvetu s cukerným roztokem o koncentraci 10 %.
- 6) Otáčejte analyzátozem tak dlouho, dokud obě poloviny nebudou mít opět stejný, polostínový jas. Odečtěte úhel stočení polarizační roviny α , opakujte tento bod 5-krát, vypočtěte aritmetický průměr a chybu aritmetického průměru. Zpracujte do tabulky.

- 7) Znovu nastavte nulovou polohu stupnice při kyvetě naplněné destilovanou vodou a udělejte postupně další měření úhlu stočení polarizační roviny α , vypočtete aritmetický průměr a chybu aritmetického průměru pro různé koncentrace cukerného roztoků 20, 30, 40 %.
- 8) Všechny výsledky zpracujte do tabulky.
- 9) Naměřené hodnoty graficky zpracujte do závislosti úhlu stočení polarizační roviny na koncentraci roztoku.
- 10) Vypočítejte měrnou stáčivost η pro každou koncentraci cukerného roztoku, jeho aritmetický průměr a chybu aritmetického průměru.
- 11) Při práci zachovávejte čistotu, po skončení je nutné kyvetu rozebrat, vymýt, propláchnout lihem, vysušit, také umýt pracovní plochu a případně očistit lihem prostor polarimetru pro vkládání kyvety.



Kontrolní otázky.

- Co rozumíme pod pojmem *optická aktivita*? Znáte nějaké látky, které se touto vlastností vyznačují? Jak dělíme opticky aktivní látky?
- Čím je optická aktivita způsobena?
- Jak je definována tzv. měrná stáčivost a na jakých faktorech závisí?
- Popište základní princip měření pomocí polarimetru.
- Proč se u kvalitních polarimetrů používá polarizátor, tvořený dvěma polarizátory s nepatrně posunutými kmitosměry?
- K čemu slouží tzv. Nicolův hranol?



Literatura.

- 1) BORN, M., WOLF, E. *Principles of Optics*. Oxford: Pergamon Press, 1965
- 2) ŠTRBA, A. *Všeobecná fyzika 3 Optika*. 1. vyd. Bratislava: ALFA, 1979
- 3) MECHLOVÁ, E., KOŠTÁL, K. *Výkladový slovník fyziky pro základní vysokoškolský kurz fyziky*. 1. vyd. Praha: Prometheus, 1999.
- 4) VRBOVÁ, M., aj. *Lasery a moderní optika*. 1. vyd. Praha: Prometheus, 1994.
- 5) BROŽ, J., aj. *Základy fyzikálních měření I*. 2. vyd. Praha: SPN, 1983.
- 6) BROŽ, J., aj. *Základy fyzikálních měření II*. 1. vyd. Praha: SPN, 1974.
- 7) MÁDR, V., KNEJZLÍK, J., KOPEČNÝ, J. *Fyzikální měření*. Praha: SNTL, 1991

3 Měření vlnových délek světla mřížkovým spektrometrem

Úkol:

- Seřídíte spektrometr pro kolmý dopad paprsků (rovina mřížky je kolmá k ose kolimátoru);
- Změříte mřížkovou konstantu použité mřížky. K měření užijte sodíkovou výbojku;
- Změříte vlnové délky viditelných čar ve spektru rtuťové výbojky;
- Srovnáte získané výsledky s tabulkovými hodnotami;
- Podle časových možností pozorujte spektra dalších výbojek.

Klíčová slova.

Úhlová disperze, Rozlišovací schopnost, Oblast disperze, Mřížková konstanta, Spektroskop.



Uspořádání experimentu.

Spektrální přístroj pracuje tak, že světlo zkoumaného zdroje osvětluje štěrbinu kolimátoru. Objektiv kolimátoru vytvoří z rozbíhavého svazku, vycházejícího z osvětlené štěrbinu, svazek rovnoběžný, který pak dopadá na disperzní soustavu. Po průchodu disperzní soustavou vchází rozložené světlo do objektivu dalekohledu, který vytvoří ve své ohniskové rovině obrazy štěrbin příslušející jednotlivým vlnovým délkám. Na základě naměřených úhlů lze udělat výpočet, kdy pomocí mřížkové konstanty určíme vlnovou délku pozorovaného světla.



Pomůcky.

Spektrometr, optická mřížka a rtuťová výbojka, další výbojky.

Teorie.

Při měření vlnových délek světla přichází nejčastěji v úvahu případ, kdy je zapotřebí měřit vlnové délky vyskytující se ve složeném světle. Pak je nutné rozložit zkoumané světlo podle vlnových délek a provést rozbor získaného spektra. Zařízení, kterými je možno řešit zmíněnou úlohu, se nazývají spektrální přístroje. Mimo to se může vyskytnout potřeba změřit vlnovou délku světla které lze v daném přiblížení považovat za monochromatické. Při řešení této úlohy je možné se v některých případech obejít bez spektrálního přístroje.

Stěžejní částí spektrálního přístroje je disperzní soustava, jejímž úkolem je rozložit zkoumané světlo podle vlnových délek. K tomuto rozkladu se využívá disperzních vlastností některých látek (hranolové přístroje), nebo ohybu a interference světla (mřížkové přístroje a interferenční spektroskopy).

Vlastnosti disperzní soustavy jsou charakterizovány disperzí, rozlišovací schopností a oblastí disperze:

Úhlová disperze.

Úhlová disperze charakterizuje disperzní vlastnosti soustavy v úzké spektrální oblasti. Označme písmenem ε úhel, který svírá směr šíření světla určité vlnové délky λ po průchodu uvažovanou soustavou s jistým předem zvoleným směrem. Bude-li soustavou procházet světlo obsahující všechny vlnové délky z určitého intervalu, bude možno vyjádřit hodnoty úhlu příslušející jednotlivým vlnovým délkám pomocí funkční závislosti $\varepsilon = \varepsilon(\lambda)$. Úhlová disperze je veličina, která udává, jak rychle se mění úhel ε s vlnovou délkou. Je definovaná jako derivace

$$\frac{d\varepsilon}{d\lambda} \quad (1)$$

Rozlišovací schopnost.

Rozlišovací schopnost určuje minimální diferencí vlnových délek $\delta\lambda$, které mohou být přístrojem ještě rozlišeny. Jako rozlišovací schopnost spektrálního přístroje se obvykle definuje veličina R , daná vztahem

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda}. \quad (2)$$

Rozlišovací schopnost je omezena ohybovými jevy, které nastávají při průchodu světla soustavou. I v tomto případě je možné užít Rayleighova kritéria; minimální úhlová vzdálenost φ rozlišitelných svazků je dána vztahem

$$\varphi = \frac{\lambda}{D}, \quad (3)$$

v němž D je rozměr otvoru, který je rozhodující pro omezení svazků.

Oblast disperze.

Oblast disperze charakterizuje vlastnosti soustavy při průchodu světla z široké oblasti vlnových délek. Tyto vlastnosti se obvykle vyjadřují pomocí maximálního intervalu vlnových délek $\Delta\lambda$, které mohou být soustavou najednou zkoumány.

Optická mřížka.

Optickou mřížku lze nejjednodušeji modelovat rovinou soustavou rovnoběžných štěrbin, oddělených neprůhlednými pruhy. Uvažujme takovou mřížku tvořenou řadou n štěrbin šířky b . Nechť se štěrbinu opakuje s periodou a , zvanou konstanta mřížky (Fig.1a) a nechť dopadá na mřížku svazek rovnoběžných paprsků monochromatického světla vlnové délky λ pod úhlem α . Budeme sledovat průběh intenzity tohoto svazku po průchodu mřížkou. Při řešení tohoto problému je nutno uvažovat dva jevy: ohybový jev vznikající při průchodu světla každou štěrbinou mřížky zvlášť a interferenci svazků od všech štěrbin mřížky.

Rozdělení intenzity I_1 po průchodu jednou štěrbinou mřížky (Fig.1) je v závislosti na směru šíření, charakterizovaném úhlem β , dáno vztahem

$$I_1 = C_1 \frac{\sin^2 u}{u^2}, \quad (4)$$

a C_1 je konstanta úměrnosti.

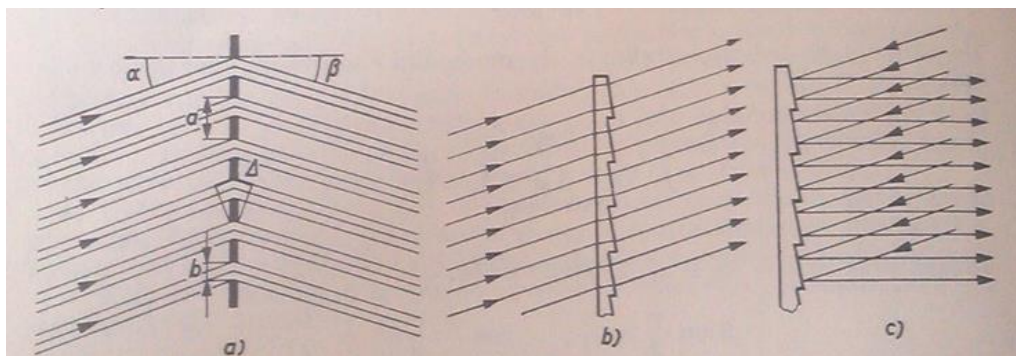


Fig.1. a) Průchod světla optickou mřížkou, b) optická mřížka s odleskem na průchod, c) optická mřížka s odleskem na odraz.

Výsledné rozdělení intenzity I po průchodu mřížkou je dáno interferencí svazků, pocházejících od jednotlivých štěrbin mřížky. Platí tu vztah

$$I = C \frac{\sin^2 u}{u^2} \frac{\sin^2 nz}{\sin^2 z}, \quad (5)$$

ve kterém

$$z = \frac{\pi}{\lambda} a (\sin \alpha + \sin \beta) \quad (6)$$

a C je opět konstanta úměrnosti.

Průběh intenzity podle rovnice (5) v závislosti na veličině z je kvalitativně znázorněn na Fig.2. Hlavní maxima intenzity odpovídají bodům $z = k\pi$, kde $k=0, \pm 1, \pm 2, \dots$, tj.

$$k\lambda = a (\sin \alpha + \sin \beta) \quad (7)$$

Podmínka (7) ovšem není nic jiného než podmínka pro vznik hlavního interferenčního maxima k -tého řádu, neboť - jak je vidět z Fig.1 - je $\Delta = a (\sin \alpha + \sin \beta)$ dráhový rozdíl mezi svazky procházejícími sousedními štěrbinami.

Skutečnost, že směr hlavních interferenčních maxim podle (8) závisí na vlnové délce, představuje disperzní schopnost optické mřížky. Dopadne-li totiž na mřížku svazek složeného světla, vzniknou při daném k maxima pro různé vlnové délky v různých směrech. Mluvíme pak o spektru k -tého řádu. U optické ohybové mřížky se užívá zpravidla spekter nízkého řádu. Pro mřížku vyšetřovaného typu klesá pak intenzita prošlého světla s rostoucím řádem spektra (Fig. 2), takže prošlé světlo je neužitečně soustředěno ve spektru nultého řádu. tuto nevýhodu lze odstranit speciálním uspořádáním, které zajistí dodatečné změny fáze světla procházejícího jednou štěrbinou, čímž se změní i tvar vzorce (4) vyjadřujícího intenzitu světla I_1 . Téměř veškerou intenzitu vycházejícího světla (70-80 %) lze pak soustředit do spektra vybraného řádu, zatímco spektra ostatních řádu jsou potlačena. Mluvíme pak o mřížce s odleskem v daném řádu spektra.

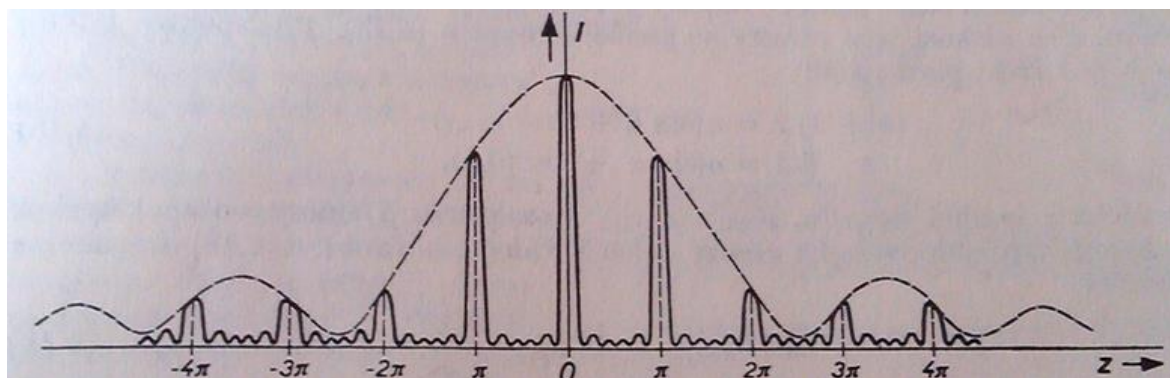


Fig. 2. Rozdělení intenzity monochromatického světla po průchodu rovinnou ohybovou mřížkou na průchod.

Prakticky se optické mřížky zhotovují rytím rovnoběžných vrypů do skleněné desky, nebo do kovové vrstvy napařené na desku. výše popsaných vlastností mřížek s odleskem se zpravidla dosahuje vhodnou volbou profilu vrypů (nejčastěji pilového tvaru - viz Fig.1 b, c). V poslední době byla do značné dokonalosti vypracována technologie výroby kopií (replik) rytých mřížek, které se zhotovují ze speciálních plastických materiálů s následným nanesením kovové vrstvy. Jejich výhodou je značně nižší cena, přičemž se vlastnosti mohou blížit originálu.

Vedle rovinných mřížek se často užívají tzv. *Rowlandovy konkávní mřížky*, které jsou ryté na vnitřní straně kulové plochy velkého poloměru (1 - 10m). Užívá se jich na odraz tak, že jejich kulová plocha zastává zároveň funkci objektivu kolimátoru či fotografické komory. Je-li štěrbina kolimátoru na obvodu i ostrý obraz spektra.

Úhlová disperse

Výraz pro úhlovou dispersi optické mřížky $d\beta/d\lambda$ je možno získat přímo derivováním vzorce (7)

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{k}{a \cos \beta} \quad (8)$$

Vzorec (7) ukazuje zajímavý výsledek, že úhlová disperse mřížky nezávisí vůbec na celkovém počtu štěrbin n . Pro danou mřížkovou konstantu a a daný řád spektra k závisí úhlová disperse pouze na úhlu β . Vhodnou volbou úhlu dopadu α je možné podle vzorce (7) pro určitou vlnovou délku dosáhnout žádoucí velikosti disperse.

Často se užívá uspořádání s malou hodnotou β . V tomto případě lze položit $\cos \beta = 1$, takže vzorec (8) bude mít tvar

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{k}{a}. \quad (9)$$

Disperse má tedy minimální hodnotou, zato však není vůbec závislá na vlnové délce. Tato okolnost výrazně odlišuje vlastnosti optické mřížky od vlastností hranolu.

Disperzní oblast.

Disperzní oblast optické mřížky je omezena překrýváním spektrem různých řádů. Pro diskusi této otázky vyjdeme z rovnice (7). Pro spektry k -tého a $k+1$ řádu platí vztahy

$$\begin{aligned} (k+1)\lambda &= a(\sin \alpha + \sin \beta_{k+1,\lambda}) \\ k\lambda &= a(\sin \alpha + \sin \beta_{k,\lambda}) \end{aligned} \quad (10)$$

v nichž α je úhel dopadu, $\beta_{k,\lambda}$ a $\beta_{k+1,\lambda}$ charakterizují směry ve spektrech k a $k+1$ řádu, odpovídající vlnové délce λ . Odečtením rovnice (10) dostaneme rovnici

$$\sin \beta_{k+1,\lambda} - \sin \beta_{k,\lambda} = \frac{\lambda}{a}, \quad (11)$$

z které lze při zvoleném $\beta_{k,\lambda}$ určit úhlovou vzdálenost $\beta_{k+1,\lambda} - \beta_{k,\lambda}$ spekter $k+1$ a k -tého řádu vlnové délky λ .

Na druhé straně, dopadá-li na mřížku pod úhlem α světlo složené z vlnových délek $\lambda_1, \lambda_2, (\lambda_1 < \lambda_2)$ a označíme-li $\beta_{k,\lambda_1}, \beta_{k,\lambda_2}$ úhly maxim k -tého řádu, můžeme podle (7) odvodit

$$\sin \beta_{k,\lambda_2} - \sin \beta_{k,\lambda_1} = \frac{k}{a}(\lambda_2 - \lambda_1). \quad (12)$$

Hledejme nyní podmínku pro to, aby spektrum k -tého řádu odpovídající intervalu vlnových délek $(\lambda_2 - \lambda_1)$ nebylo překrýváno spektrem $k+1$ řádu. V tomto případě musí platit

$$\beta_{k,\lambda_2} - \beta_{k,\lambda_1} \leq \beta_{k+1,\lambda_1} - \beta_{k,\lambda_1}.$$

Použitím rovnic (11) a (12) dostaneme podmínku

$$\lambda_2 - \lambda_1 \leq \frac{\lambda_1}{k}. \quad (13)$$

Rozlišovací schopnost.

Uvažujme optickou mřížku šířky s o počtu vrypů n a mřížkové konstantě a . předpokládejme, že na ni dopadá dostatečně široký svazek rovnoběžných paprsků tak, aby byla využita celá její šířka.

Pro minimální úhlovou vzdálenost, která může být mřížkou podle Fig.3 rozlišena, plyne ze vzorce (8)

$$\varphi = d\beta = \frac{k}{a \cos \beta} \delta\lambda. \quad (14)$$

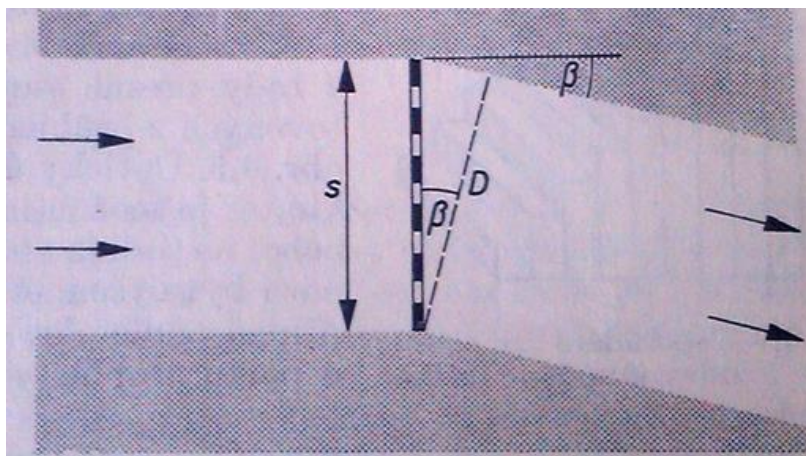


Fig.3. K výkladu rozlišovací schopnosti optické mřížky.

Podle Fig.3 je $D = s \cos \beta$. Uvážíme-li dále, že platí $s = na$ a použijeme-li Fig.3, (7) a (14), dostaneme pro rozlišovací schopnost R bud'

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = kn, \quad (15)$$

nebo také

$$R = \frac{s}{\lambda} (\cos \alpha + \cos \beta). \quad (16)$$

Vzorec (16) dovoluje určit maximální teoretickou rozlišovací schopnost. Jelikož je vždy $|\cos \alpha + \cos \beta| \leq 2$, platí

$$R \leq R_{\max} = 2 \frac{s}{\lambda} \quad (17)$$

Jak plyne z rovnic (15) a (17), je rozlišovací schopnost úměrná celkovému počtu vrypů, tj. šířce mřížky. Rytí mřížky představuje však technicky značně náročný úkol.

Konstrukce spektrálního přístroje

Spektrální přístroje dělíme na několik kategorií. Rozeznáváme spektroskopy, spektrometry a spektrografy. První z nich jsou přístroje umožňující vizuální pozorování a kvalitativní vyhodnocování spektra. Spektroskopy opatřené kalibrovanou stupnicí a dovolující proměřovat spektrum se nazývají spektrometry. Konečně spektrografy nazýváme přístroje, které poskytují fotografický či jiný záznam spektra schopný kvantitativního vyhodnocování.

Každý spektrální přístroj obsahuje kromě vlastní disperzní soustavy, která rozkládá zkoumané světlo, ještě zobrazovací soustavu. Ta se skládá z objektivu kolimátoru a z objektivu dalekohledu, respektive objektivu fotografické komory.

Každý spektrální přístroj pracuje tak, že světlo zkoumaného zdroje osvětluje štěrbinu kolimátoru. Objektiv kolimátoru vytvoří z rozbíhavého svazku, vycházejícího z osvětlené štěrbinu, svazek rovnoběžný, který pak dopadá na disperzní soustavu. Po průchodu disperzní soustavou vchází rozložené světlo do objektivu dalekohledu, popřípadě fotografické komory, který vytvoří ve své ohniskové rovině obrazy štěrbinu příslušející jednotlivým vlnovým délkám. Toto spektrum se pak fotografuje, nebo pozoruje okulárem dalekohledu neakomodovaným okem.

Mřížkový spektroskop.

K schematickému znázornění optické soustavy takového přístroje může sloužit obrázek Fig.4. Tubus kolimátoru je pevně namontován na stativu, na kterém je stolek pro umístění mřížky. Podle povahy

přístroje je stolek buď pevný, nebo otočný. Odečítání vlnových délek řešeno dvěma způsoby. Při prvním způsobu bývá spektroskop budován jako goniometr. Dalekohled je pak otočný kolem svislé osy přístroje a jeho poloha se dá odečítat na úhloměrné stupnici s noniem. Okulár dalekohledu je vybaven nitkovým křížem. Měření se provádí tak, že žádané místo ve spektru se nastaví do středu nitkového kříže a na úhloměrné stupnici se odečte příslušný úhel β . Vlnová délka se pak počítá z rovnice (7), respektive (18).

