

Název a číslo úlohy	#5 - Měření indexu lomu některých látek
Datum měření	23. 4. 2015
Měření provedli	Tereza Schönfeldová, David Roesel
Vypracoval	David Roesel
Datum	29. 4. 2015
Hodnocení	

1 Úvod

V této úloze jsme si vyzkoušeli dva různé postupy pro zjištění indexu lomu některých látek. Nejprve pomocí optického goniometru pro jeden hranol, a poté pro různé pevné látky a kapaliny pomocí Abbého refraktometru. U úlohy jsme zároveň probrali funkci jednotlivých přístrojů a co nejefektivněji nastavování geometrie goniometru.

2 Pomůcky

Abbého refraktometr, etalon pro kalibraci, vysokoindexová imerzní kapalina (monobromnaftalén), vzorky kapalin a pevných látek, optický goniometr, planparalelní deska pro kalibraci, měřený hranol.

3 Postup a výsledky

Když jsme přišli k úloze, dostali jsme za úkol začít pečlivým prostudováním optického goniometru. Ačkoliv předchozí skupina pravděpodobně goniometr dle instrukcí nastavila mimo optimální polohu, byl nám pro jistotu ještě důkladněji přenastaven, tak abychom ho museli znovu kompletně kalibrovat.

3.1 Kalibrace goniometru

Přistoupili jsme tedy ke kalibraci goniometru, který má přesně nastavenou a zkalibrovanou hlavní vertikální osu a všechny ostatní prvky jsme tedy nastavovali relativně k ní. Prvky na goniometru budeme označovat stejně, jako na Obr. 6 v zadání [1]. V první řadě jsme nastavili autokolimátor do pozice kolmé k ose goniometru a dalekohled 12 jsme nasměřovali zhruba do středu stolku 11. Poté jsme utáhli šroub 13 pro zafixování posuvu dalekohledu a na stolek jsme položili planparalelní destičku. Umístili jsme ji rovnoběžně se spojnicí dvou šroubů 9 a na střed stolku, tedy vystředovanou podstavcem stejně jako kružnice na stolku. S asistentkou úlohy jsme probrali, že planparalelní destička je v tomto případě zvolena proto, že zrcadlo by nebylo planparalelní a oboustranné, tudíž bychom otočením stolku nemohli sledovat druhý odraz a kalibrovat podle něj výšku stolku a dalekohledu, jak bude popsáno později. Zaostřili jsme dalekohled šroubem 17 na stupnici a začali jsme hledat kříž autokolimátoru v hledáčku dalekohledu.

Z celého postupu se jednalo o asi nejdelší část. Obzvláště dlouho nám trvalo hledání, dokud nám nebylo prozrazeno, jak hledat kříž autokolimátoru efektivněji. Zprvu jsme skenovali hledáčkem prostor náhodným posouváním obou šroubů (14 a 16), což bylo vzhledem k malému posuvu neefektivní. Klíčem k rychlému nalezení kříže byl jemný posuv šroubem 16 a rychlé otáčení stolku 6 okolo kolmé polohy. Tento postup umožnil rychlejší skenování celé oblasti a nalezení kříže odraženého od jedné strany planparalelní destičky.

Po nalezení kříže na první straně destičky jsme destičku zkusili otočit. Po chvíli vzájemného ladění šroubu 16 a šroubu 9 na jedné straně destičky se nám podařilo najít kříže při odrazu od

obou stran. Naší další snahou bylo zarovnat oba kříže na obou stranách na stejnou vertikální polohu, konkrétně na nulovou hodnotu na vertikální stupnici, která překvapivě nebyla na úrovni, kde bychom ji čekali. Toho jsme docílili dalším jemným nastavováním šroubů 16 a šroubu 9 na jedné straně destičky. Pokud byly kříže na obou stranách na stejné straně horizontální osy, byla větší chyba ve vertikálním posuvu dalekohledu, a proto jsme hýbali s ním. Někdy bylo třeba hýbat jedním z nich, v jiných případech jsme posunu docílili napůl oběma šrouby. Ve finálním nastavení tedy při otočení stolku o 180° nedocházelo k vertikálnímu posuvu kříže.

Na kolimátor, respektive jeho konec 22, byla následně nastavena místo štěrbinové koncovky se žárovkou a nitkovým křížem. Stejně jako při hledání kříže jsme se kolimátor pokusili nastavit tak, aby ukazoval přibližně na střed stolku. Poté jsme našli nitkový kříž analogickým postupem minulému a mohli jsme začít měřit lámavý úhel hranolu. K tomuto nastavení byla zapotřebí spolupráce obou členů skupiny, jelikož byly šrouby na kolimátoru příliš daleko od dalekohledu.

3.2 Měření lámavého úhlu hranolu

Ze tří úhlů v hranolu jsme si vybrali ten nejostřejší, abychom se pohodlně vešli do prostoru úlohy. Hranol jsme umístili na stolek 11 tak, aby jedna jeho stěna byla kolmá na spojnici dvou šroubů 9. Zároveň ale tak, aby se s ním dalo otáčet o 360° , aniž by zavadil o některý z jiných prvků goniometru. Vzhledem k tomu, že stěny hranolu nejsou rovnoběžné, dosáhneme tímto umístěním stavu, kdy jedna ze stěn bude správně nastavitelná pomocí dvou šroubů a jeden z nich nebude mít na její kolmost žádný vliv. Tohoto šroubu potom můžeme využít pro dorovnání druhé strany, aniž bychom ovlivnili tu první. S mírnou změnou v umístění hranolu jsme tedy opět nastavili obě jeho strany.