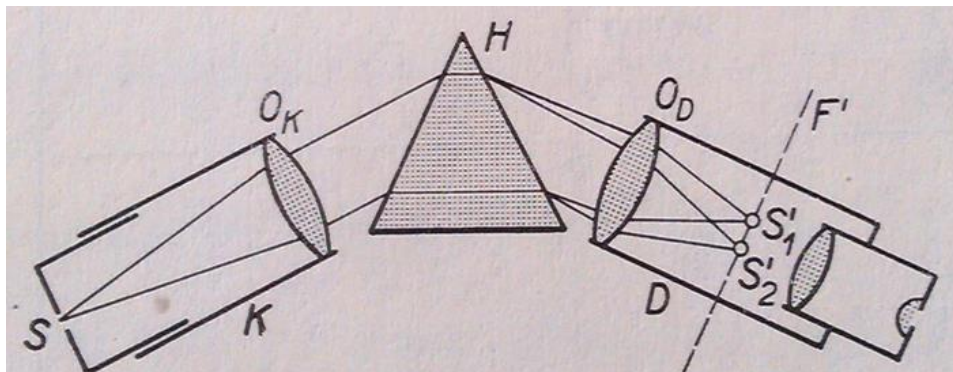


Fig.4. Schéma mřížkovou spektroskopu.

H - rovinná mřížka umístěna tak, že její vrypy jsou rovnoběžné se štěrbinou kolimátoru **K**, **S** - štěrbina kolimátoru, **D** - dalekohled,

Při druhém způsobu je poloha dalekohledu i mřížky pevná. Zorné pole dalekohledu a jeho osy se volí tak, aby bylo možno pozorovat spektrum určitého řádu (zpravidla prvního) celé žádané oblasti. V ohniskové rovině objektivu je umístěna stupnice pro odečítání vlnových délek.

V běžných případech se mřížka umísťuje kolmo k ose kolimátoru. Úhel dopadu α ve vztahu (7) je tedy roven nule a pro vznik maxima k -tého řádu, platí rovnice

$$a \sin \beta = k\lambda. \quad (18)$$

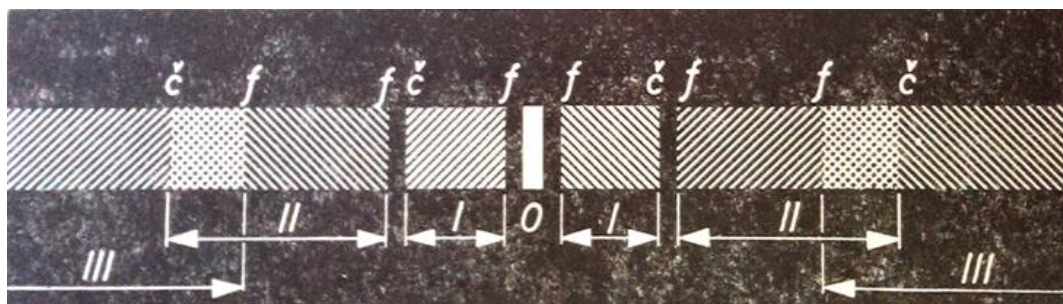


Fig.5. Rozložení mřížkových spekter různých řádů.

Předpokládejme, že spektroskop je za podmínky $\alpha=0$ osvětlen bílým světlem. Spektrum vytvořen v tomto případě mřížkou je schematicky znázorněno na Fig.5. Ve středu zorného pole je světlý pruh, tzv. spektrum nultého řádu odpovídající $\beta=0$, $k=0$, a od něho symetricky na obě strany jsou rozprostřena spektra I., II., III., ... řádu odpovídající $k=1, 2, 3, \dots$.

Zaostření dalekohledu na nekonečno a nastavení správné polohy štěrby kolimátoru se provádí stejným způsobem jako u hranolového přístroje. Kromě toho však je nutné u všech přístrojů, které nemají mřížku montovanou pevně, nastavit zvolený úhel dopadu α a zajistit, aby vrypy mřížky byly přesně rovnoběžné se štěrbinou kolimátoru. Mřížku lze nastavit velmi jednoduše, je-li dalekohled vybaven Gaussovým okulárem. Jako odrazové plochy použijeme roviny mřížky. Dalekohled natočíme tak, aby jeho osa svírala s osou kolimátoru žádaný úhel α . Osvětíme nitkový kříž okuláru a sledujeme jeho obraz vytvořený po odrazu na rovině mřížky. Stavěcími šrouby stolku uvedeme mřížku do tákové polohy, v které se tento obraz přesně kryje s nitkovým křížem. Tím je zajištěno, že rovina mřížky je přesně kolmá k ose dalekohledu. Nyní zbývá ještě natočit mřížku v její rovině tak, aby vrypy byly rovnoběžné se štěrbinou kolimátoru, a tedy i se svislou osou přístroje. Správnost tohoto nastavení kontrolujeme tak, že otáčíme stolek mřížky a pozorujeme spektrum. Při otáčení se nesmí měnit výška obrazu štěrby v dalekohledu.

Tabulka spektrálních čar rtuti.

Barva	Relativní intenzita	Vlnová délka, nm
červená	1,2	690,7
červená	0,8	671,6
červená	0,8	623,4
červená	0,3	612,3
červená	0,5	607,3
žlutá	10	579,1
žlutá	5	579,0
žlutá	2	577,0
žlutozelená	20	546,1
žlutozelená	0,5	491,6
modrá	5	435,8
modrá	0,5	434,8
modrá	0,2	433,9
fialová	1,5	407,8
fialová	3	404,7

Poznámky.

- Místnost musí být dokonale zatemněná a vaše oko si musí přivyknout na světelné poměry.
- Při práci zachovávejte čistotu a pořádek.

Postup práce.

- 1) Zapněte zdroj světla.
- 2) Před měřením je nutno spektrometr zjustovat: nastavit dalekohled na nekonečno a pak nastavit štěrbinu kolimátoru do ohniskové roviny objektivu.
- 3) Spektrometr je seřízen pro kolmý dopad světla, kdy maxima 1. a -1. řádu sodíkového světla (jedná se o sodíkový dublet s vlnovými délkami 589 a 589,5 nm) jsou od maxima 0. řádu vzdálena o stejně velký úhel. Vzájemná odchylka úhlů může činit maximálně 0,5-1°. Nezapomeňte vždy mřížku před dalším měřením zajistit proti posunu fixačním šroubem.
- 4) Dosažení kolmosti mřížky dokumentujte tabulkou, v níž uvedete naměřené hodnoty úhlů ($+\beta$; $-\beta$ a $\Delta\beta$), dokud nedosáhnete požadované přesnosti.
- 5) K měření mřížkové konstanty (periody mřížky) použijte opět sodíkovou výbojku a proveďte 10 měření.
- 6) Naměřené hodnoty pro určení mřížkové konstanty statisticky zpracujte.
- 7) Zkoumejte spektrum rtuťové výbojky a z oboustranně naměřených úhlů vypočtěte, pomocí mřížkové konstanty, vlnovou délku pozorovaného světla.
- 8) Proveďte pro každou spektrální čaru nejméně 3 oboustranná měření, čímž obdržíte šest hodnot vlnových délek spektrálních čar. Z nich vypočtěte průměrnou hodnotu. Měření přehledně zpracujte do tabulky, v níž uvedte i barvu čáry.
- 9) Chraňte se svým zrak před světlem z výbojky improvizovaným papírovým krytem!
- 10) Porovnejte výsledky vašeho měření s přiloženou tabulkou spektrálních čar rtuti.
- 11) Pomocí tabulky spektrálních čar rtuti se snažte najít co nejvíce těchto čar. Některé jsou velmi jasné, jiné dohledáte teprve s pomocí tabulky.

**Kontrolní otázky**

- Co rozumíme pod pojmem tzv. Spektrometr? Znáte nějaké vlastnosti disperzní soustavy?
- Co to je úhlová disperze, rozlišovací schopnost a oblast disperze?
- Stručně popište základní věci a charakteristiku optické mřížky?
- Popište základní princip měření pomocí mřížkového spektroskopu.
- Jak můžeme počítat vlnovou délku a na čem to závisí?

**Literatura.**

- 1) BROŽ, J., aj. *Základy fyzikálních měření I*. 2. vyd. Praha: SPN, 1983.
- 2) M. Horák: Praktikum z fyziky.

4 Harmonické kmity

Úkol:

- Změřte tuhost pružiny statickou metodou a na jejím základě určete úhlovou frekvenci oscilátoru;
- Proveďte ověření experimentálního vztahu pro úhlovou frekvenci oscilátoru pomocí měření jeho doby kmitu;
- Ověřte závislost úhlové frekvence na hmotnosti závaží a sestrojte graf závislosti $\omega = f\left(\frac{1}{\sqrt{m}}\right)$;
- Ověřte závislost úhlové frekvence na tuhosti pružin a sestrojte graf závislosti $\omega = f(\sqrt{k})$;
- Z naměřených hodnot určete tíhové zrychlení v daném místě.

Klíčová slova.

Rezonance, Kmity, Harmonické kmity, Kruhová frekvence, Tuhost pružiny.



Uspořádání experimentu.

Tento přístroj pracuje tak, že pomocí různých pružin, závaží a jejich kmitání můžeme počítat tuhost pro každou pružinu, a taký jejich kruhovou frekvenci.



Pomůcky.

Pružiny, závaží, stojan s měřítkem, stopky, váhy.

Teorie.

Kmitavý pohyb vykonává každý hmotný bod vystavený působení sil mířících směrem k jeho rovnovážné poloze. Proto je kmitavý pohyb velmi často se vyskytujícím druhem pohybu. S vyšetřováním kmitajících soustav se setkáváme téměř ve všech oborech fyziky. Omezíme se přitom na případ, kdy síla mířící do rovnovážné polohy je úměrná výchylce a kdy se kmitající hmotné body pohybují po přímce, tedy na případ harmonických kmitů.

Kmitá-li soustava hmotných bodů, těleso nebo určitý objem tekutiny vymezený nádobou, nastávají složitější poměry. Výrazným jevem v takové kmitající soustavě je *rezonance*. Rezonance je snaha systému (nebo jeho části) při určitých frekvencích kmitat s větší amplitudou. Podle druhu kmitající soustavy závisí rezonanční frekvence na různých vlivech. V případě kmitajících pružných tyčí závisí rezonanční frekvence na elastických konstantách, hustotě, tvaru tyčí a na způsobu, jakým tyče kmitají. Tyče mohou kmitat podélně, příčně, ohybově nebo torzně. U membrán a strun záleží rezonanční frekvence na jejich tvaru (u struny na délce), na plošné, resp. délkové hustotě a na velikosti napětí způsobeným vnějšími silami. V případě kmitů v uzavřených objemech plynů nebo kapalin, např. zvukových kmitů ve válcových rezonátorech, je rezonanční frekvence dána tvarem nádoby a rychlostí zvuku v daném prostředí. Dále uvažujeme harmonické kmity.

Harmonické kmity.

Mějme hmotný bod, který se může pohybovat pouze podél přímky. Nechť na něj působí síla, jejíž velikost je úměrná vzdálenosti hmotného bodu od rovnovážné polohy a která míří směrem k rovnovážné poloze. Působením této síly vzniká harmonický pohyb hmotného bodu. Pro velikost výchylky y hmotného bodu v závislosti na čase t platí rovnice

$$y = A \sin(\omega t + \varphi), \quad (1)$$

v které A je maximální výchylka neboli amplituda kmitu, ω kruhová frekvence a φ fázový úhel; výchylku y odečítáme od rovnovážné polohy hmotného bodu, tj. od místa, kde na hmotný bod nepůsobí žádná síla. Mezi kruhovou frekvencí a dobou kmitu T platí známý vztah $\omega = 2\pi/T$. Pro sílu F , jejímž působením vzniká kmit (1), můžeme psát rovnici

$$F = -ky, \quad (2)$$

ve které k je konstanta úměrnosti, $k > 0$. Veličiny A a φ v rovnici (1) jsou dány podmínkami, v nichž je bod na počátku kmitání (tzv. počátečními podmínkami), např. polohou a rychlostí hmotného bodu v čase $t=0$. Mezi kruhovou frekvencí ω , konstantou úměrnosti k z rovnice (2) a hmotností m kmitajícího hmotného bodu platí vztah

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}. \quad (3)$$

Nejsnadněji lze podmínky, za kterých vzniká harmonický kmit, realizovat, necháme-li těleso Z o hmotnosti m kmitat v tíhovém poli zemském na svislé pružině (Fig.1).

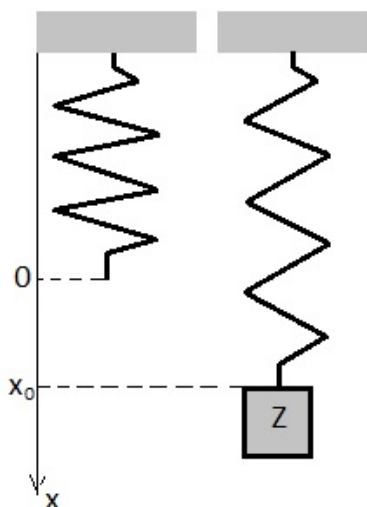


Fig. 1. K odvození rovnic pro kmitání závaží hmotnosti m na pružině. Síla F_1 potřebná k deformaci pružiny je úměrná výchylce x , takže platí

$$F_1 = k_1 x. \quad (4)$$

Konstanta k_1 se nazývá tuhost pružiny. Zavěsíme-li na pružinu těleso hmotnosti m , bude na něj podle principu akce a reakce pružina působit silou - F_1 . Výslednou sílu působící na těleso dostaneme, přičteme-li k této síle tíhu tělesa $G=mg$. Rovnovážný stav nastane, tj. těleso bude v klidu, když výsledná síla $G - F_1$ bude rovna nule, tj. pro takové protažení x_0 pružiny, pro které platí

$$G = k_1 x_0. \quad (5)$$

Mezi výslednou silou působící na těleso a výchylkou pružiny platí vztah

$$G - F_1 = k_1(x_0 - x) = -k_1(x - x_0) \quad (6)$$

Rovnice (6) je analogická s rovnicí (2): na levé straně je celková síla působící na těleso, na pravé straně výchylka z rovnovážné polohy $x-x_0$ a k_1 je kladná konstanta. Vychýlíme-li tedy těleso zavěšené na pružině z rovnovážné polohy, vykonává harmonické kmity s frekvencí danou rovnicí (3), do které za konstantu úměrnosti k dosadíme tuhost pružiny k_1 . Pro těleso kmitající na pružině jsou všechny veličiny v rovnici (3) snadno měřitelné. Jejich změřením můžeme tedy ověřit, do jaké míry je rovnice (3), která umožňuje vypočítat frekvenci kmitů z tuhosti pružiny a hmotnosti tělesa, pro konkrétní uspořádání splněna. Dále budeme vyšetřovat, jak je rovnicí (3) splněna předpokládaná závislost kruhové frekvence kmitů na tuhosti pružin a na hmotnosti kmitajících těles.

Tuhost pružiny k_1 vypočítáme z rovnice (5). Musíme k tomu změřit protažení x_0 pružiny způsobené závažím o známé tíze G . Protažení x_0 pružiny určíme buď z posuvu ukazatele spojeného s koncem pružiny na stupnici, nebo přesněji katetometrem. Kruhovou frekvenci ω vypočítáme z doby kmitu pružiny. Doby kmitu zpravidla měříme stopkami a pro zvýšení přesnosti měříme úhrnnou dobu většího počtu kmitů, např. pěti, deseti, padesáti apod. Hmotnost kmitajícího tělesa stanovíme vážením.

Ověření rovnice (3) provedeme tak, že pro jednu pružinu určíme tuhost, zvážíme hmotnost tělesa, které na této pružině necháme kmitat, a vypočteme výraz $\sqrt{k/m}$. Tento vypočtený výraz srovnáme s hodnotou získanou přímým změřením doby kmitu tělesa kmitajícího na pružině.

Závislost frekvence kmitů na konstantě k prověříme tímto způsobem. Vybereme si sadu pružin s různými tuhostmi. Tuhosti pružin změříme výše uvedeným způsobem. Na pružinách necháme kmitat totéž těleso a pro každou pružinu změříme frekvenci kmitů. Sledujeme, nejlépe vynesáním grafu $\omega = f(\sqrt{k})$, do jaké míry je splněna přímá úměrnost mezi $\sqrt{k}$ a frekvencí kmitů ω .

Závislost frekvence kmitů na hmotnosti kmitajících těles prověříme tak, že na tutéž pružinu postupně zavěšujeme tělesa s různou hmotností a měříme doby kmitu. Vynesáním grafu $\omega = f(1/\sqrt{m})$

sledujeme, do jaké míry je splněna přímá úměrnost mezi ω a $1/\sqrt{m}$.

Dále je možné pomocí kmitů pružiny určit tíhové zrychlení z prodloužení x_0 . Potom těleso na pružině ve svislém směru rozkmitáme, změříme dobu kmitu a vypočítáme z ní kruhovou frekvenci ω . Protože $G=mg$, dostaneme porovnání rovnic (5) a (3) vztah

$$g = \omega^2 x_0. \quad (7)$$

Chceme-li srovnat naměřené a vypočtené frekvence kmitů s přesností přibližně 3 %, je třeba změřit prodloužení pružiny s relativní chybou menší než 5 % a dobu kmitu pružiny s relativní chybou menší než 3%. Tíhové zrychlení g podle rovnice (7) lze určit s přesností asi 4 %, změříme-li prodloužení x_0 s relativní chybou 2 % a frekvenci s relativní chybou asi 1 %.

Při přesných měřeních by bylo nutné uvažovat i vlastní hmotnost pružiny. Většinou je však hmotnost pružiny vzhledem k hmotnosti kmitajícího tělesa zanedbatelná.

Postup práce.

- 1) Na pružinu zavěšujte vhodná závaží a jejich kombinace tak, abyste obdrželi 5 hodnot pro výpočet tuhosti pružiny, a zároveň jste se stejnou hmotností dokázali optimálně změřit dobu kmitu daného oscilátoru.
- 2) Pro zvýšení přesnosti měření změřte úhrnnou dobu většího počtu kmitů (10-20), a z tohoto údaje určete dobu jednoho kmitu. Doby kmitu měřte při průchodu tělesa rovnovážnou polohou.
- 3) Tímto způsobem proměřte nejméně 3 pružiny.
- 4) Přesnou hmotnost závaží ověřte kontrolním vážením.
- 5) Přísně dbejte na to, aby nenastala trvalá deformace pružiny!

- 6) Porovnejte v tabulce hodnoty úhlových frekvencí z obou měření, nejlépe jejich vzájemným poměrem.
- 7) Zvolte vhodnou hmotnost, kterou necháte kmitat na pružinách o známé tuhosti (viz úkol 1). Pro každou pružinu proveďte 5 měření na určení doby kmitu oscilátoru. Výstupem z měření bude tabulkově a graficky zpracovaná závislost úhlové frekvence na tuhosti pružiny a hmotnosti závaží.
- 8) Z naměřených hodnot určete velikost lokálního tíhového zrychlení a porovnejte s tabulkovou hodnotou.



Kontrolní otázky

- Co to je kmitavý pohyb a rezonance?
- Stručně popište rezonanční frekvenci a na čem závisí?
- Popište základní vlastnosti harmonického pohybu.
- Jak můžeme počítat kruhovou frekvenci a na čem to závisí?



Literatura.

- 1) BROŽ, J., aj. *Základy fyzikálních měření I*. 2. vyd. Praha: SPN, 1983.

5 Měření indexu lomu univerzálním refraktometrem

Úkol:

- Změřte index lomu (n_D) a střední disperzi vodného roztoku glycerinu v závislosti na jeho koncentraci;
- Naměřené hodnoty a výsledky zpracujte graficky (graf závislosti indexu lomu na koncentraci).

Klíčová slova.

Refraktometr, Index lomu, střední disperze, Zákon lomu, Hranol.



Uspořádání experimentu.

Měřená látka se umísťuje na přeponovou stěnu měřícího hranolu. Při měření na průchod vstupuje světlo stěnou do osvětlovacího hranolu a rozptýlené na jeho zrněné stěně vchází do měřené látky. Po lomu na rozhraní mezi látkou a měřícím hranolem vychází stěnou, která se pozoruje dalekohledem. Při měření na odraz vchází světlo zrněnou plochou do měřícího hranolu. Rozptýlené světlo pak na rozhraní s měřenou látkou a po odrazu vystupuje stejnou stěnou, která se opět pozoruje dalekohledem. Nastavíme rozhraní v zorném poli dalekohledu aby bylo nejostřejší a dostaneme index lomu a hodnotu C. Pomocí tabulky odečítáme střední disperzi měřené látky.



Pomůcky.

Univerzální refraktometr Meopa, Glycerin, Destilovaná voda, Líh, Vata, filtrační papír, Váhy, Kádinky, Kapátko.

Teorie.

Uvažujeme světelný paprsek šířící se homogenním prostředím v daném směru rychlostí v . Absolutním indexem lomu n tohoto prostředí v uvažovaném směru se nazývá podíl

$$n = \frac{c}{v}, \quad (1)$$

v němž c je rychlost světla ve vakuu.

Opticky izotropní se nazývají takové látky, jejichž index lomu je nezávislý na směru šíření světla. V tomto případě je index lomu definovaný podle vztahu (1) charakteristickou veličinou dané látky.

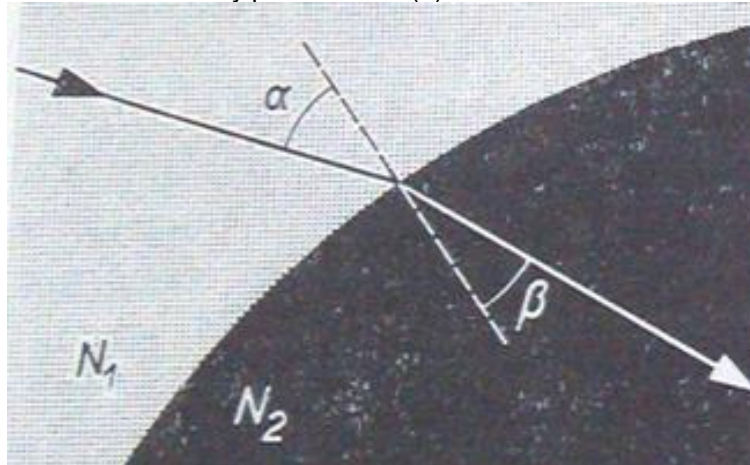


Fig.1. K výkladu zákona lomu.

Průchod světla rozhraním dvou izotropních prostředí o indexech lomu n_1, n_2 (Fig.1) se řídí *Snellovým zákonem lomu*, podle něhož se světlo dopadající na rozhraní pod úhlem α šíří po průchodu rozhraním v rovině dopadu pod úhlem β , takže platí

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (2)$$

Poměr n_2/n_1 se nazývá *relativní index lomu*.

Za normálních podmínek jsou opticky isotropními látkami plyny a kapaliny, z pevných látek pak látky amorfní a krystaly s kubickou symetrií.

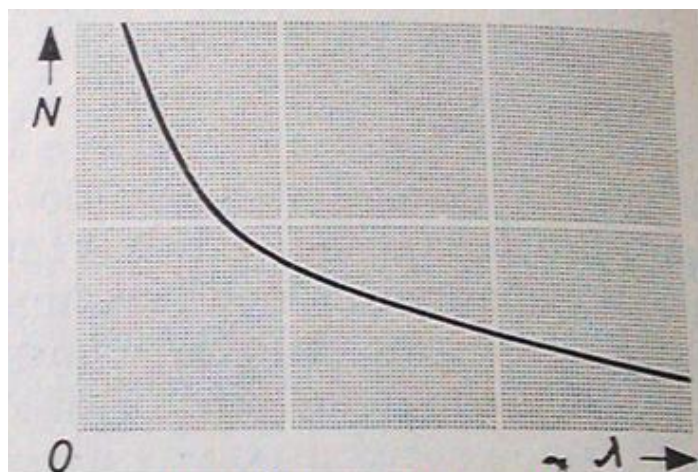


Fig.2. Průběh normální disperze.

Všechny látky vykazují disperzi, tj. jejich index lomu je závislý na vlnové délce světla $n=n(\lambda)$. Na Fig.2 je uveden typický průběh disperzní závislosti odpovídající tzv. *normální disperzi*.

Pro mnohé účely je třeba znát tzv. charakteristickou disperzi látky $dn/d\lambda$, kterou je možné snadno určit derivováním disperzní závislosti $n=n(\lambda)$, je-li známe její analytické vyjádření. Průběh disperzní závislosti se aproximuje různými vzorci. Velmi užívaný a pro běžné účely vyhovující je vzorec

$$n = n_n + \frac{C}{\lambda - \lambda_n}, \quad (3)$$

v němž n_n , C , λ_n jsou konstanty, které je nutno určit z měření indexu lomu pro tři různé vlnové délky. K hrubší charakteristice disperzních vlastností látek se užívá ještě těchto veličin:

střední disperze

$$\Delta = n_F - n_C, \quad (4)$$

relativní disperze

$$\delta_r = \frac{\Delta}{n_D - 1} = \frac{n_F - n_C}{n_D - 1}, \quad (5)$$

Abbeovo číslo

$$\gamma = \frac{1}{\delta_r} = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}. \quad (6)$$

Kde n_D , n_F a n_C jsou indexy lomu na vlnových délkách odpovídajících Fraunhoferovým čarám D, F, C, tj. na (tj. 589,2 nm, 486,1 nm a 656,3 nm)

Měření indexu lomu pomocí refraktometru

Index lomu pevných a kapalných látek lze velmi snadno s dobrou přesností zjistit změřením mezního úhlu při lomu či odrazu na rozhraní dvou prostředí.

Uvažujme rovinné rozhraní dvou prostředí o indexu lomu n_1 , n_2 , přičemž $n_1 < n_2$. Proniká-li světlo z prvního prostředí do druhého, nastává lom ke kolmici. V mezním případě, kdy úhel dopadu je roven 90° (paprsek 2 na Fig.3), šíří se světlo v druhém prostředí pod největším úhlem β_m . Do vyšrafované oblasti na Fig.3 nemůže tedy světlo z prvního prostředí lomem vnikat.

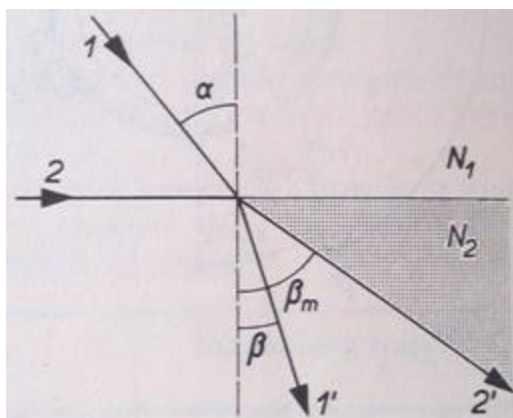


Fig.3. Princip měření refraktometrem v procházejícím světle.

Pro β_m platí podle rovnice (2)

$$\sin \beta_m = \frac{n_1}{n_2}. \quad (7)$$

Šíří-li se naopak světlo z druhého prostředí do prvního, nastává lom od kolmice (Fig.4).

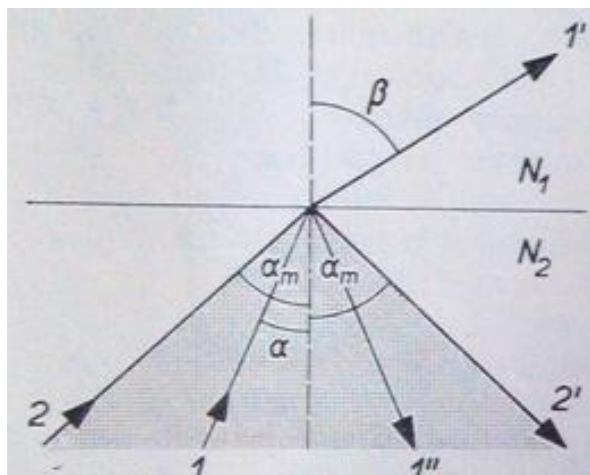


Fig.4. Princip měření refraktometrem v odraženém světle.

Je-li úhel dopadu menší než α_m , pronikne část světla do prvního prostředí a část se odrazí. Je-li úhel dopadu větší než α_m , nastává totální odraz. Ve vyšrafované části na Fig.4 je tedy intenzita odraženého světla menší než v části nešrafované. Pro úhel α_m platí podle rovnice (2) opět

$$\sin \alpha_m = \frac{n_1}{n_2} \quad (8)$$

Na principu měření mezního úhlu se konstruuje refraktometry, kterými lze měřit jednoduše a rychle s malým množstvím měřené látky.

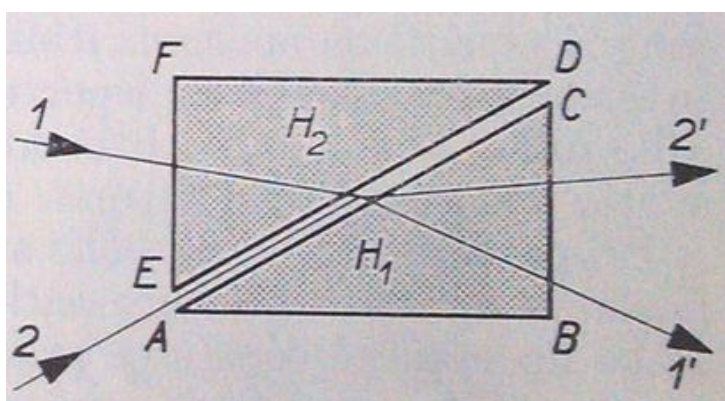


Fig.5. Chod světla dvojhranolovým refraktometrem.

Základní částí refraktometru je dvojhranol H_1 , H_2 , zhotovený ze silně lámavého flintového skla (Fig.5). Hranol H_1 (měřicí) má stěny AC , BC vyleštěny, stěnu AB zrněnou. Druhý hranol (osvětlovací) H_2 má naopak zrněnou plochu ED .

Měřená látka se umísťuje na přeponovou stěnu AC měřicího hranolu. Kapalina se nanese v malém množství a přiklopí osvětlovacím hranolem. Chceme-li měřit index lomu pevné látky, musíme mít k dispozici vzorek, který má alespoň jednu rovinnou plochu dobře vyleštěnou. Přiložíme ho touto plochou na přeponovou stěnu měřicího hranolu, která se předtím navlhčí vhodnou kapalinou s indexem lomu větším, než má měřená látka (v běžných případech se užívá monobromnaftalen, jehož index lomu je roven 1,658).

Měříme buď v procházejícím, nebo v odraženém světle. Při měření na průchod (Fig.5) vstupuje světlo stěnou EF do osvětlovacího hranolu a rozptýlené na jeho zrněné stěně ED vchází do měřené látky. Po lomu na rozhraní mezi látkou a měřicím hranolem vychází stěnou BC . Tato stěna se pozoruje dalekohledem zaostřeným na nekonečno; při jeho vhodném natočení (Fig.3) se zjistí, že část zorného pole je dobře osvětlena a část zůstává tmavá. Při použití monochromatického světla je mezi světlou a tmavou částí ostré rozhraní. Při měření na odraz vchází světlo zrněnou plochou AB do měřicího hranolu. Rozptýlené světlo pak na rozhraní s měřenou látkou a po odraze vystupuje stěnou BC , která se opět pozoruje dalekohledem. V tomto případě přichází v úvahu chod světla podle Fig.4.

Jak jsme již poznamenali, je rozhraní mezi tmavým a světlým polem ostré jen při použití monochromatického světla. Je-li hranol osvětlen světlem bílým, je rozhraní neostré v důsledku

disperze a snižuje se přesnost odečítání mezního úhlu. Aby se tato obtíž odstranila, bývají přístroje konstruované pro bílé světlo vybaveny buď filtrem, nebo kompenzátorem.

Existuje několik typů refraktometru, v praktiku používaný je univerzální refraktometr vyráběný firmou Meopta. Univerzální refraktometr je optický přístroj k měření indexu lomu n_D látek kapalných, plastických a pevných. Index lomu je zároveň znakem čistoty mnohých látek a jednoznačnou mírou koncentrace čtených roztoků. Je tedy možno měřením na refraktometru nahradit často zdlouhavé chemické analýzy.

Měření refraktometrem je velmi jednoduché, rychlé a vyžaduje jen nepatrné množství měřené látky. Refraktometr je proto vhodný pro analýzy, které se často opakují.

Univerzální refraktometr sestává z dalekohledu, dvou kompenzačních hranolů, z dvojice měřících a osvětlovacích hranolů a ze stupnice indexů lomu.

Dalekohled je opatřen v ohniskové rovině nitkovým křížem, na který lze okulár, otáčením jeho objímky, zaostřit v rozmezí ± 3 dioptrií. Kompenzační hranoly jsou otočně uloženy v tělese dalekohledu a jsou spojeny se stupnicí pro výpočet střední disperze. Natáčení se provádí zvenčí vroubkovaným točítkem. Měřící hranoly jsou výměnné; jednak pro měření pevných látek, jednak pro měření látek kapalných. Hranoly jsou zapouzdřeny ve vlastních tělesech. Hranol pro měření kapalných látek je možno při měření temperovat na správnou teplotu protékající vodou, která se přivádí gumovými hadicemi, zapojenými na hubice těles hranolů. Teplota protékající vody se měří teploměrem, který je zamontován v tělese měřícího hranolu.



Fig.6. Univerzální refraktometr Meopta.

K nastavení nejvýhodnějšího osvětlení při měření slouží odklopné zrcátko. Segment se stupnicí indexů lomu je pevně spojen s měřícím hranolem. Je kovový a jeho stupnice je provedena k měření indexu lomu v rozsahu od $n_D = 1,300$ do $1,700$. Stupnice je dělena po $0,001$ a očíslována u každé setiny. Čtení stupnice se provádí proti pevnému indexu lupou. Lupa je pevná a je umístěna vedle okuláru dalekohledu, takže je možné pravým okem sledovat v dalekohledu rozhraní, levým pak ihned přímo číst hodnotu na stupnici. Při nastavování rozhraní se otáčí měřící hranol spolu se stupnicovým segmentem, točením vroubkovaného točítka.

Celý přístroj je upevněn na stabilním stojanu a lze jej při měření sklopit do nejvýhodnější polohy pro pohodlné měření. Při čištění lze přístroj sklopit tak, že jsou hranoly snadno přístupné.

Tabulky a návod k výpočtu střední disperze k univerzálnímu refraktometru.**Tabulka 1.**

n_D	A	B
1,300	0,02397	0,02713
1,310	0,02394	0,02695
1,320	0,02392	0,02675
1,330	0,02389	0,02655
1,340	0,02387	0,02634
1,350	0,02385	0,02612
1,360	0,02383	0,02589
1,370	0,02381	0,02565
1,380	0,02379	0,02540
1,390	0,02378	0,02514
1,400	0,02377	0,02486
1,410	0,02376	0,02458
1,420	0,02375	0,02428
1,430	0,02374	0,02398
1,440	0,02374	0,02366
1,450	0,02373	0,02333
1,460	0,02373	0,02299
1,470	0,02374	0,02263
1,480	0,02374	0,02226
1,490	0,02374	0,02188
1,500	0,02376	0,02149
1,510	0,02377	0,02108
1,520	0,02379	0,02066
1,530	0,02381	0,02022
1,540	0,02383	0,01977
1,550	0,02386	0,01929
1,560	0,02389	0,01881
1,570	0,02393	0,01830
1,580	0,02397	0,01777
1,590	0,02402	0,01723
1,600	0,02407	0,01666
1,610	0,02413	0,01607
1,620	0,02419	0,01545
1,630	0,02427	0,01481
1,640	0,02435	0,01414
1,650	0,02444	0,01344
1,660	0,02455	0,01270
1,670	0,02466	0,01192
1,680	0,02480	0,01110
1,690	0,02495	0,01023
1,700	0,02512	0,00930

Návod k výpočtu střední disperze

Podle údajů výrobce refraktometru je střední disperze:

$$n_F - n_C = A + B \cos(3C)$$

Hodnoty **A** a **B** odečteme podle **Tabulky 1** k příslušným hodnotám měřeného indexu lomu n_D .
Hodnotu **C** odečteme z údajů na stupnici komparátoru při vykompensovaném rozhraní, podle **Tabulky 2** najdeme k hodnotě **C** příslušnou hodnotu **cos(3C)**.

Pozor! Hodnoty **cos(3C)** jsou pro čísla **C=0 až 30** kladné, pro čísla **C=30 až 60** záporné.

Tabulka 2.

C	+ cos(3C) -	C
0	1,000	60
1	0,999	59
2	0,995	58
3	0,988	57
4	0,978	56
5	0,966	55
6	0,951	54
7	0,934	53
8	0,914	52
9	0,891	51
10	0,866	50
11	0,839	49
12	0,809	48
13	0,777	47
14	0,745	46
15	0,707	45
16	0,663	44
17	0,629	43
18	0,588	42
19	0,545	41
20	0,500	40
21	0,454	39
22	0,407	38
23	0,358	37
24	0,309	36
25	0,259	35
26	0,208	34
27	0,156	33
28	0,104	32
29	0,002	31
30	0,000	30

Příprava roztoků

Každý roztok se skládá z rozpouštědla a rozpuštěné látky a představuje stejnorodou, tedy homogenní směs. V anorganické chemii bývá rozpouštědlem hlavně voda. Nejčastěji se setkáváme s roztoky pevné látky a kapaliny nebo roztoky dvou kapalin. Vzájemný poměr těchto dvou základních složek udává jejich koncentraci. V praxi se hlavně setkáme se třemi způsoby přípravy roztoků příslušné koncentrace:

1. molární,
2. hmotnostní,
3. objemovou,
4. vytvoření roztoků z jiného roztoků o známé koncentraci.

1. Molární koncentrace.

V tomto případě se množství látky v roztoku vyjadřuje pomocí molární koncentrace. Příprava roztoku pak vychází ze základní jednotky látkového množství a tím je mol (n). Jeden mol je definován v soustavě SI jako množství látky obsahující stejný počet elementárních částic (atomů, molekul, iontů), kolik je atomů v 0,012 kg nuklidu uhlíku $^{12}_6\text{C}$. Hodnotě látkového množství 1 molu odpovídá $6,022 \cdot 10^{23}$ částic. Počet částic v 1 molu látky ($n=1$) je tedy $6,022 \cdot 10^{23}$ a tato hodnota je označována jako Avogadrova konstanta ($N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$).

Molární roztok určité látky obsahuje 1 mol této látky v 1 litru roztoku. Molární roztok označujeme 1M (molarita). U roztoků je uváděn např. údaj 1M NaCl, 0,2M NaOH. Pro koncentraci roztoku platí definiční vztah:

$$c = \frac{n}{V}$$

a má tedy jednotku $\text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$.

Hodláme-li použít pro výpočet molární hmotnost (M_m) uváděnou v tabulkách, použijeme vztah:

$$c = \frac{m}{M_m V}$$

kde m je hmotnost rozpouštěné látky v kilogramech, objem (V) je objem roztoku v litrech. Taková množství roztoku se v laboratorních podmínkách nepoužívá, stejného výsledku dosáhneme, pokud budeme hmotnost látky uvádět v gramech a objem v mililitrech. Potom ale také musíme molaritu převést na jednotky $\text{mol} \cdot \text{ml}^{-1}$.

2. Hmotnostní vyjádření koncentrace.

Hmotnostní koncentrace (také hmotnostní zlomek), vyjadřuje počet hmotnostních dílů (gramů) látky rozpouštěné ve 100 dílech (gramech) roztoku. Značí se c_m , nabývá hodnot 0-1, a platí pro ni vztah:

$$c_m(A) = \frac{m(A)}{m_r}$$

kde $m(A)$ je hmotnost rozpouštěné látky (A) a m_r je hmotnost roztoku.

Při výpočtech hmotnostní koncentrace je důležité dosadit do jmenovatele hmotnostního zlomku hmotnost celého roztoku, nikoli pouze hmotnost rozpouštědla. Zde se často chybí!

Hmotnostní koncentrace bývá nejčastěji vyjádřena hmotnostním procentem, které získáme vynásobením hodnoty hmotnostního zlomku sty procenty.

$$c_m(\%) = 100\% \cdot c_m(A)$$

3. Objemové vyjádření koncentrace.

Zde budeme postupovat obdobným způsobem jako u hmotnostní koncentrace, jen je třeba si uvědomit, že odměřování objemu kapalných látek je méně přesné, na rozdíl od vah vážících s přesností na miligramy.

4. Vytvoření roztoků z jiného roztoku o známé koncentraci.

Jednoduchou úvahou nad tím, jaké množství čisté látky obsahuje roztok o dané hmotnosti a koncentraci, a zapracováním výsledku do vztahu pro určení koncentrace získám vztah

$$C_\theta = \frac{m_\theta C_\theta}{m_\theta + m_{H_2O}}$$

V něm veličiny m_θ a C_θ znamenají hmotnost a koncentraci "starého" roztoku, který používám jako látku pro přípravu nového roztoku. Veličina m_{H_2O} je hmotnost vody, kterou do roztoku musím dolít, aby měl požadovanou koncentraci C_θ .

Poznámky.

- Při přípravě roztoků je nutné dbát čistoty a pořádek veškerého laboratorního materiálu. Na každou látku používáme nádoby určené výhradně pro tuto jednu látku.
- Základní zásadou při míchání roztoků je přidávat pevnou látku do kapalné, nikoli naopak.
- Při práci na digitálních vahách plně využíváme jejich technické možnosti, kdy můžeme při jednom vážení určit hmotnost látky v nádobě.
- Při míchání roztoků neplýtváme zbytečně chemikáliemi a připravujeme jen takové množství, jaké nezbytně potřebujeme.
- S refraktometrem manipulujte opatrně, především při čištění hranolů. V žádném případě nepoužívejte sílu při jejich odklápění.
- Nešetrou manipulací se vystavujete nebezpečí, že naměříte chybné hodnoty a měření budete muset opakovat.
- Refraktometr neberte za hranoly či měrnou stupnici ale pouze za podstavec! K čištění hranolů používejte vatu a líh.

Postup práce.

- 1) Prostudujte si nejdříve návod k obsluze přístroje.
- 2) Zmáčknutím pružiny se oddělí osvětlovací hranol od měřicího hranolu opatrně tak, aby osvětlovací hranol nespadl. Obě plochy, tj. leštěná plocha měřicího hranolu a matovaná plocha osvětlovacího hranolu, se vyčistí destilovanou vodou a lihem, a osuší filtračním papírem.
- 3) Při nanášení měřené látky je nutné sklopit přístroj do vodorovné polohy a po odjištění odklopit osvětlovací hranol. Na hranol nanášejte jen malé množství roztoku.
- 4) Koncentraci roztoku připravte v oboru 100-0 váhových procent po 10 % (100 - 0 % roztok). V protokolu přesně uveďte, jak jste roztoky připravili. Měření začněte od 100 % roztoku, který postupně ředíte.
- 5) Okulár dalekohledu zaostřete tak, aby obraz nitkového kříže byl ostrý.
- 6) Při měření je důležité, aby v zorném poli dalekohledu byl dostatečný kontrast světla a stínu.
- 7) Každé měření pro danou koncentraci roztoku proveďte 5krát.
- 8) Po každém měření očistěte pečlivě měrné plochy refraktometru lihem a osušte. Po skončení měření důkladně očistěte celý přístroj.
- 9) Tabulky budou obsahovat následující parametry: koncentrace roztoku (K), komparace (C), index lomu (n_D), hodnoty A, B, $\cos(3C)$, střední disperze ($n_F - n_C$).
- 10) Naměřené hodnoty zpracujte do grafů závislosti indexu lomu na koncentraci a závislosti střední disperze na koncentraci.
- 11) V protokolu uveďte ve stručnosti princip měření refraktometrem.

**Kontrolní otázky**

- Co rozumíme pod pojmem tzv. refraktometr? Znáte princip měření refraktometrem?
- Co to je index lomu, popište základní vlastnosti?
- Stručně popište zákon lomu?
- Popište relativní index lomu.
- Jak můžeme počítat střední disperzi?

**Literatura.**

- 1) BROŽ, J., aj. *Základy fyzikálních měření I*. 2. vyd. Praha: SPN, 1983.
- 2) Manuál k univerzálnímu refraktometru Meopta.
- 3) Tabulky a návod k výpočtu střední disperze k univerzálnímu refraktometru.

6 Studium fotoelektrického jevu

Úkol:

- Změřte hodnoty napětí a anodového proudu a zpracujte graficky do voltampérové charakteristiky;
- Pro každou vzdálenost zjistěte úroveň osvětlení fotonky pomocí fotometru a tento údaj zpracujte do grafu voltampérové charakteristiky fotonky;
- Pro vzdálenost zdroje světla od fotonky 0,5 m a pro konstantní hodnoty napětí 50, 100 a 150 V určete luxampérovou charakteristiku pro danou fotonku;
- Zjistěte, zda je fotonka vakuová či plněná plynem;
- Z naměřených hodnot určete svítivost zdroje světla.

Klíčová slova.

Světelný tok, Osvětlení, Svítivost, Fotometr, Fotonka.



Uspořádání experimentu.

Na optickou lavici s milimetrovou stupnicí umístíme měřenou fotonku a bodový zdroj. Změnou vzdálenosti fotonky a zdroje, a hodnot napětí můžeme nastavit na fotonce různé hodnoty osvětlení, respektive světelného toku, a dostat voltampérovou a luxampérovou charakteristiku pro danou fotonku. Nakonec můžeme počítat svítivost zdroje.



Pomůcky.

Optická lavice, stojánky, fotonka, zdroj stejnosměrného napětí 250 V, voltmetr, ampérmetr, žárovka 8V/50W, reostat 10 k Ω , fotometr (luxmetr).

Teorie.

Základní fotometrické veličiny a jednotky.

Světelný tok.

Světlo jako elektromagnetické záření je z energetického hlediska charakterizováno veličinou Φ_e nazývanou zářivý tok. Zářivý tok je definován jako výkon přenášený zářením uvažovanou plochou. Podle toho je jeho jednotkou watt (W).

Veličina Φ_e však dobře nevystihuje optické účinky záření, poněvadž lidské oko je různě citlivé na různé vlnové délky. Je proto nutné zavést další veličinu, která by vyjadřovala schopnost záření vyvolat zrakový vjem. Touto veličinou je světelný tok Φ , který je pro daný libovolný zářivý tok Φ_e definován vztahem

$$\Phi = K\Phi_e, \quad (1)$$

v němž K je tzv. světelná účinnost záření.

Kromě světelné účinnosti záření K se zavádí ještě světelná účinnost monochromatického záření vlnové délky λ při čípkovém vidění K_λ , a při tyčinkovém vidění K'_λ . Pro světelný tok $\Phi(\lambda)$ odpovídající čípkovému vidění, který je dán monochromatickým zářením vlnové délky λ o zářivém toku $\Phi_e(\lambda)$, platí tedy $\Phi(\lambda) = K_\lambda \Phi_e(\lambda)$. Analogicky pro tyčinkové vidění bude $\Phi'(\lambda) = K'_\lambda \Phi_e(\lambda)$.

Světelná účinnost monochromatického záření závisí na vlnové délce. Při čípkovém vidění je světelná účinnost maximální pro $\lambda=555 \text{ nm}$. Označíme-li tuto hodnotu K_m , přičemž $K_m=680 \text{ lm/W}$, můžeme zavést poměrnou světelnou účinnost $V_\lambda = K_\lambda/K_m$. Při tyčinkovém vidění je maximální světelná účinnost K'_m pro $\lambda=507 \text{ nm}$. Poměrná světelná účinnost V'_λ je v tomto případě zavedena vztahem $V'_\lambda = K'_\lambda/K'_m$. Hodnoty V_λ , respektive V'_λ je pro obor viditelného záření nutné určit experimentálně (Mimo tento obor je ovšem $V_\lambda = V'_\lambda = 0$). Z velkého počtu měření byla sestavena tabulka poměrné spektrální účinnosti "normálního" oka, která byla uzákoněna.

Pomocí takto zavedených veličin je možné jednoznačně vyjádřit světelný tok odpovídající libovolnému záření, známe-li spektrální hustotu jeho zářivého toku $\Phi_e(\lambda)$. Pro světelný tok pak platí

$$\Phi = \int_0^\infty K_\lambda \Phi_e(\lambda) d\lambda = K_m \int_0^\infty V_\lambda \Phi_e(\lambda) d\lambda. \quad (2)$$

Odtud pro světelnou účinnost plyne

$$K = K_m \frac{\int_0^\infty V_\lambda \Phi_e(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty \Phi_e(\lambda) d\lambda}. \quad (3)$$

Jednotkou světelného toku v mezinárodní soustavě jednotek SI je lumen (lm). Lumen je definován jako světelný tok, který vyzařuje do prostorového úhlu 1 steradiánu (sr) bodový zdroj, jehož svítivost je ve všech směrech rovna 1 kande (cd). Často se užívá též větší jednotky zvané dekalumen (Dlm) a rovné 10 lm.

Jas.

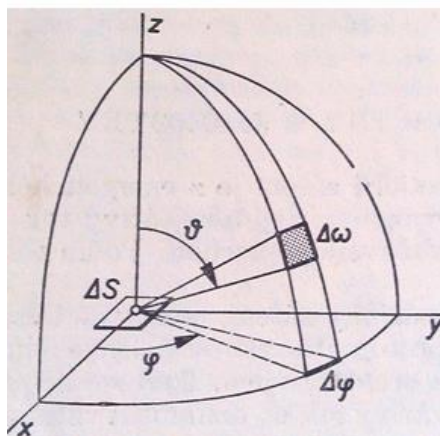


Fig. 1. K výkladu jasu.

Uvažujme malou plošku ΔS vytknutou na povrchu plošného světelného zdroje. Položme do jejího středu počátek soustavy souřadné tak, aby osa z splývala s její normálou. Budeme hledat světelný tok vysílaný do malého prostorového úhlu $\Delta\omega$ (Fig.1). Velikost tohoto toku bude zřejmě úměrná velikosti plošky ΔS , prostorového úhlu $\Delta\omega$ a kosinu úhlu ϑ , který svírá směr (osa) světelného toku do úhlu $\Delta\omega$ s normálou plošky ΔS . Podle toho bude platit

$$\Delta\Phi = L \cos \vartheta \Delta S \Delta\omega. \quad (4)$$

Veličina L charakterizuje vlastnosti zdroje a nazývá se jeho jasem. Obecně může být jas zdroje v různých směrech různý, tj. $L=L(\varphi, \vartheta)$.

Hlavní jednotkou jasu v mezinárodní soustavě jednotek SI je nit (nt). V rámci mezinárodní soustavy je možné užívat též větší jednotku kilonit (knt).

Světlení.

Světlením plošného zdroje (respektive svítící plochy) nazýváme celkový světelný tok vysílaný jednotkovou plochou do celého poloprostoru.

Označíme-li tedy $\Phi_{\Delta S}$ světelný tok vysílaný ploškou ΔS bude světelní H dáno výrazem

$$H = \frac{\Phi_{\Delta S}}{\Delta S}. \quad (5)$$

Na základě vztahu (4) lze pro světlení psát

$$H = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\frac{\pi}{2}} L(\varphi, \vartheta) \cos \vartheta \sin \vartheta d\vartheta. \quad (6)$$

Speciálně pro světlení kosinového zářiče z této rovnice plyne

$$H = \pi L. \quad (7)$$

Jednotka světlení nemá v mezinárodní soustavě zvláštního názvu. Světlení se vyjadřuje v lumenech na metr čtvereční ($\text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$). Dříve užívanou jednotkou byl radphot (rph). Mezi radphotem a lumenem na čtvereční metr platí vztah $1 \text{ rph} = 10^4 \text{ lm} \cdot \text{m}^{-2}$.

Osvětlení.

Osvětlením dané plochy rozumíme celkový světelný tok dopadající na její část o jednotkovém obsahu. Bude-li $\Phi_{\Delta S}$ světelný tok dopadající na plošku ΔS , bude pro osvětlení E platit

$$E = \frac{\Phi_{\Delta S}}{\Delta S}. \quad (8)$$

Jednotkou osvětlení je lux (lx). Osvětlení plochy je rovno 1 luxu (lx), jestliže na 1 čtvereční metr této plochy dopadá světelní tok 1 lumenu (lm).

Svítivost.

Uvažujme zdroj světla dostatečně malých rozměrů, aby bylo možno zanedbat jeho rozměry vzhledem ke vzdálenosti, ze které zdroj pozorujeme. Pro světelný tok vysílaný celým zdrojem do prostorového úhlu $\Delta\omega$ (Fig.1) platí podle rovnice (4)

$$\Delta\Phi = \Delta\omega \int_S L \cos \vartheta dS \quad (9)$$

Veličina

$$I(\varphi, \vartheta) = \int_S L \cos \vartheta dS \quad (10)$$

se nazývá svítivostí zdroje.

Podle rovnice (9) platí

$$I = \frac{\Delta\Phi}{\Delta\omega}. \quad (11)$$

Svítivost v daném směru je tedy podíl světelného toku vysílaného celým zdrojem do malého prostorového úhlu v tomto směru a tohoto prostorového úhlu. Tato veličina je zvlášť vhodná pro charakterizování bodových zdrojů.

Pro malý plošný zdroj, jehož střední jas ve směru $\Delta\omega$ je $\bar{L}$, platí podle rovnice (10)

$$I(\varphi, \vartheta) = \bar{L} \cos \vartheta \Delta S. \quad (12)$$

Půjde-li speciálně o kosinový zářič a označíme-li $\bar{L}\Delta S = I_0$ svítivost v kolmém směru dostaneme vztah

$$I = I_0 \cos \vartheta, \quad (13)$$

který vyjadřuje pro tento případ znění Lambertova zákona.

Jednotka svítivosti zvaná kandela (cd) je základní optickou jednotkou v mezinárodní soustavě jednotek. Je definována jako kolmá svítivost 1/600000 čtverečného metru povrchu absolutně černého tělesa při teplotě tuhnutí platiny za tlaku 101325 Pa.

Fotometrické metody.

a) Subjektivní metody.

Subjektivní fotometrické metody jsou založeny na poznatku, že lidské oko je schopno se značnou přesností rozeznat různost jasů dvou sousedních ploch vysílajících světlo stejné barvy.

b) Zeslabování světla referenčního zdroje je možné uskutečňovat několika způsoby: změnou vzdálenosti referenčního zdroje od fotometru nebo zařazením rotující výseče, proměnné clony, polarizačního zařízení případně absorpčního klínu.

$$E = \frac{I \cos \alpha}{l^2} \quad (14)$$

c) Objektivní metody.

Objektivní metody nahrazují oko jiným zařízením, které převádí dopadající světelný tok na některou jinou veličinu, obvykle elektrickou. Používá se termočlánek, bolometr, fotoelektrických elementů, fotonásobičů a fotografické desky.

Základní věci fotoelektrického jevu.

a) Fotoelektrické odpory.

Základním materiálem je polovodič s poměrně velkým měrným odporem, u kterého dochází k vnitřnímu fotoelektrickému jevu. Tímto jevem rozumíme uvolňování párů elektron - díra při dopadu světelných kvant. Důsledkem pak je zvýšení vodivosti polovodiče. Energie světelných kvant musí být dostatečně velká, aby uvolněný náboj překonal zakázaný pás, jehož šířka je u germania 0,75 eV a u křemíku 1,1 eV. K zvýšení vodivosti může dojít pouze při dopadu záření kratších vlnových délek než asi 1,5 μm u germania a 1,9 μm u křemíku. Dlouhovlnné infračervené záření není těmito polovodiči absorbováno a nezpůsobí změnu jejich vodivosti.

Voltampérové charakteristiky fotoelektrických odporů jsou lineární. Tvar lumenampérových charakteristik lze přibližně vyjádřit vztahem

$$I = A\Phi^\alpha, \quad (15)$$

v němž A a α jsou konstanty, přičemž $\alpha < 1$, I je proud a Φ světelný tok (jak bylo ukázáno dříve).

Odpor neosvětleného fotoelektrického odporu bývá 10^4 až $10^6 \Omega$. Při osvětlení 100 lx klesá odpor až o 3 řády. Výkon ztracený na odporu nesmí obvykle překročit hodnotu 0,1 až 0,5 W.

b) Vakuové a plynové fotony.

Jsou tvořeny skleněnou baňkou, jejíž stěny jsou, až na vstupní okénko, postříbřeny. Proti vstupnímu okénku je na stěně baňky nanášena citlivá vrstva schopná fotoemise. Tato vrstva tvoří katodu fotony a uprostřed fotony je umístěna anoda. Elektrické pole je vytvořeno napětím přiloženým mezi anodu a katodu a přitahuje elektrony uvolněné fotoemisí z katody směrem k anodě. Po osvětlení se stane fotonka vodivou.

Na Fig.2 jsou znázorněny voltampérové charakteristiky vakuových a plynových fotonek pro několik hodnot světelného toku. U vakuových fotonek můžeme pozorovat obdobně jako u některých typů vakuových diod oblast nasyceného proudu. Překročí-li anodové napětí určitou mez, proud protékající fotonkou volíme pracovní bod. V oblasti nasyceného proudu je citlivost přibližně konstantní, nezávisí na hodnotě anodového napětí ani na velikosti světelného toku.

U plynových fotonek, které se liší od vakuových tím, že je baňka plněna inertním plynem o nízkém tlaku, nelze pozorovat oblast nasyceného proudu. U těchto fotonek způsobují emitované fotoelektrony ionizaci přítomného plynu, čímž dojde k zesílení proudu protékajícího fotonkou. Charakteristiky plynových fotonek jsou nelineární a citlivost je závislá jak na anodovém napětí, tak na velikosti světelného toku.

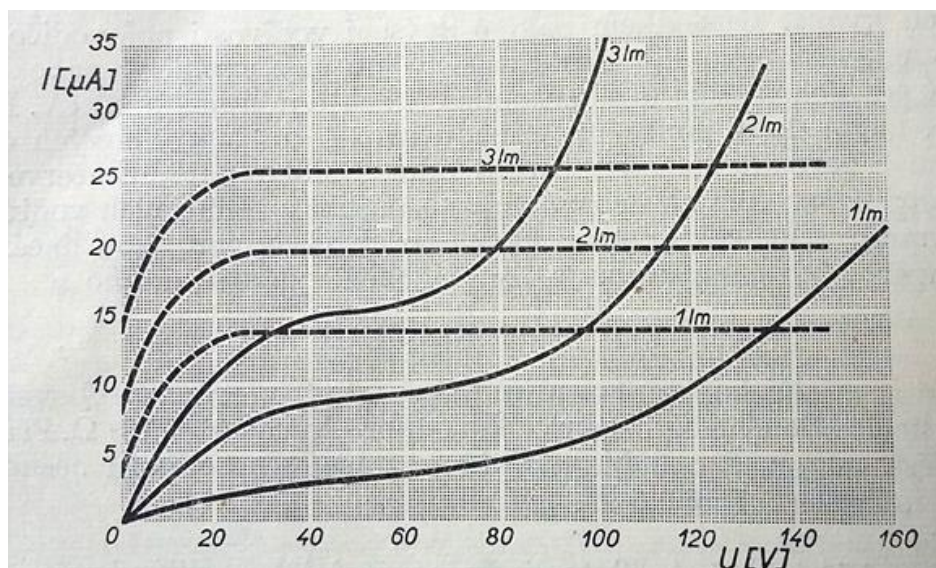


Fig.2. Přibližný průběh voltampérových charakteristik vakuových (čárkovaně) a s plynem plněných (vyznačeno plně) fotonek.

c) Měření charakteristik fotocitlivých prvků.

Vlastnosti fotonek se popisují pomocí vztahů mezi veličinami: světelným tokem Φ dopadajícím na fotonku (respektive osvětlením E fotonky), napětím U přiloženým k fotonce a proudem I fotonkou protékajícím. Závislost mezi těmito veličinami se obvykle vyjadřuje pomocí sítě voltampérových nebo tzv. lumenampérových charakteristik.

Lumenampérovou charakteristikou fotonky rozumíme závislost proudu I na světelném toku Φ při konstantním napětí U přiloženém k fotonce. Proud měříme obvykle v mikroampérech a světelný tok v lumenech (lm). V některých případech se lumenampérová charakteristika nahrazuje charakteristikou luxampérovou, která udává závislost proudu obvodem na osvětlení fotonky měřeném v luxech (lx).

Měření voltampérových charakteristik fotocitlivých prvků se v podstatě neliší od měření charakteristik jiných dvojpólových prvků (např. pro diody). Podle velikosti odporu měřeného prvku použijeme zapojení podle Fig.3 (při malém odporu) nebo Fig.4 (při velkém odporu). Měřený prvek je zapojen místo diody.

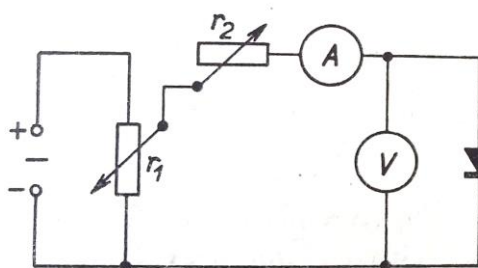


Fig.3. Obvod pro měření voltampérové charakteristiky diody v propustném směru.

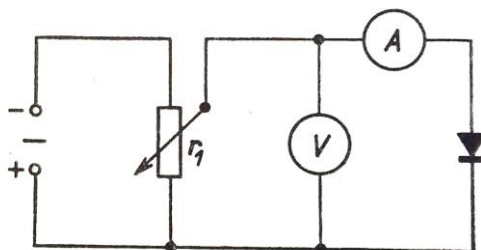


Fig.4. Obvod pro měření voltampérové charakteristiky diody v nepropustném směru.

Určité obtíže činí pouze nastavení dané hodnoty světelného toku (respektive osvětlení) dopadajícího na fotonku. Tuto otázku řešíme buď tím, že změříme některou fotometrickou metodou světelný tok nebo osvětlení na místě, kde je měřená fotonka, nebo použijeme bodového zdroje o známé svítivosti, který umístíme do určité vzdálenosti od fotonky.

Popíšeme podrobněji druhou eventualitu. Na optickou lavici s milimetrovou stupnicí umístíme měřenou fotonku a bodový zdroj, jehož svítivost J je ve směru, ve kterém je umístěna fotonka, známa. Při vzdálenosti l zdroje od fotonky platí pro osvětlení E fotonky podle rovnic (8) a (14)

$$E = \frac{J}{l^2}. \quad (16)$$

Je-li plocha aktivní částí fotonky S , bude světelný tok Φ dopadající na fotonku dán výrazem

$$\Phi = ES = J \frac{S}{l^2}. \quad (17)$$

Jak vyplývá z rovnic (16), respektive (17), lze změnou vzdálenosti fotonky a zdroje nastavit na fotonce zvolenou hodnotu osvětlení, respektive světelného toku. Přitom je ovšem třeba dbát na to, aby rozměry zdroje byly vůči vzdálenosti l zanedbatelně malé.

Fotonku zapojíme do některého z elektrických obvodů znázorněných na Fig.3 nebo Fig.4. Závisí na druhu fotonky, který z obvodů použijeme.

Poznámky.

- Maximální přípustné anodové napětí fotonky je 200 V !!!
- Fotonku zapojte bez ochranného odporu R uvedeného ve schématu literatury.
- Dbejte zvýšené opatrnosti při měření, pracujete s vysokým napětím !!!

Postup práce.

- 1) Fotonku zapojte do elektrických obvodů bez ochranného odporu R uvedeného ve schématu literatury.
- 2) Zapněte zdroj světla a nastavte na zvolenou hodnotu osvětlení E při vzdálenosti $l = 0.5$ m.
- 3) Změřte závislost proudu I protékajícího obvodem na napětí U měřeném voltmetrem V pro 5 různých hodnot osvětlení (Vzdálenost osvětlení fotonky volte po 10 cm od 0,5 m do 0,9 m);
- 4) Výsledky měření zpracujte do tabulky a graficky do voltampérové charakteristiky fotonky. Pro každou vzdálenost zjistěte úroveň osvětlení fotonky pomocí fotometru a tento údaj zpracujte taky do tabulky a grafu voltampérové charakteristiky fotonky.
- 5) Nastavte vzdálenost zdroje světla od fotonky 0,5 m a pro konstantní hodnoty napětí 50, 100 a 150 V změřte závislost proudu I na osvětlení E . Osvětlení fotonky měňte změnou vstupního napětí zdroje světla.
- 6) Výsledky měření zpracujte do tabulky a graficky do luxampérové charakteristiky fotonky.
- 7) Rozborem zjistěte, zda je fotonka vakuová či plněná plynem.
- 8) Uvažujte bodový zdroj světla a z naměřených hodnot určete jeho svítivost J .
- 9) Vypnete zdroj světla a rozeberte elektrický obvod do počátečního stavu.



Kontrolní otázky

- Co rozumíme pod pojmem tzv. fotoelektrický jev?
- Co to je světelný tok, osvětlení a svítivost, popište základní vlastnosti?
- Stručně popište co to je luxampérová a voltampérová charakteristika fotonky?
- Stručně popište fotometrické metody?
- Jak můžeme zjistit, zda je fotonka vakuová či plněná plynem?



Literatura.

- 1) BROŽ, J., aj. *Základy fyzikálních měření I*. 2. vyd. Praha: SPN, 1983.

7 Měření absorpce světla roztoků spektrofotometrem SPEKOL

Úkol:

- Seznámení se s činností spektrofotometru SPEKOL 11;
- Změřte extinkci (útlum) a určete absorpci světla v roztocích bromkresolové zeleně v oblasti viditelného záření;
- Výsledky tabelárně zpracujte;
- Graficky znázorněte závislost koeficientu absorpce na vlnové délce pro různé koncentrace;
- Pro několik vlnových délek ověřte platnosti Lambertova-Beerova zákona.

Klíčová slova.

Absorpce světla, koeficient absorpce, zákon Lambertův-Beerův, Extinkce, Roztok.



Uspořádání experimentu.

SPEKOL 11 je jednopaprskový spektrofotometr, vybavený mikroprocesorovou technikou. Charakteristické pro přístroj je dalekosáhle automatizovaný způsob práce a velký rozsah použití. SPEKOL používá jednopaprskové uspořádání. V tom případě se světelný paprsek ze zdroje nedělí a měrný a referenční vzorek se do jeho dráhy vkládají postupně. Z podílu změřených světelných toků lze změřit transmitanci a extinkci. Pak můžeme počítat koeficient absorpce a závislost koeficientu absorpce na vlnové délce pro různé koncentrace roztoků.

Tento přístroj pracuje tak, že pomocí různých pružin, závaží a jejich kmitání můžeme počítat tuhost pro každou pružinu, a také jejich kruhovou frekvenci.



Pomůcky.

Spektrofotometr SPEKOL s příslušenstvím, Roztok bromkresolové zeleně, Nádobky, Váhy.

Teorie.

Absorpci světla při jeho průchodu látkou charakterizujeme tzv. transmitancí (nazývanou též činitelem prostupu či propustností), která je definována vztahem

$$\tau = \frac{\Phi_t}{\Phi_0} \quad (1)$$

v němž Φ_0 je světelný tok na látku dopadající, Φ_t tok látkou prošlý. Ztráty světla mohou být částečně způsobeny odrazy na rozhraní při vstupu světla do látky a při výstupu z ní. Jestliže se podíl týká pouze ztrát na dráze světla uvnitř látky a nezahrnuje ztráty na rozhraní, hovoříme o vnitřní transmitanci nebo o činiteli vnitřního prostupu. Uvažujeme-li průchod monochromatického světla vrstvou homogenní látky o tloušťce, pak závislost vnitřní transmitance na tloušťce je zpravidla dána Lambertovým zákonem.

$$\tau_i = e^{-x_n l} \quad \text{respektive} \quad \tau_i = 10^{-x l} \quad (2)$$

kde konstanta x_n , respektive x se nazývá koeficient absorpce (též extinkční modul nebo absorpční konstanta). Záporně vzatý logaritmus transmitance nazýváme extinkcí, nebo též absorbancí.

Označíme-li přirozenou extinkci E_n a dekadickou E , lze vztahy (2) přepsat ve tvaru

$$E_n = x_n l \quad \text{respektive} \quad E = x l \quad (3)$$

Koeficient absorpce obecně závisí na vlnové délce procházejícího světla, na teplotě, tlaku apod. Jsou-li tyto veličiny konstantní, závisí koeficient absorpce na koncentraci absorpčních center v látce. Při absorpci v roztoku s koncentrací c tak nízkou, že nedochází ke vzájemnému ovlivňování absorbujících molekul, je extinkce při dané tloušťce vrstvy přímo úměrná koncentraci c (Beerův zákon). Vztahy lze pak přepsat ve tvaru

$$\tau_i = e^{-\varepsilon_n c l} \quad \text{respektive} \quad \tau_i = 10^{-\varepsilon c l} \quad (4)$$

což je tzv. zákon *Lambertův-Beerův*, nazývaný někdy též *Boguerův-Lambertův-Beerův*. Konstantu ε_n , respektive ε nazýváme přirozený, respektive dekadický extinkční koeficient. Jeho hodnota závisí na volbě jednotek pro koncentraci c . Je-li c udáno jako molární koncentrace, mluvíme o molárním extinkčním koeficientu, při jiných jednotkách koncentrace jde o speciální extinkční koeficienty. Je-li v roztoku N druhů navzájem se neovlivňujících absorpčních center (molekul, iontů apod.), získá se extinkce roztoku sečtením příspěvků jednotlivých druhů center s koncentracemi c_i a extinkčními koeficienty ε_i

$$E = l \sum_{i=1}^N \varepsilon_i c_i \quad (5)$$

Měření optické absorpce má široké použití. Absorpční spektrum látky, tj. závislost absorpce (charakterizované např. koeficientem absorpce) na vlnové délce, dává cenné informace o struktuře látky. Absorpční spekter se užívá též k identifikaci neznámé látky v chemické kvalitativní analýze a k určování koncentrace roztoků.

Měření absorpce spektrálními fotometry.

Měření lze provádět v podstatě libovolným ze spektrálních fotometrů. Velká část spektrálních fotometrů je již přímo konstruována pro měření absorpce a vybavena příslušnými zařízeními, tj. zdrojem světla a držákem vzorků. Při měření subjektivními fotometry je třeba použít tzv. *dvoupaprskového uspořádání*. Světlo zdroje se při něm dělí na dva paprsky stejné intenzity, z nichž jeden prochází měřeným vzorkem, druhý vzorkem srovnávacím. Fotometrem určíme poměr světelných toků, které prošly vzorky a získáme tak hodnotu transmitance. Abychom vyloučili chyby vzniklé nestejnou propustností optické soustavy pro oba paprsky, je třeba měření opakovat při záměně obou vzorků a brát z obou výsledků průměrnou hodnotu, nebo provést kontrolní měření se dvěma stejnými vzorky a určit příslušnou korekci. Jako referenční vzorek je vhodné volit podobný materiál jako vzorek měřený, v němž však nedochází k absorpci. Při měření roztoků například používáme dvou stejných kyvet, z nichž jednu naplníme měřeným roztokem, druhou čistým rozpouštědlem. Při vhodně zvoleném referenčním vzorku lze prakticky vyloučit chyby způsobené odrazy na rozhraní, absorpcí ve stěně kyvety apod.

V jednoduchých objektivních spektrálních fotometrech, jako je např. SPEKOL, se používá jednopaprskové uspořádání. V tom případě se světelný paprsek ze zdroje nedělí a měrný a referenční vzorek se do jeho dráhy vkládají postupně. Z podílu změřených světelných toků lze vypočítat

transmitanci podobně jako v předchozím případě. Nevýhodou jednopaprskového uspořádání je, že se výsledek zatíží chybami způsobenými kolísáním svítivosti zdroje světla, není-li tento zdroj dostatečně stabilní.

Popis přístroje SPEKOL 11

a) Použití.

SPEKOL 11 je jednopaprskový spektrofotometr, vybavený mikroprocesorovou technikou.

Charakteristické pro přístroj je dalekosáhle automatizovaný pracovní způsob a velký rozsah použití.

Ve spojení s velkým počtem měřících násad, přizpůsobených příslušnému úkolu měření se přístroj používá k měření:

- transmise **T**,
- extinkce **E**,
- Kinetických reakcí **KIN**,
- fluorescence **FL**,
- zákalu **TR**,
- koncentrace na základě určení extinkce $C_E = F \cdot E$, fluorescence $C_{FL} = F \cdot (FL)$, zákalu $C_{TR} = F \cdot (TR)$.
- Faktoru **F** zkoušek kalibrování se známou koncentrací **C**,
- konce titrace na základě **E - FL - TR**,
- remise (světlosti).

b) Sestavení.

Základní přístroj je sestaven kompaktním stavebním způsobem. Má ve stejném přístroji prachotěsně uzavřený mřížkový monochromátor s velkou světlostí. Nad tím je v provedení jako modul elektronika přístroje včetně zásobování proudem pro stabilizovaný proud světelného zdroje.

c) Pole obsluhy.

Ovládáním jednoho z následujících tlačítek se přístroj nastaví na způsob měření, značený označením tlačítka.

T - měření transmise,

E - Měření extinkce,

CAL - kalibrování. Přístroj se uvede do toho stavu měření, při kterém se po vložení požadované koncentrace vložené zkoušky kalibrování (standardní zkoušky) zjistí faktor přepočtení k určení koncentrace z přístroje a přenáší se do paměti faktoru.

FL - měření fluorescence, zákal, remise.

KIN START - určení aktivity u reakčně kinetického měření. Tlačítko se používá pro volbu druhu (způsobu) měření KINETIK a k vybavení STARTU u reakčně kinetického měření. Vždy nastavený způsob měření se indikuje rozsvícením příslušné indikace LED. Rozsvícení dodatečných LED se používá jako upozornění pro další vkládání údajů.

d) Zapnutí.

Po zapnutí přístroje stisknutím síťového vypínače "~~" následuje vyzvání, blikajícími luminescenčními diodami **T - E - C - CAL - FL - KIN**. Stisknutím jednoho z těchto tlačítek zvolíte požadovaný způsob měření. Po provedeném stisknutí vyzývají blikající luminescenční diody v klávesnici "vkládání údajů" ke vkládání příslušných údajů nebo vyrovnání reference. Udání sledu obsluhy působí pouze po zapnutí přístroje nebo po přechodu z jednoho způsobu měření **FL - KIN** na jiný způsob měření **T - E - C - CAL**. Pokud je tedy nutné např. po ukončení řady naměřených hodnot vkládat jiné parametry měření, aniž by se přístroj mezitím vypnul, je tedy možné vkládat nové faktory a nové vyrovnání reference po stisknutí tlačítka **FAKT** a **R**, aniž by předtím blikáním příslušných luminescenčních diod proběhlo vyzvání ke stisknutí tohoto tlačítka.

U následujícího popisu pracovního způsobu se vychází vždy ze stavu přístroje po stisknutí tlačítka sítě "~~". Po zapnutí musí přístroj před začátkem měření asi 15 minut zahořovat.

e) Měření transmise **T** (Fig.1).

- Nastavení délky vlny měření (8). U $\lambda < 390$ nm filtru rozptýleného světla otočit do dráhy paprsků (12);
- přijímač záření (citlivý na červenou nebo modrou zasunout až na doraz do dráhy paprsků (4);
- umístit zkoušku reference do dráhy paprsků;

- stisknout tlačítko **T**, bliká **R**;
- stisknout tlačítko **R**. Po ukončení automatického vyrovnání přístroje následuje indikace **100.0 (=T)**, luminescenční dioda zhasne. Při vyšším zesílení a po delším zatemnění fotonek dochází k malému prodloužení doby vyrovnání;
- Objeví-li se indikace **-OFL** nebo **OFL** je světelná energie u vyrovnání reference příliš nízká nebo vysoká a musí se změnit (tabulka 1). Potom se stisknutím **R** znovu provede vyrovnání přístroje;

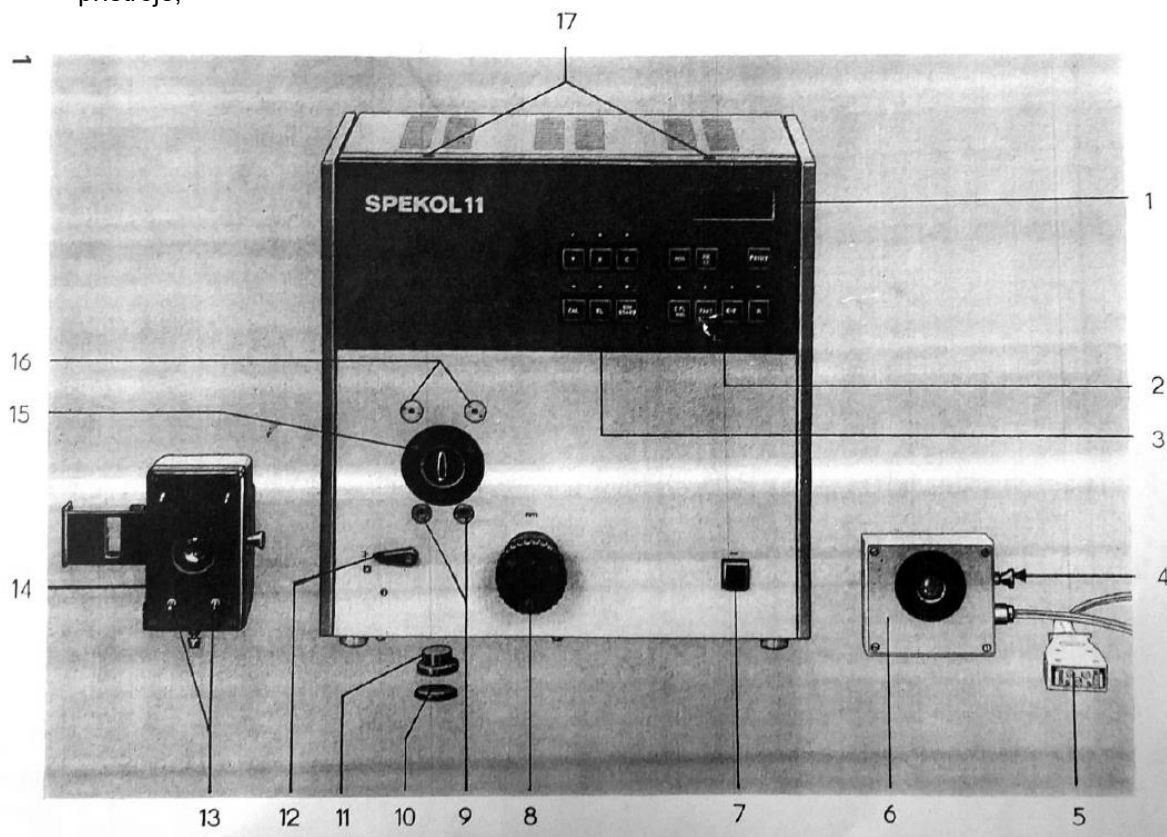


Fig. 1. K měření transmise a extinkce.

- Zkušební vzorek zasunout do dráhy paprsků a přečíst naměřenou hodnotu. U delších řad naměřených hodnot je možné občasným umístěním zkoušky reference rychle zkontrolovat stav (pracovní) přístroje, a pokud je to zapotřebí stisknutím **R** provést vyrovnání přístroje.

f) Měření extinkce **E** (Fig.1)

- Nastavení vlnové délky měření (8). U $\lambda < 390$ nm filtru rozptýleného světla otočit do dráhy paprsků (12);
- přijímač záření (citlivý na červenou nebo modrou) zasunout až na doraz do dráhy paprsků (4);
- vsadit do dráhy paprsků zkoušku reference;
- Stisknout tlačítko **E**, bliká **R**;
- Stisknout tlačítko **R**. Po ukončení automatického vyrovnání přístroje následuje indikace **0.000 (=E₀)** a zhasne luminescenční dioda. Objeví-li se indikace **-OFL** nebo **OFL** je světelná energie u vyrovnání reference příliš nízká nebo vysoká a musí se změnit (Tabulka 1). Potom se stisknutím **R** znovu provede vyrovnání přístroje;
- umístit zkušební vzorek do dráhy paprsků, odečíst naměřenou hodnotu.

Tabulka 1 – SPEKOL 11 – seznam chyb

Skupina chyb	Stavební skupina	Číslo chyby	Příčina	Opatření
-	Analogický kanál	OFL	intenzita záření příliš vysoká	zasunout clonu do dráhy paprsků, páku (12) na Fig.1. U velmi citlivých fotonek případně dráhu paprsku zeslabit šedým filtrem
-	Analogický kanál	-OFL	intenzita záření při 100% vyrovnaní velmi nízká, chybná fotonka, fotonka není napojena, filtr je otočený otočená zkouška, reference absorbuje velmi silně	vyměnit fotonku, fotonku napojit, filtr vytočit zvýšit napětí lampy
E0	Analogický kanál	E01 E02	negativní signál u uzavřené clony signál příliš velký při uzavřené cloně vnikání falešného světla, při měření fluorescence je výsledek slepé zkoušky, fluorescence velmi vysoký	Servis odstranit falešné světlo snížit výsledek slepé zkoušky fluorescence
E2	Klávesnice	E21 E22	Chyba klávesnice	servis
E4	Klávesnice	-E41	chybné ovládání "INC" (bez přísl. "POS")	tlačítko POS stisknout před tlačítkem INC
E5	Řízení tiskárny	E50 E51, E52	tiskárna není pohotová (kabel, sit) chyba ve výměně signálů	Servis Servis

Zrušení indikovaného čísla chyby se provede stisknutím "INC/CE".

Příprava roztoků

Každý roztok se skládá z rozpouštědla a rozpuštěné látky a představuje stejnorodou, tedy homogenní směs. V anorganické chemii bývá rozpouštědlem hlavně voda. Nejčastěji se setkáváme s roztoky pevné látky a kapaliny nebo roztoky dvou kapalin. Vzájemný poměr těchto dvou základních složek udává jejich koncentraci. V praxi se hlavně setkáváme se třemi způsoby přípravy roztoků příslušné koncentrace:

1. molární,
2. hmotnostní,
3. objemovou,
4. vytvoření roztoků z jiného roztoků o známé koncentraci.

1. Molární koncentrace.

V tomto případě se množství látky v roztoku vyjadřuje pomocí molární koncentrace. Příprava roztoku pak vychází ze základní jednotky látkového množství a tím je mol (n). Jeden mol je definován v soustavě SI jako množství látky obsahující stejný počet elementárních částic (atomů, molekul, iontů), kolik je atomů v 0,012 kg nuklidu uhlíku $^{12}_6\text{C}$. Hodnotě látkového množství 1 molu odpovídá $6,022 \cdot 10^{23}$ částic. Počet částic v 1 molu látky ($n=1$) je tedy $6,022 \cdot 10^{23}$ a tato hodnota je označována jako Avogadrova konstanta ($N_A=6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$).

Molární roztok určité látky obsahuje 1 mol této látky v 1 litru roztoku. Molární roztok označujeme 1M (molarita). U roztoků je uváděn např. údaj 1M NaCl, 0,2M NaOH. Pro koncentraci roztoku platí definiční vztah:

$$c = \frac{n}{V}$$

a má tedy jednotku $\text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$.

Hodláme-li použít pro výpočet molární hmotnost (M_m) uváděnou v tabulkách, použijeme vztah:

$$c = \frac{m}{M_m V}$$

kde m je hmotnost rozpouštěné látky v kilogramech, objem (V) je objem roztoku v litrech. Taková množství roztoku se v laboratorních podmínkách nepoužívá, stejného výsledku dosáhneme, pokud budeme hmotnost látky uvádět v gramech a objem v mililitrech. Potom ale také musíme molaritu převést na jednotky $\text{mol} \cdot \text{ml}^{-1}$.

2. Hmotnostní vyjádření koncentrace.

Hmotnostní koncentrace (také hmotnostní zlomek), vyjadřuje počet hmotnostních dílů (gramů) látky rozpouštěné ve 100 dílech (gramech) roztoku. Značí se c_m , nabývá hodnot 0-1, a platí pro ni vztah:

$$c_m(A) = \frac{m(A)}{m_r}$$

kde $m(A)$ je hmotnost rozpouštěné látky (A) a m_r je hmotnost roztoku.

Při výpočtech hmotnostní koncentrace je důležité dosadit do jmenovatele hmotnostního zlomku hmotnost celého roztoku, nikoli pouze hmotnost rozpouštědla. Zde se často chybí!

Hmotnostní koncentrace bývá nejčastěji vyjádřena hmotnostním procentem, které získáme vynásobením hodnoty hmotnostního zlomku sty procenty.

$$c_m(\%) = 100\% \cdot c_m(A)$$

3. Objemové vyjádření koncentrace.

Zde budeme postupovat obdobným způsobem jako u hmotnostní koncentrace, jen je třeba si uvědomit, že odměřování objemu kapalných látek je méně přesné, na rozdíl od vah vážících s přesností na miligramy.

Poznámky.

- Přístroj zapněte ještě před měřením, aby získal optimální teplotou. V průběhu jeho zahřívání se seznámte s popisem přístroje a jeho činností, a také s chybovými hlášeními.
- Pro měření použijte dvou kyvet stejné délky ($l=1.002\text{cm}$).

Postup práce.

- Zapněte přístroj.
- Přístroj připravíme pro měření extinkce stisknutím tlačítka (E).
- První kyvetu naplníme destilovanou vodou (rozpouštědlo) a vložíme do pravé části výměníku.
- Stisknutím tlačítka pro reference (R) nastavíme automatické vyrovnání, na displeji by se měla objevit identifikace: 0,000.
- Do levé části výměníku vsuneme druhou kyvetu s roztokem bromkresolové zeleně určité koncentrace.
- Volte koncentrace roztoků 10, 20, 30, 50 a 100 %.
- Měňte vlnovou délku světla v oblasti viditelného světla od 350 do 750 nm po 20 nm a udělejte měření závislosti koeficientu absorpce na vlnové délce pro každou koncentraci (pro výpočet koeficientu absorpce používejte vztah 3).
- Výsledky měření zpracujte do tabulky a graficky do závislosti koeficientu absorpce na vlnové délce pro různé koncentrace.
- Pro několik vlnových délek ověřte platnost Lambertova-Beerova zákona (že extinkce při dané tloušťce vrstvy l přímo úměrná koncentraci c).
- Vypnete přístroj, kyvety vymyjte destilovanou vodou, propláchněte lihem, vysušte a uložte do krabice, a také umyjte pracovní plochu.

Kontrolní otázky.



- Co rozumíme pod pojmem tzv. absorpce světla?
- Co to je koeficient absorpce, extinkce a intenzita světla? Popište základní vlastnosti.
- Stručně popište, jak závisí koeficient absorpce roztoků na vlnové délce.
- Stručně popište metody měření extinkce a absorpce roztoků.
- Jak můžeme popsat Lambertův-Beerův zákon?



Literatura.

- 1) BROŽ, J., aj. *Základy fyzikálních měření I*. 2. vyd. Praha: SPN, 1983.
- 2) Manuál ke použití spektrofotometre SPEKOL 11.

8 Základní vlastnosti optického vlákna

Úkol:

- Určení výkonu optického signálu a útlumu optické trasy;
- Určení měrného útlumu optické trasy;
- Určení numerické apertury a vyzařovací charakteristiky optického vlákna;
- Určení útlumu při příčné odchylce os dvou vláken;
- Ověření činnosti optického vlákna jako senzoru hladiny kapalin.

Klíčová slova.

Optické vlákno, Útlum, Numerická apertura, Senzor, Výkon záření.



Uspořádání experimentu.

Manipulátor OPTEL je jednoduchý manipulační stolek. Umožňuje sestavit z optických a mechanických prvků řadu praktických úloh z vláknové optiky a optoelektroniky. Každé úloze odpovídá určitá optická sestava prvků. Jejich poloha není většinou pevně dána, ale lze ji ve vodorovné rovině na manipulátoru měnit pomocí vhodně navržených posuvů. Těmito posuvy je možné optickou sestavu nastavovat (tzv. justovat), popřípadě po nastavení na ní provádět různá měření.

Manipulátor OPTEL umožňuje měření výkonu záření a pak počítat různé důležité charakteristiky: útlum optického signálu, numerickou aperturu a vyzařovací charakteristiky optického vlákna atd.



Pomůcky.

Stavebnice OPTEL s příslušenstvím, měřič optického výkonu LM 1. (oproti návodu se jedná o zjednodušený typ měřiče optického výkonu), síťové adaptéry, kádinka, voda, glycerin, měřítko.

Teorie.

Optická vlákna patří bezesporu k jednomu z nejmodernějších přenosových médií. Jejich vysoká přenosová kapacita a nízký útlum jsou hlavní výhody, které je staví v řadě aplikací před klasické kabelové a rádiové komunikační prostředky. Proto odvětví optických komunikací zaznamenává každým rokem nástup nových technologií a nárůst celkového objemu výroby.

V souvislosti s tím jak roste popularita optických vláken, začínají vlákna pronikat i do jiných odvětví a neomezuje se jen na optické komunikace, pro které byla původně určena. Zjistilo se, že optická vlákna lze využít nejen pro přenos informace, ale například i pro snímání veličin. V řídicí a regulační technice pracuje mnoho senzorů na principu optických vláken. Tímto způsobem jsou měřeny různé veličiny, vyhodnocovány vlastnosti látek, snímána poloha předmětů atd.

Optické vlákno je dielektrický vlnovod zhotovený např. z křemenného skla. Tvoří ho vnitřní jádro sloužící k vlastním vedení světla (vláknový světlovod), kolem něhož je plášť, který má menší index lomu než jádro. Paprsky dopadající na rozhraní jádra a pláště pod menším úhlem než je úhel mezní, se totálně odrážejí a jsou tak jádrem vedeny. Paprsky, které svírají větší úhel s osou vlákna se na rozhraní lámou, při každém odrazu ztrácí část svého výkonu v obalu a tak nejsou vláknem vedeny.

Schopnost přenosu signálu optickým vláknem je ovlivněna několika vlivy a parametry. Z nich nejzákladnější jsou ztráty, útlum optické trasy a vyzařovací charakteristika. Úkolem fyzikálních praktik je studium a popis důsledků těchto vlivů na vedení optického signálu doložené orientačním měřením.

1) Základní charakteristiky optických vláken

a) Útlum optického vlákna

Již víme, že jedním z omezujících faktorů při přenosu záření v optických vláknech je jeho útlum. Skutečně, v počátcích rozvoje vláknové optiky byla problematika snížení útlumu optického vlákna na prvním místě.

Správná funkce optického datového spoje závisí na dostatečném výkonu modulovaného optického signálu dopadajícího na detektor přijímače. Útlum je veličinou určující míru snížení výkonu optického signálu a je způsoben přítomností pasivních komponent v optické trase, jako je vlastní optické vlákno, kabelová spojka či konektor. I přesto, že je u optických vláken útlum výrazně nižší, než u jiných médií, stále se zde vyskytuje a na dlouhých trasách, řádově desítky kilometrů a více, není již zanedbatelný a je nutné s ním při návrhu přenosového systému počítat.

Útlum optického signálu je způsoben celou řadou fyzikálních jevů, k nimž zejména patří:

- absorpce,
- lineární rozptyl,
- nelineární rozptyl,
- ohyby vlákna.

Při přenosu optického záření nás primárně zajímá, kolik se z navázané energie na začátku optické trasy přenesou k přijímači. Parametru, který tuto vlastnost kvantifikuje, se říká útlum (attenuation). Stejně jako v klasické přenosové technice, kde se přenáší signál po metalických přenosových traktách, se i v oboru vláknové optiky používá pro vyjádření útlumu logaritmická jednotka decibel [dB]. Definiční vztah je též stejný:

$$A = 10 \log \frac{P_1}{P_2}, \quad (1)$$

kde P_1 je vstupní výkon záření navázaný do trasy [mW], P_2 je výstupní výkon záření vycházející z trasy [mW]. Útlum výkonu záření není jen vlastností optické trasy, ale lze jej definovat i pro libovolnou optickou komponentu. Pokud jsou tyto komponenty zapojeny v kaskádě, lze s výhodou jejich dílčí útlumy sčítat a získat tak jednoduše útlum celé optické trasy. Důležitým parametrem optických vláken je měrný útlum α [dB/km]. Tento parametr kvantifikuje velikost optických ztrát vztažených na jednotku délky vlákna, typicky na 1 km. Dnešní nejkvalitnější jednovidová vlákna disponují měrným útlumem pod 0,2 dB/km při vlnové délce 1550 nm, což je hodnota kterou nepředčí žádné dnes známé přenosové médium (vlnovod). Vztah pro výpočet měrného útlumu kabelu je

$$\alpha = \frac{A}{L_2 - L_1} = \frac{10 \log \frac{P_1}{P_2}}{L_2 - L_1}, \quad (2)$$

kde L_1 a L_2 jsou délky krátkého a dlouhého kabelu.

Při šíření záření vláknem dochází k celé řadě interakcí mezi atomy materiálu a fotony, které toto záření představují (kvantová povaha záření). Jedna z nejdůležitějších interakcí se nazývá absorpce. Jak samotný název napovídá, jedná se o jev, kdy jsou fotony průběžně pohlcovány atomy materiálu jádra (popř. i pláštěm, vzpomeňme si, že pole částečně zasahuje i do pláště) a přeměněny na jinou formu energie, typicky teplo. I když je tento jev relativně slabý, pro velice dlouhá vlákna se jeho účinky výrazně projeví. Druhým, snad nejpalčivějším fyzikálním jevem, který nepřímo způsobuje útlum, je

lineární rozptyl záření na nerovnoměrných shlucích atomů či molekul základního materiálu optického vlákna. Charakter rozptylu v tomto případě závisí na míře fluktuace a vlnové délce záření.

U jednonábových optických systémů lze považovat za zdroj útlumu i nelineární rozptyl, který vzniká při velkých intenzitách záření ve vlákne. V tomto případě je interakce mezi fotony silného záření neelastická, protože po střetu fotonu s atomem sice dojde ke vzniku fotonu nového, ten má však nižší frekvenci než foton dopadající. Tyto „konvertované“ fotony následně chybí na straně přijímače, jsou opticky filtrované, což se projeví jako ztráta, resp. útlum.

b) Numerická apertura a vyzařovací charakteristika optického vlákna

Zde je věnována pozornost tomu, jak se chová optické záření po opuštění konce vlákna. Paprsky, které jsou vedeny ve vlákne, vytvoří vždy po opuštění čela vlákna rozbíhavý (tzv. divergentní) svazek. Rozbíhavost tohoto svazku je dána numerickou aperturou a způsobem buzení vlákna.

Numerická apertura je definována pomocí vyzařovací charakteristiky plně vybuzeného vlákna:

$$NA = \sin \alpha, \quad (3)$$

kde úhel α odpovídá polovině šířky vyzařovací charakteristiky, viz obrázek Fig.1.

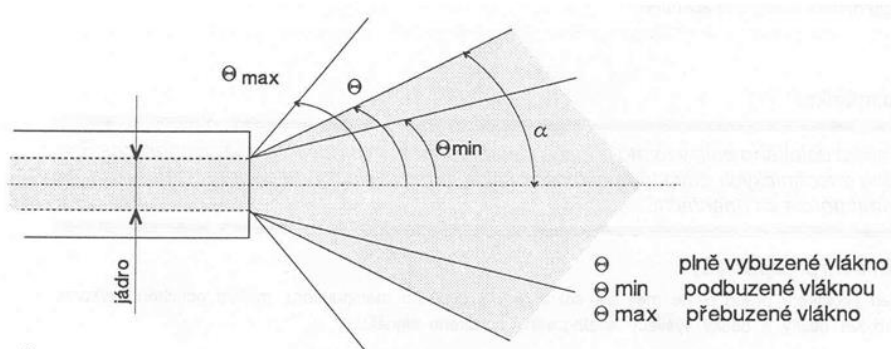


Fig.1. Vyzařovací charakteristika vlákna.

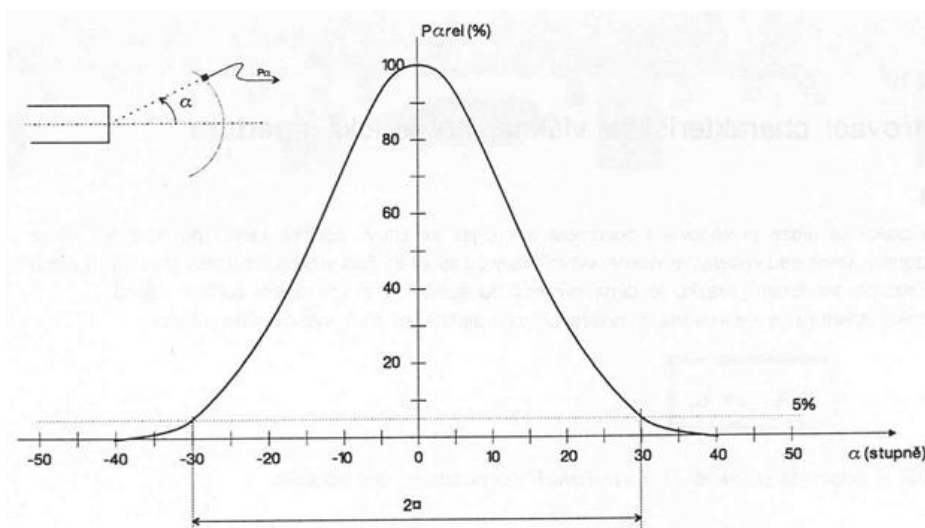


Fig.2. Princip měření numerické apertury.

Obecně tedy platí, že čím větší numerická apertura vlákna, tím větší rozbíhavost svazku na výstupu vlákna. Na obrázku jsou rovněž naznačeny různé režimy buzení pro jeden typ vlákna. Nevhodně zvolený zdroj záření může vlákno přebudit nebo podbudit, což může v některých případech způsobit i určité komplikace.

Vyzařovací charakteristika se nejčastěji měří fotodetektorem rotujícím kolem čela vlákna. Fotodetektor měří hodnotu optického výkonu P v závislosti na úhlu. Šířka vyzařovací charakteristiky 2α se odečte z poklesu této závislosti na 5 % z maximální hodnoty, jak je vyznačeno na obrázku Fig.2. Ze znalosti úhlu se vypočítá numerická apertura NA .

2) Popis manipulátoru OPTEL.

Manipulátor OPTEL je jednoduchý manipulační stolek. Umožňuje sestavit z optických a mechanických prvků řadu praktických úloh z vláknové optiky a optoelektroniky. Každé úloze odpovídá určitá optická sestava prvků. Jejich poloha není většinou pevně dána, ale lze ji ve vodorovné rovině na manipulátoru měnit pomocí vhodně navržených posuvů. Těmito posuvy je možné optickou sestavu nastavovat (tzv. justovat), popřípadě po nastavení na ní provádět různá měření.

Manipulátor OPTEL je dodáván ve dvou provedeních: jako jednoduchý manipulátor a jako rozšířený manipulátor. Jednoduchý manipulátor je určen k několika vysloveně základním úlohám. Rozšířený manipulátor obsahuje navíc sadu příslušenství, která rozšiřuje použití manipulátoru pro úlohy z oblasti senzorů a měření parametrů optických vláken.

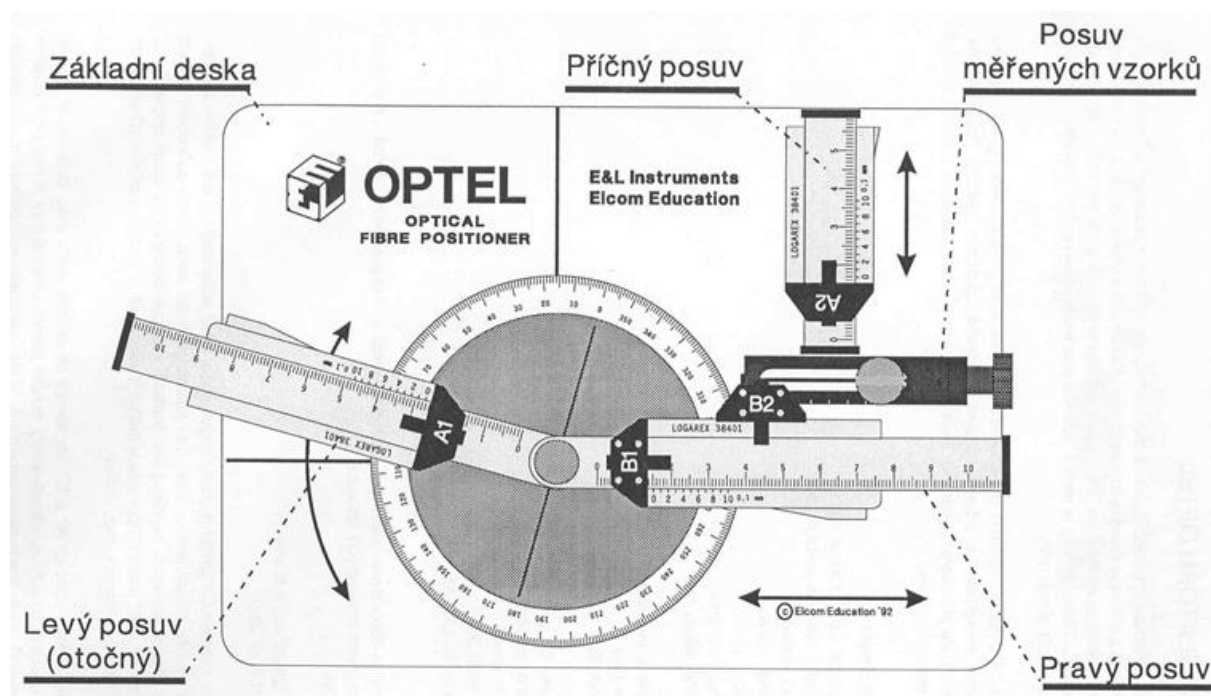


Fig.3. Základní deska manipulátoru OPTEL.

Konektor s optickým kabelem možné umístit do čtyř různých pozic, které odpovídají čtyřem měřicím sondám. Pozice **A1** a **B1** jsou využity k lineárnímu a rotačnímu posuvu měřicích sond. Tímto způsobem můžeme sledovat lineární nebo úhlové závislosti, například vliv podélné a úhlové odchylky na útlum spojení dvou optických vláken. Pozice **A2** a **B2** dovolují příčný posuv měřicích sond, což je využito například při sledování vlivu příčné odchylky na útlum spojení dvou vláken.

3) Popis měřice optického výkonu LM1.

Měřicí optického výkonu LM1 je orientační měřidlo umožňující přiblížení pozorování k standardním měřicím metodám. Přístroj LM1 je ruční orientační měřidlo určené pro měření optického výkonu v optoelektronice a vláknové optice.



Fig.4. Měřicí optického výkonu LM1.

Na obrazce Fig.4 je ukázáno:

1 - *Optický vstup.*

Optický vstup zajišťuje senzorová hlava s fotodetektozem. K hlavě lze přišroubovat adapter pro připojení optického konektoru. S přístrojem je rovněž dodáván kryt senzorové hlavy. Tento kryt zabraňuje zaprášení nebo znečištění fotodetektoru na hlavu nasadte vždy po ukončení práce s přístrojem.

2 - *Vyp/Zap.* Hlavní vypínač přístroje.

3 - *LCD displej.* Na displeji je zobrazována hodnota měřeného optického výkonu v jednotkách μW nebo nW .

4 - *Konektor externího napájení.*

Přístroj je napájen externím zdrojem 9 V a zálohován baterií stejných parametrů. Při použití externího zdroje je nutné ponechat záložní baterii uvnitř přístroje.

Poznámky.

- Orientačně se řiďte studijním materiálem, návodem k soupravě, upřesněné požadavky sdělí vyučující.
- Seznamte se stavebnicí OPTEL a měřičem optického výkonu.
- **K měření používejte černé optické kabely.**
- Základní desku při měření zakrývejte víkem, aby byl potlačen vliv okolního osvětlení.
- **Protokol vypracujte tak, že u každé úlohy zpracujete její teoretický základ a k němu připojíte výsledky vašeho měření, tabulku, graf, diskusi a závěr.**

Postup práce.

1) Určení výkonu optického signálu a útlumu optické trasy (viz. Fig.5).

- Konce kabelů umístěte do držáků A1 a B1.
- Vzdálenost optických kabelů zvětšujte od 0 do 10 mm po 1 mm a zpět.
- Pro každou vzdálenost tak obdržíte dvě hodnoty optického výkonu.
- V tabulce kromě optického výkonu uvedete útlum optické trasy.
- Vytvořte graf závislosti průměrného (ze dvou hodnot) optického výkonu a z útlumu na vzdálenosti kabelů.

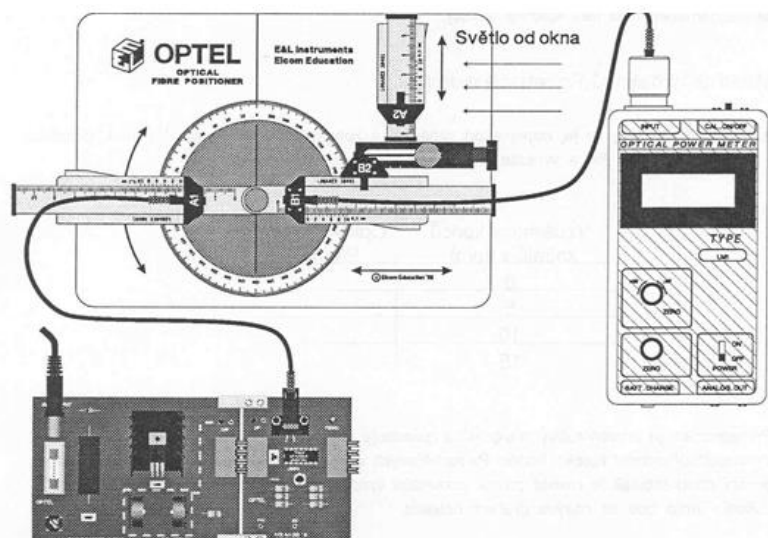


Fig.5. Obrázek pro úkol 1.

2) Určení měrného útlumu optické trasy transmisí metodou (viz. Fig.6).

Potřeby: jeden krátký (L1) a jeden dlouhý (L2) optický kabel, měřítko.

- Určete délky dvou rozdílně dlouhých kabelů.
- Změřte z obou stran výkon, kde P_1 je aritmetický průměr výkonů měřených na výstupu z krátkého kabelu a P_2 je tentýž výkon pro dlouhý kabel.
- Určete měrný útlum kabelů.

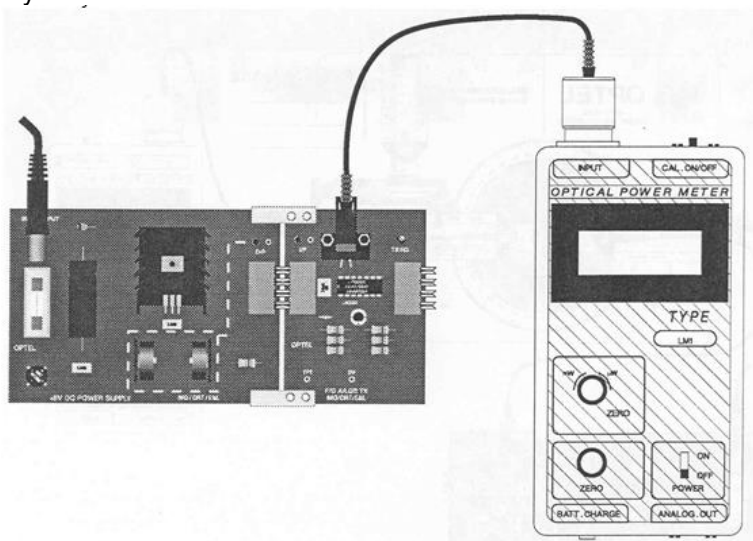


Fig.6. Obrázek pro úkol 2.

3) Určení numerické apertury a vyzařovací charakteristiky optického vlákna (viz. Fig.7).

- Pravé rameno posuvu (B1) nastavte na 0, levé rameno A1 na 3-5 mm.
- Levým ramenem postupně otáčejte po 5° od 0° do asi $+50 - 60^\circ$ (tato hodnota je orientační, úhel stočení měňte do té doby, dokud hodnoty výkonu budou klesat). Poté stejným postupem otáčejte na opačnou stranu do -50° a zpět.
- Výsledky měření zpracujte do tabulky.
- Sestrojte graf závislosti optického výkonu vlákna (Parel) na úhlové odchylce a z grafu určete numerickou aperturu z příslušné 5% hladiny.

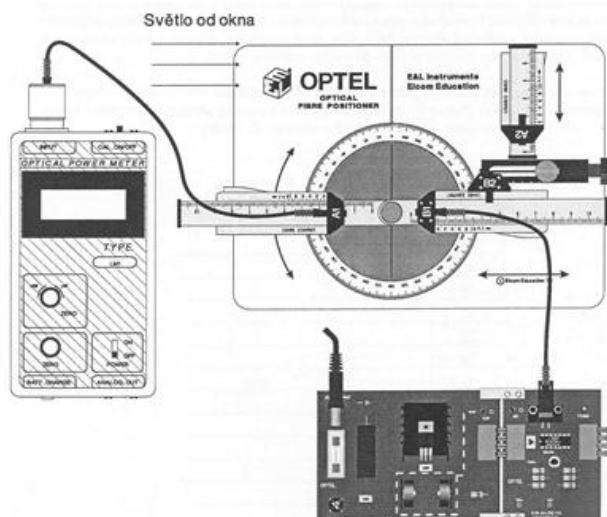


Fig.7. Obrázek pro úkol 3.

4) Určení útlumu při příčné odchylce os dvou vláken (viz. Fig.8).

- Kabely umístěte do držáků A2 a B2.
- Do drážky držáku A2 zasuňte kovový přípravek ve tvaru U, který umožňuje přesný posun držáku B2 pomocí šroubu.
- Nastavte vzdálenost kabelů na 5 mm.
- Otáčením šroubu nastavte vzájemnou polohu kabelů tak, aby měřič výkonu vykazoval maximální hodnotu. Ta je výchozí, referenční, hodnotou. Určíte ji pomocí nonia spojeného s držákem kabelu B2.
- Otáčením šroubu měníte příčnou polohu kabelu B2 po 0,1 mm (první dílek nonia se kryje s prvním nejbližším dílkem na pevné části měřidla). Takto pokračujete do 1 mm příčné odchylky na jednu stranu a poté zpět na stranu opačnou.
- Pro každou příčnou odchylku tak obdržíte dvě hodnoty optického výkonu.
- Sestrojte graf závislosti optického výkonu (Ph) na příčné odchylce a graf závislosti útlumu na příčné odchylce.

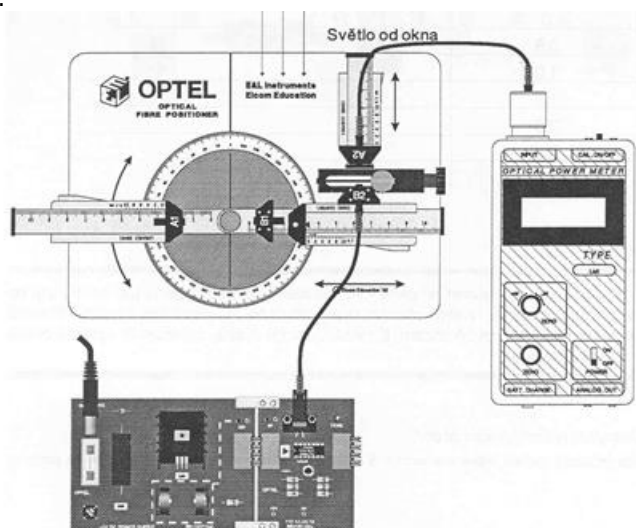


Fig.8. Obrázek pro úkol 4.

5) Ověření činnosti optického vlákna jako senzoru hladiny kapalin (viz. Fig.9).

Potřeby: U-senzor, kádinka, voda, glycerin

- Pomocí U-senzoru zaznamenejte změnu optického výkonu v prostředích s různým indexem lomu: vzduch, voda, glycerin.
- Měření proveďte u každého prostředí alespoň 3krát, příslušné výkony zaznamenejte do tabulky, určete v každém z prostředí útlum.

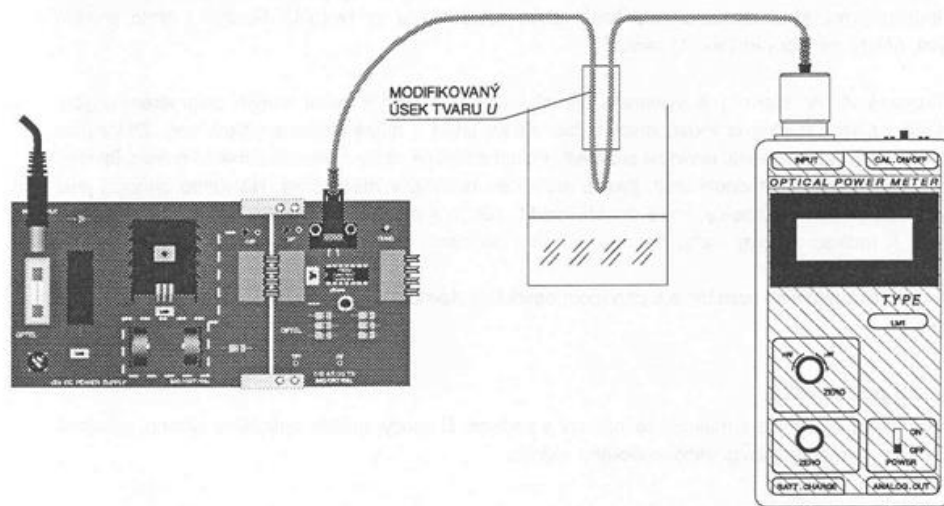


Fig.9. Obrázek pro úkol 5.



Kontrolní otázky

- Co rozumíme pod pojmem tzv. Optické vlákno?
- Co to je útlum optického vlákna?
- Stručně popište co to je numerická apertura a vyzařovací charakteristika optického vlákna?
- Stručně popište metody měření útlumu optického vlákna a měrného útlumu optické trasy?
- Jaké existují další možnosti používání optického vlákna (např. senzor)?



Literatura.

- 1) B.E.A. Saleh a M.C. Teich: Základy fotoniky, sv. II, str. 276. Překlad z angličtiny vydal Matfyzpress, MFFUK, 1994.
- 2) M.Kucharski aj.Brouček: Optická vlákna a sensory.
- 3) Elcom Education s.r.o. Elcom-Štolba, 1992 – příručka ke stavebnici

9 Měření indexu lomu kapalin pomocí dutého zrcadla

Úkol:

- Pomocí jednotkového příčného zvětšení zrcadla určete jeho ohniskovou vzdálenost a poloměr křivosti;
- Zrcadlo naplňte postupně destilovanou vodou, poté lihem a proveďte stejné měření;
- Výsledky určených indexů lomu porovnejte s tabulkovými hodnotami.

Klíčová slova.

Ohnisková vzdálenost, Index lomu, Soustava zrcadlo-kapalina, Duté zrcadlo, Křivost zrcadla.



Uspořádání experimentu.

Hlavní částí měřicí soustavy je optická lavice pevně umístěná ve svislé poloze. Na ní jsou v držácích postupně upevněny: duté zrcadlo, matnice s ryskami, kontrolní trn. Pomocí kontrolního trnu v horní části optické lavice kontrolujeme kolmost našeho pozorování. Musí se stále krýt se střední ryskou v ose držáku. Postupně měníme polohu matnice tak, aby se vzdálenosti rysek na matnici a v obrazu shodovaly. Nastává jednotkové zvětšení, kdy velikost předmětu se shoduje s velikostí jeho obrazu. Na optické lavici stačí odečíst předmětovou vzdálenost matnice od zrcadla a vypočítat ohniskovou vzdálenost zrcadla. Obdobný princip měření je uplatněn při zjišťování indexu lomu kapalin.



Pomůcky.

Stabilně upevněná optická lavice ve svislé poloze, Duté zrcadlo, Matnice, Destilovaná voda, Lih, Posuvné měřítko, Vysoušeč.

Teorie.

V geometrické optice, a také ve většině experimentálních metod, se k určení ohniskové vzdálenosti dutého zrcadla využívá chod význačných paprsků v paraxiálním prostoru. Obdobně je tomu u lomu paprsků procházejících spojnou čočkou.

Následující metoda využívá vlastnosti dutého zrcadla a spojně čočky, kombinuje princip odrazu a lomu světelného paprsku ve dvou různých optických prostředích. Využívá jeden z dalších základních parametrů těchto dvou optických objektů a to příčné zvětšení.

Pro příčné zvětšení β platí:

$$|\beta| = \left| \frac{y'}{y} \right| = \left| \frac{f}{a-f} \right|. \quad (1)$$

Předmět dané výšky představuje úsečka vytyčená ryskami na matnici.

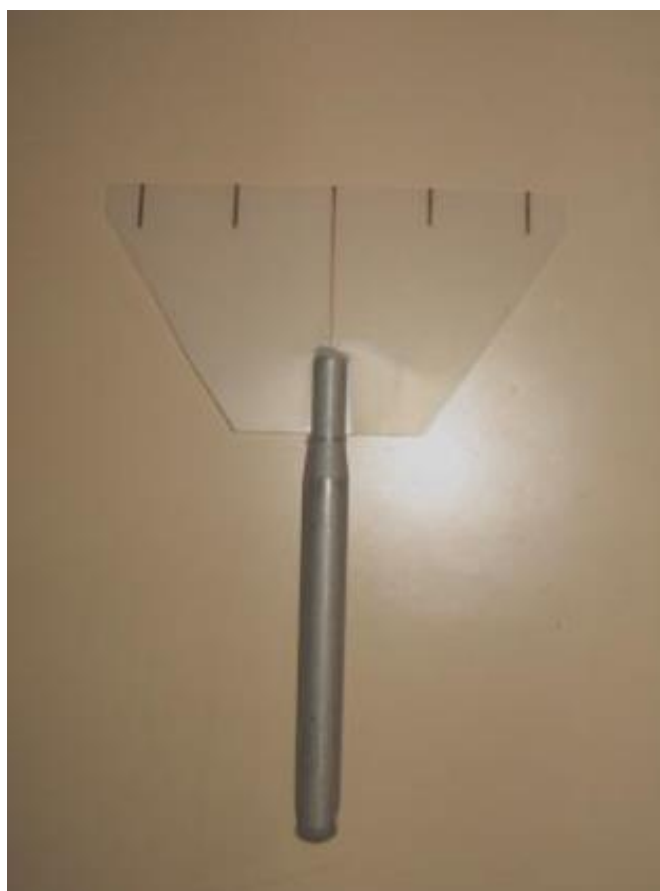


Fig.1. Matnice s ryskami.

Bude-li zvětšení nabývat hodnoty 1, hovoříme o jednotkovém příčném zvětšení a velikost výšky obrazu je rovna velikosti předmětu:

$$y' = y \quad (2)$$

Úpravami pak z rovnice (1) obdržíme vztah pro ohniskovou vzdálenost dutého zrcadla f_1 :

$$f_1 = \frac{a}{2} \quad (3)$$

K určení ohniskové vzdálenosti zrcadla tedy potřebujeme zjistit předmětovou vzdálenost a , při níž toto jednotkové zvětšení nastává.

Vzhledem k tomu, že se jedná o kulové zrcadlo, můžeme současně stanovit i poloměr křivosti daného zrcadla:

$$f_1 = \frac{R_1}{2} \Rightarrow R_1 = 2f_1. \quad (4)$$

Na stejné optické sestavě lze měřit také index lomu kapalin. Způsob měření je stejný jako v předešlém případě.

Nalitím měřené kapaliny do dutiny zrcadla je vytvořena optická soustava sestávající z tohoto zrcadla a ploskovypuklé čočky tvořené kapalinou. Odečtením předmětové vzdálenosti matnice od zrcadla získáme potřebné údaje pro určení indexu lomu příslušné kapaliny.

Pro ploskovypuklou čočku tvořenou kapalinou v zrcadle platí vztah:

$$\frac{1}{f_2} = \left(\frac{n_2}{n_1} - 1 \right) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right).$$

Pro poloměr ploskovypuklé čočky s ohledem na to že světelný paprsek přichází ze vzduchu, platí: $r_1 = \infty$, $n_1 = 1$. Pak pro ohniskovou vzdálenost této čočky bude platit:

$$\frac{1}{f_2} = (n_2 - 1) \left(\frac{1}{r_2} \right) = \frac{n_2 - 1}{r_2}.$$

Pro náš případ bude mít rovnice podobu:

$$\frac{1}{f_2} = \frac{n-1}{R} \Rightarrow f_2 = \frac{R}{n-1}, \quad (5)$$

R je poloměr ploskovypuklé čočky a současně poloměr zrcadla, n je hledaný index lomu kapaliny v dutém zrcadle.

Světelné paprsky procházejí kapalinovou čočkou dvakrát. Můžeme tedy uvažovat soustavu dvou ploskovypuklých čoček, pro jejíž výslednou ohniskovou vzdálenost platí:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{2}{f_2}.$$

Protože pro ohniskové vzdálenosti dutého zrcadla a kapalinové ploskovypuklé čočky platí:

$$f_1 = \frac{R}{2}, f_2 = \frac{R}{n-1},$$

dostáváme pro výslednou ohniskovou vzdálenost soustavy vztah:

$$\frac{1}{f} = \frac{2}{R} + \frac{2(n-1)}{R}.$$

A pro index lomu kapaliny po úpravě obdržíme jednoduchý vzorec:

$$n = \frac{f_1}{f}. \quad (6)$$

Sestavení optické soustavy a způsob měření

Hlavní částí měřicí soustavy je optická lavice pevně umístěná ve svislé poloze (Fig.2). Na ní jsou v držácích postupně upevněny: duté zrcadlo (1), matnice s ryskami (2), kontrolní trn (3).

Na optické lavici je v „nulové poloze“ zafixováno duté zrcadlo. V literatuře je doporučeno zrcadlo ze žákovské soupravy pro pokusy z optiky. Nad zrcadlem je umístěna matnice s třemi až pěti ryskami. Střední ryska je v ose úchyty, ostatní rysky vytyčují úsečky představující výšku předmětu.

Z minimální vzdálenosti 25 cm pozorujeme jedním okem rysky na matnici zároveň s jejich obrazem v dutém zrcadle.

Pomocí kontrolního trnu v horní části optické lavice kontrolujeme kolmost našeho pozorování. Musí se stále krýt se střední ryskou v ose držáku (Fig.3).

Postupně měníme polohu matnice tak, aby se vzdálenosti rysek na matnici a v obraze shodovaly. Nastává jednotkové zvětšení, kdy velikost předmětu se shoduje s velikostí jeho obrazu. Na optické lavici stačí odečíst předmětovou vzdálenost matnice a od zrcadla a ze vztahu (3) vypočítat ohniskovou vzdálenost zrcadla.

Obdobný princip měření je uplatněn při zjišťování indexu lomu kapalin. Do dutiny zrcadla opatrně nalijeme měřenou kapalinu tak, aby její volná hladina sahala k jeho okraji. Stejným způsobem změříte předmětovou vzdálenost matnice od kapaliny a vypočítejte ohniskovou vzdálenost soustavy zrcadlo-kapalina. Z tohoto vypočtete indexu lomu kapaliny (Fig.4).

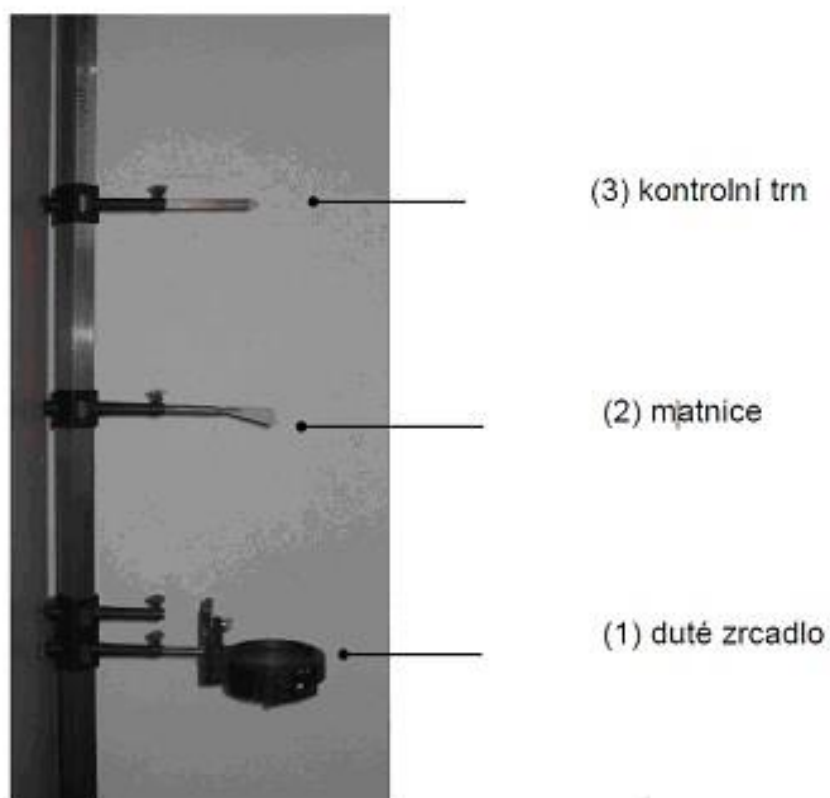


Fig.2. Optická sestava pro měření.

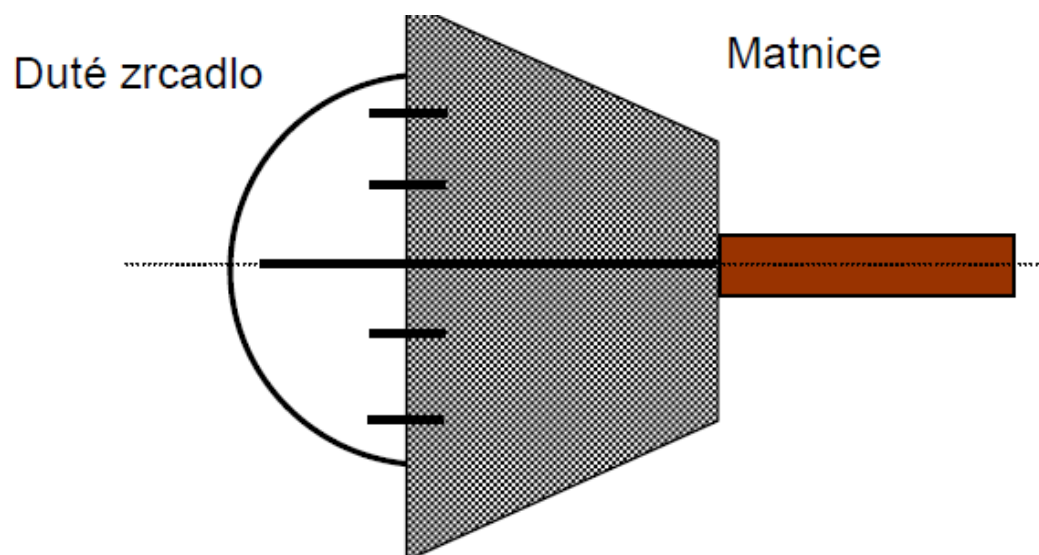


Fig.3. Krytí rysek matnice a jejich obrazu v dutém zrcadle.

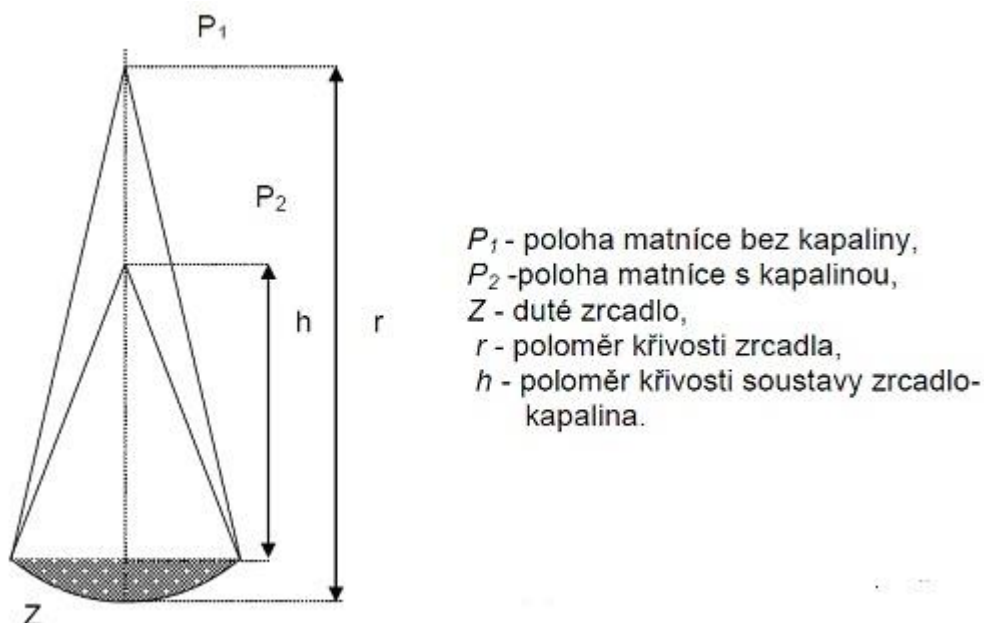


Fig.4. Měření indexu lomu kapalin.

Poznámky.

- Před měřením si seřídte polohu zrcadla a matnice pomocí rysek na matnici a středícího kolíku.
- Všechna měření provádějte **desetkrát**, milimetry odhadněte nebo použijte přiložené posuvné měřítko.
- Měření zpracujte do tabulek. Každá tabulka musí obsahovat standardní údaje (název), měřené veličiny a jejich jednotky, případně další údaje potřebné ke statistickému zpracování naměřených hodnot.
- Po každém měření změňte polohu matnice a opakovaně hledejte místo jednotkového zvětšení, kdy se veškeré zaměřovací body kryjí. Duté zrcadlo zůstává stále v základní poloze.
- Množství kapaliny v dutině zrcadla volte tak, aby hladina kapaliny dosahovala k okrajům zrcadla.
- **Upozornění!** Při měření parametrů zrcadla obsahujícího měřenou kapalinu je nutné ponechat jezdec fixovaný na optické lavici v základní poloze. Při vylévání kapaliny vyjměte pouze držák se zrcadlem.
- Po měření kapalinu vylijte a zrcadlo osušte vysoušečem.

Postup práce.

- 1) Při měření ponecháme zrcadlo v nulové poloze a posuvem matnice provedeme 10 měření předmětové vzdálenosti úsečky a ze získaných údajů vypočteme ohniskovou vzdálenost a poloměr dutého zrcadla.
- 2) Do dutiny zrcadla nalijeme měřenou kapalinu a stejným postupem naměříme předmětovou vzdálenost a ze vztahu (6) určíme index lomu kapaliny.
- 3) Hodnotu indexu lomu porovnejte s tabulkovou.

**Kontrolní otázky**

- Co rozumíme pod pojmem tzv. Duté zrcadlo?
- Co to je ohnisková vzdálenost a index lomu?
- Stručně popište metodu měření ohniskové vzdálenosti zrcadla a indexu lomu soustavy zrcadlo-kapalina?
- Jak závisí ohnisková vzdálenost na křivosti zrcadla?

**Literatura.**

- 1) Kříž, P., Špulák, F.: Optické jevy netradičně – využití žákovské soupravy pro pokusy z optiky (Sborník z konference „Veletrh nápadů učitelů fyziky 5; Západočeská univerzita v Plzni, Praha 2000).
- 2) Rastislav Baník: Měření indexu lomu destilované vody - praktická úloha č. 6 z XXI. ročníku fyzikální olympiády kategorie A. SPN, Praha, 1982, str. 56.

10 Studie Fraunhoferova ohybu laserového světla.

Úkol:

- Studium difrakce laserového paprsku na mřížce a štěrbině;
- Určení vlnové délky laserového světla při difrakci laserového paprsku na mřížce a srovnání s hodnotou napsanou na laseru;
- Určení rozměru mřížky pomocí ohybového obrazu na stínítku a srovnání s hodnotou napsanou na mřížce;
- Určení šířky štěrbiny.

Klíčová slova.

Difrakce světla, laser, difrakce na mřížce a štěrbině, Fraunhoferův ohyb, monochromatické záření.



Uspořádání experimentu.

Na optické lavici je umístěn laser, štěrbina nebo difrakční mřížka, stínítko a milimetrový papír. Po zapnutí laseru, paprsek prochází přes štěrbinu nebo mřížku a tak vzniká difrakční obraz na stínítku. Pak pomocí různých zákonů a principů na základě naměřených hodnot lze spočítat vlnovou délku laseru a rozměry štěrbiny nebo mřížky.



Pomůcky.

Optická lavice s příslušenstvím, laser, štěrbina, difrakční mřížka, stínítko, milimetrový papír a měřítko.

Teorie.

a) Světlo a jeho vlnový charakter.

Difrakce záření je fyzikální jev, k jehož objasnění již nepostačuje pouhá geometrická optika. Přestože je difrakce zjednodušeně označována jako lom světla, nelze ji vysvětlit klasickým odrazem a lomem světla, ale je třeba uvažovat vlnový charakter světla. Viditelné světlo je elektromagnetické vlnění o vlnových délkách z intervalu 400 - 750 nm. Experimentálně byl vlnový charakter světla prokázán Thomasem Youngem v roce 1801, schematicky znázorněným na Fig.1. V Youngově pokusu dopadá svazek rovnoběžného monochromatického (tj. se majícího stejnou vlnovou délku) záření na dvojici štěrbin. Dopadající záření se při průchodu štěrbinami rozdělí na dvě vlny, které kmitají se stejnou fází. Podle Huygensova principu se vlnění prošlé každou z této dvojice štěrbin šíří všemi směry. Pokud bude dráhový rozdíl vln dopadajících na stínítko roven sudému násobku (2, 4, 6, ...) poloviny jejich vlnových délek, bude docházet ke konstruktivní interferenci (skládání vln) a výsledkem bude vznik tzv. maxima. V případě, že bude dráhový rozdíl roven lichému násobku (1, 3, 5, ...) poloviny jejich vlnových délek, bude na stínítku pozorováno tzv. minimum [1].

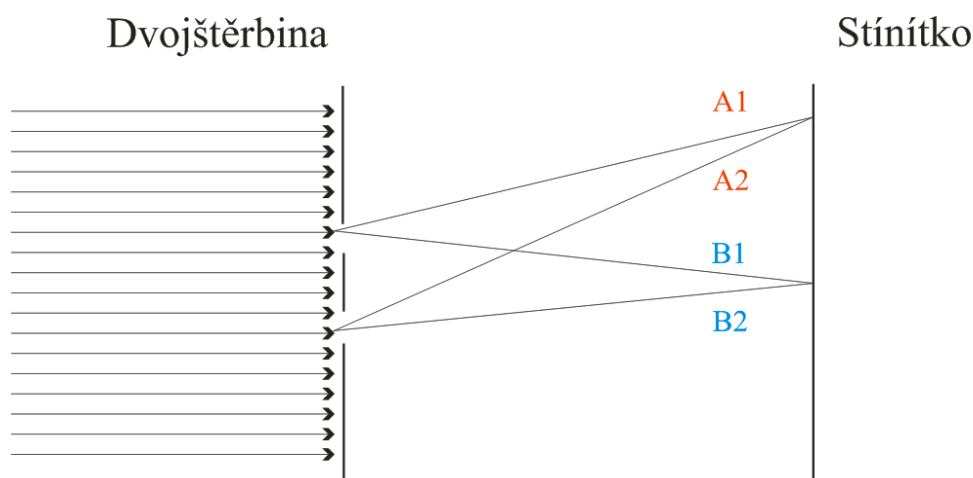


Fig.1. Youngův pokus.

Paprsky A1 a A2 urazí ke stínítku různou dráhu, výsledek interference bude záviset na konkrétním dráhovém rozdílu vln. Paprsky B1 a B2 urazí stejnou vzdálenost, dráhový rozdíl je nulový a výsledkem je konstruktivní interference a vznik maxima.

b) Zkladní pojmy.

Huygensův princip popisuje šíření vlnění v prostoru (tj. i světla). Podle tohoto principu všechny body na vlnoploše slouží jako bodové zdroje sekundárních kulových vlnoploch. Po určitém čase bude poloha vlnoplochy dána tečnou plochou k těmto sekundárním vlnoplochám.

Difrakce (ohyb) neboli ohyb světla je jev, jenž nelze vysvětlit odrazem nebo lomem světla, tzn. nepostačuje nám pro tyto účely klasická geometrická optika. K difrakci světla (jejíž přímým důsledkem je interference koherentního záření) dochází při průchodu záření otvory (mřížka, štěrbina) nebo okolo překážek o rozměrech srovnatelných s vlnovou délkou použitého světla.

Interference je konstruktivní (vznik maxim - světlé proužky) nebo destruktivní (vznik minim - tmavé proužky) skládání vlnění (viz. kapitola skript Elektromagnetické vlny - ufmi.ft.utb.cz).

Koherence záření. Koherentní vlny mají stejný fázový rozdíl v čase i prostoru (tj. za koherentní můžeme považovat záření jehož vlny vytvářejí pozorovatelný interferenční obrazec a s časem se nemění jejich fázový rozdíl).

Fraunhoferovy ohybové jevy jsou takové ohybové jevy, které vznikají při zobrazení zdrojů světla optickými soustavami. Pomocí čoček se na stínítku vytvoří obraz zdroje světla a do svazku paprsků, které vytvářejí obraz zdroje, se vloží překážka. Elementární vlnění z okrajů překážky nedopadají přímo

na stínítko, ale procházejí další spojnou čočkou, která je soustředí do jednotlivých bodů stínítka. jejich popisu se věnoval [Joseph von Fraunhofer](#).

c) Difrakce na mřížce.

S teorií difrakce úzce souvisí Heisenbergův princip neurčitosti. Ten říká, že poloha y a hybnost p jedné libovolné částice mohou být stanoveny pouze s konečnou přesností. Jinými slovy, pokud experimentálně stanovíme polohu částice s neurčitostí Δy a současně její hybnost ve stejném směru s neurčitostí Δp , musí platit rovnice (1), kde h označuje Planckovu konstantu ($h = 6,6262 \cdot 10^{-34}$ J·s).

$$\Delta y \Delta p \geq \frac{h}{4\pi} \quad (1)$$

Rovnice (1) tedy říká, že pokud budeme zvyšovat přesnost stanovení polohy částice např. zmenšováním rozměru mikro-objektu (mřížky nebo štěrbin) přes který částice prochází, bude to kompenzováno snížením přesnosti stanovení hybnosti. To se projeví zvětšením stopy záření na stínítku. Tento jev lze experimentálně snadno pozorovat.

Existuje několik podmínek pro difrakci záření. Zejména musí být zaručena interakce záření s objekty o rozměrech řádově srovnatelných s vlnovou délkou použitého záření – proto mluvíme o difrakci na mikro-objektech. Těmito objekty bývají při laboratorních experimentech optické (difrakční) mřížky s charakteristickými rozměry v rozmezí 1 – 100 μm . Optickou mřížkou rozumíme soustavu rovnoběžných štěrbin, oddělených rovnoběžnými tmavými pruhy. Fyzicky může být taková mřížka realizována tiskem na transparentní polymerní fólii nebo skleněnou destičku. Vzdálenost dvou štěrbin od sebe je charakteristickým rozměrem mřížky, viz Fig.2. Dále musí být použité záření monochromatické (tj. všechny paprsky mají stejnou vlnovou délku) a koherentní (všechny paprsky kmitají se stejnou fází) – těmito podmínkám nejlépe vyhovuje záření z laserů.



Fig.2. Optická mřížka, charakteristický rozměr.

Při průchodu monochromatického světla mřížkou (soustavou štěrbin s konstantní vzdáleností) dochází v důsledku difrakce (ohybu) k interferenci vln procházejících jednotlivými štěrbinami. Zvolme si na mřížce dvojici sousedících štěrbin, viz Fig.3. V případě, že je vzdálenost mezi štěrbinami zanedbatelná ve srovnání se vzdáleností mezi mřížkou a stínítkem (což je při laboratorním experimentu splněno), můžeme paprsek $A1$ považovat za rovnoběžný s paprskem $A2$, viz Fig.3, vpravo. Z toho plyne, že úhly φ , svírané paprsky s normálou k mřížce budou stejné a paprsky lze prakticky považovat za rovnoběžné s dráhovým rozdílem Δ . Pro dráhový rozdíl potom platí vztah (2), kde d je vzdálenost štěrbin (nebo rozměr mřížky).

$$\Delta = d \sin \varphi \quad (2)$$

Jak již bylo uvedeno výše, maximum bude při interferenci dosaženo tam, kde bude dráhový rozdíl paprsků roven celému násobku vlnových délek (neboli sudému násobku poloviny vlnových délek), proto platí:

$$\Delta = m\lambda \quad (3)$$

V rovnici (3) označuje m celé číslo, symbolizující jednotlivá maxima. Kombinací rovnic (2) a (3) dostáváme podmínku pro polohu maxima při difrakci na mřížce:

$$d \sin \varphi = \pm m \lambda \quad (4)$$

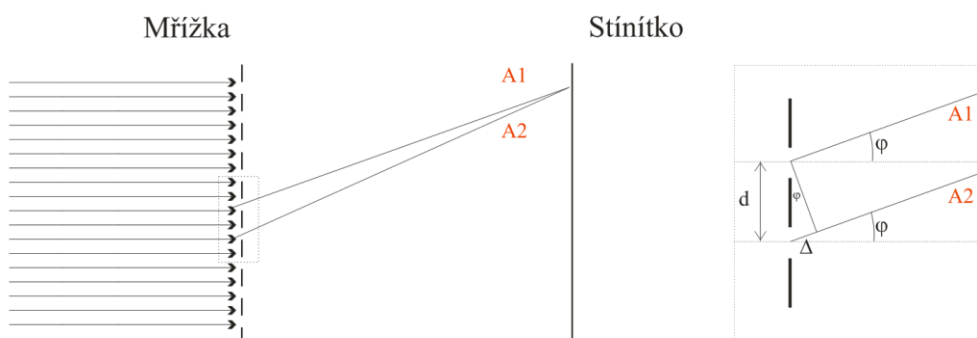


Fig.3. Difrakce na mřížce, vlevo ilustrační zobrazení situace, vpravo detail difrakce na konkrétní štěrbině optické mřížky.

Rovnice (4) se využívá k experimentálnímu stanovení charakteristického rozměru mřížky, d . Mřížka se umístí do vzdálenosti l od stínítka a nechá se jí procházet monochromatické koherentní záření o známé vlnové délce. Vhodným způsobem se zaznamená difraktogram na stínítku (např. obkreslení tužkou na papír přiložený na stínítku) a z polohy x jednotlivých maxim ($m = 1, 2, 3$, atd.) vůči centrálnímu maximu ($m = 0$) a vzdálenosti stínítka l se vypočítá úhel φ , viz rovnice (5) a Fig.4.

$$\tan \varphi \approx \sin \varphi \approx \varphi = \frac{x}{l}, \quad (5)$$

kde l je vzdálenost mřížky od stínítka a x vzdálenost maxima každého řádu od maxima nultého řádu.

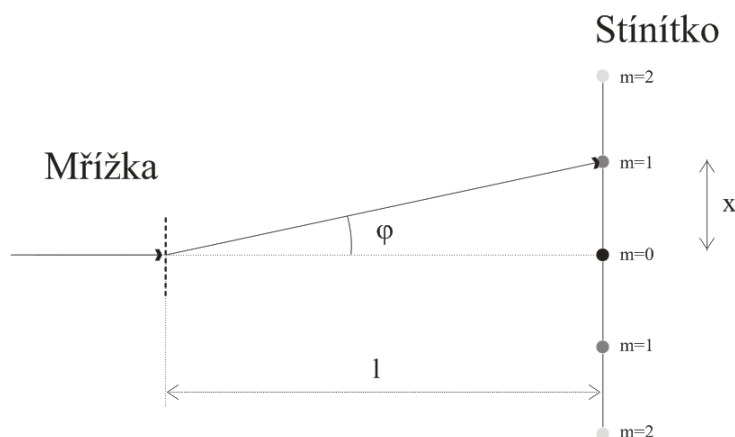


Fig.4. Difrakce na mřížce, stanovení úhlu φ pro maximum 1 řádu.

Jestliže mezi mřížkou a stínítkem navázat spojnou čočku tak, že byla splněna podmínka geometrické optiky, pak na stínítku budeme pozorovat zvětšený obraz.

d) Difrakce na štěrbině.

K tomu, aby došlo k difrakci, není nezbytné mít velké množství štěrbin, jak bylo předvedeno v předchozí kapitole, ale k difrakci může dojít i na jedné štěrbině.

Předpokládejme, že na štěrbinu o šířce D dopadá rovinná vlna (Fig.5.). Stínítko předpokládejme ve velké vzdálenosti za štěrbinou – jedná se tedy opět o jednodušší Fraunhoferovu difrakci. Podle

Huygensova principu se každá část štěrbinu stává novým zdrojem vlnění. Toto vlnění je koherentní, protože vzniklo rozdělením jedné vlny. Taky mezi štěrbinou a stínítkem nastavíme spojnou čočku aby pozorovat obraz difrakci.

Všimněte si, že difrakční obraz spojen s umístěním čočky, není štěrbinu. Při přenosu štěrbinu parallelnost difrakčního obrazu nemění, ale posun čočky vede k posunutí difrakčního obrazu na stínítku.

V případě, že poloha hran štěrbinu bude nepatrně narušena vzhledem k paprskem záření a vzdálenosti od otvoru bude značně zvětšena, pak paprsky se protínají, a difrakční obrazec lze pozorovat bez použití čočky.

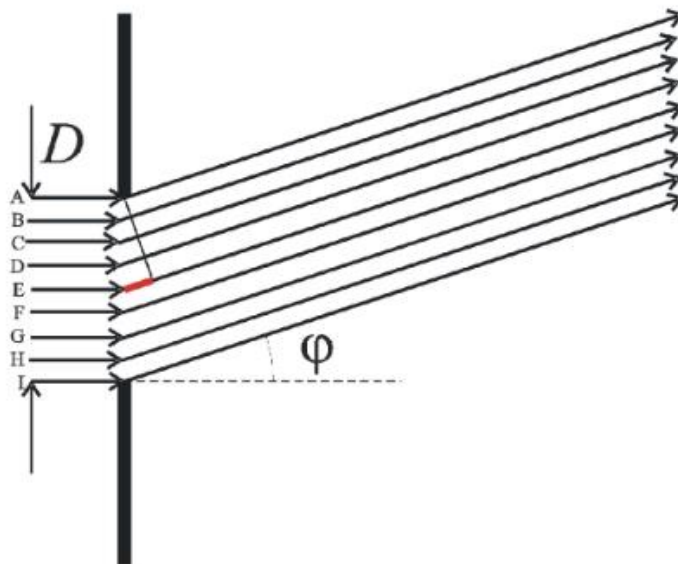


Fig.5. Difrakce na štěrbině

Pokud si šířku štěrbinu označili jako D , můžeme dráhový rozdíl mezi paprsky vyjádřit vztahem (6), s přehlednutím k Fig.3 a rovnici (2).

$$\Delta = \frac{D}{2} \sin \varphi. \quad (6)$$

Ke vzniku interferenčního minima dojde v případě dráhového rozdílu, jež je roven polovině vlnové délky $\Delta = \lambda / 2$. to znamená, že musí platit:

$$D \sin \varphi = m \lambda, \quad (7)$$

kde m je celé číslo, symbolizující jednotlivá minima.

$$\tan \varphi \approx \sin \varphi \approx \varphi = \frac{x}{l}, \quad (8)$$

kde l je vzdálenost štěrbinu od stínítka a x je vzdálenost mezi minima každého řadu.

Poznámky.

- Všechna měření provádějte s přesností na milimetry.
- Měření zpracujte do tabulek. Nezapomeňte uvést písemné označení mřížky, kterou jste měřili (1 a 2). Každá tabulka musí mít výstižný název a veškeré další náležitosti (ustálené zkratky veličin, jejich jednotky a další parametry, z nichž je patrné a ověřitelné vaše statistické zpracování naměřených hodnot).
- V případě statistického zpracování naměřených údajů pomoci kalkulátoru tuto skutečnost uveďte v poznámce za tabulkou, včetně chyby měřidla.
- Při měření v laboratoři se používá zdroj koherentního monochromatického záření, tj. **LASER**, jež vysílá úzký svazek světla o značné intenzitě. Proto je nutné dbát, aby paprsek nesvítíl do očí Vam ani spolužákům. Přestože má náš laser jen malý výkon, mohlo by v krajním případě dojít k poškození zraku (oční čočka soustředí rovnoběžné paprsky laseru do bodu na sítnici a může tam vypálit díрку). !!!

Postup práce.

1) Nainstalujte na optickou lavici vše co potřebujete pro měření difrakce. To znamená nainstalujte laser a místo pro fixování mřížky. Taky na konci optické lavice umístěte stínítko.

2) Měření vlnovou délku laserového světla.

- Zafixujte mřížku číslo jedna.
- Na stínítku přidejte milimetrový papír.
- Zapněte laser který je na jednom konci optické lavice.
- Zajistěte aby na stínítku byl viditelný difrakční obraz od mřížky a označte pozici maxima každého řadu (+m a -m).
- Udělejte měření vzdálenost mezi mřížkou a stínítkem.
- Opakujte stejné měření pro další dvě vzdálenosti mezi mřížkou a stínítkem.
- Zpracujte všechny hodnoty do tabulky a spočítejte střední vlnovou délku laserového světla.
- Srovnejte výsledky s hodnotou napsanou na laseru.

3) Měření rozměru mřížky.

- Zafixujte mřížku číslo dva.
- Na stínítku přidejte milimetrový papír.
- Zapněte laser který je na jednom konci optické lavice.
- Udělejte měření vzdálenost mezi mřížkou a stínítkem.
- Zajistěte aby na stínítku byl viditelný difrakční obraz od mřížky a označte pozici maxima každého řadu (+m a -m).
- Opakujte stejné měření pro další dvě vzdálenosti mezi mřížkou a stínítkem.
- Zpracujte všechny hodnoty do tabulky a spočítejte střední rozměr mřížky číslo dva.
- Srovnejte výsledky s hodnotou napsanou na mřížce číslo dva.

4) Měření šířky štěrbin.

- Zafixujte štěrbinu.
- Na stínítku přidejte milimetrový papír.
- Zapněte laser který je na jednom konci optické lavice.
- Udělejte měření vzdálenost mezi štěrbinou a stínítkem.
- Nastavte šířku štěrbin tak, aby na stínítku byl viditelný difrakční obraz a označte pozici minima každého řadu (+m a -m).
- Zpracujte všechny hodnoty do tabulky a spočítejte střední rozměr šířku štěrbin.

**Kontrolní otázky.**

- Co rozumíme pod pojmem tzv. difrakce světla?
- Objasněte základní vlastnosti Huygensova principu.
- Co to jsou Fraunhoferovy ohybové jevy a interference?
- Objasněte podmínky získání maxima a minima v difrakce světla na štěrbině a mřížce.
- Proč difrakční obrazec od štěrbin, při určitých podmínkách, lze pozorovat bez použití čočky?

**Literatura.**

- 1) Halliday D., Resnick R., Walker J.: Fyzika, VUT v Brně, Nakladatelství VGUTUM, 2000.
- 2) ufmi.ft.utb.cz