Následně jsme jednu ze stran nastavili kolmo k dalekohledu, zafixovali jsme stolek šroubem 7 a odečetli jsme úhel na stupnici v okuláru 18. V okuláru jsme volili ze dvou čárek jako měřicí bod tu levou a značku jsme umístili na ni. Mohli jsme si zvolit i jinou polohu (pravou čárku, střed mezi nimi, ...), ale dokud obě měření provádíme stejným způsobem, na naší volbě nebude záležet. Úhel na stupnici jsme odečetli jako

$$\alpha_1 = 270^\circ 50' 48'',$$

což po odečtení od 360° (vzhledem ke směru stupnice) odpovídá úhlu

$$\alpha'_1 = 89^\circ 9' 12''$$

s chybou měření $\sigma_{\gamma_2} = 1''$ určenou jako polovina nejmenšího dílku na stupnici. Poté jsme dalekohled otočili (bez sebemenšího pohybu krystalem) tak, aby byl kolmý na druhou stranu svírající lámavý úhel a odečetli jsme stejným postupem úhel

$$\alpha_2 = 62^\circ 56' 6''.$$

Jeho chyba je stejná jako pro první úhel. Vzhledem ke geometrii úlohy (viz Obr. 5 ze zadání [1]) je patrné, že lámavý úhel je doplňkem součtu dvou výše odečtených úhlů do 180° , tedy

$$\varphi = 180^\circ - \alpha'_1 - \alpha_2 = 27^\circ 54' 42''$$

s chybou $\sigma_\varphi = 1''$ určenou podle vzorce pro výpočet chyby nepřímého měření, viz např. [2].

3.3 Určování minimální odchylky

Se změřeným lámavým úhlem hranolu bylo dalším krokem k zjištění indexu lomu určení minimální odchylky δ . Na kolimátor jsme místo žárovky našroubovali zpětně štěrbinu a nasvětlili

jsme ji laserovou diodou. Zatímco jeden z nás koukal do dalekohledu, druhý nastavil šěrbinu na takovou velikost, aby byla světelná stopa co nejtenčí, ale zároveň byla stále souvislá. Pak jsme stolek s hranolem nastavili tak, aby na hranol dopadalo světlo přibližně tak jako na Obr. 5 ze zadání [1]. Okem jsme se podívali, kam zhruba jde paprsek, a natočili jsme dalekohled do daného úhlu. Poté jsme otáčeli stolkem, což vedlo k pohybu světelného paprsku a toho jsme se drželi dalekohledem. Ve chvíli, kdy se paprsek začal s dalším otáčením stolku hýbat na druhou stranu, jsme přestali stolkem otáčet a doladili jeho pozici co nejpřesněji na zlom ve směru pohybu. Poté jsme odečetli úhel v okuláru 18 a zaznamenali jsme si ho jako

$$\gamma_1 = 350^\circ 44' 38''$$

s chybou měření $\sigma_{\gamma_1} = 1''$ určenou jako polovina nejmenšího dílku na stupnici. Vzhledem ke směru stupnice byl námi měřený úhel ve skutečnosti doplňkem γ_1 do 360° , tedy

$$\gamma'_1 = 9^\circ 15' 22''$$

se stejnou chybou. Experiment jsme opakovali i s hranolem otočeným o 180° a tím jsme získali úhel

$$\gamma_2 = 20^\circ 32' 33'',$$

znovu se stejnou chybou. Vzhledem k tomu, že součet obou naměřených úhlů je dvojnásobkem minimální odchylky, jsme úhel δ určili jako

$$\delta = \frac{\gamma_2 + \gamma'_1}{2} = 14^\circ 53' 57,5''$$

s chybou $0,7''$ určenou podle vzorce pro výpočet chyby nepřímého měření [2].

3.4 Určení indexu lomu hranolu

Za znalosti minimální odchylky δ a lámavého úhlu φ můžeme určit index lomu materiálu jako

$$n_h = \frac{\sin((\delta + \varphi)/2)}{\sin(\varphi/2)},$$

což je odvozeno v zadání [1]. Námi určená hodnota indexu lomu hranolu je tedy

$$n_h = (1,51329 \pm 0,00001)$$

s chybou určenou opět podle vzorce pro výpočet chyby nepřímého měření [2].

3.5 Práce s Abbého refraktometrem

Další část úlohy spočívala ve vyzkoušení práce s Abbého refraktometrem. Nejprve jsme se seznámili se základními principy přístroje a poté jsme pomocí pevného etalonu s přesně známým indexem lomu zkontrolovali kalibraci refraktometru. Etalon měl mít index lomu

$$n'_e = 1,5158.$$

Etalon jsme tedy vyjmuli z obalu a nakapali na něj imerzní vrstvu - monobromnaftalén. Ten má index lomu mezi indexem hranolu v přístroji a měřeným etalonem. Naklonili jsme si mírně refraktometr, tak aby se do něj dal vzorek vkládat vodorovně a imerze nám neztekla mimo vzorek, a přitiskli jsme etalon k hranolu. Poté jsme ověřili pohledem shora, že se nám imerze dostatečně dobře rozvrstvila a že ve středu políčka nejsou žádné vzduchové bublinky, abychom

neměřili vzduch místo vzorku. Poté jsme nasměrovali lampičku tak, aby osvětlovala zrcátko na spodní části refraktometru, od kterého se světlo odráželo zespodu na vzorek. Předem jsme si nastavili v levém okuláru předpokládanou hodnotu indexu lomu a v pravém okuláru jsme nastavili rozhraní způsobené rozdílem indexů lomu na pozici kříže a šroubem na pravé straně jsme doladili disperzi, abychom viděli rozhraní ostré. Princip korekce disperze byl založen na dvou Amiciho hranolech a jejich vzájemné poloze, detaily viz zadání [1]. Poté jsme na levém okuláru odečetli hodnotu indexu lomu.

Následně jsme změřili všechny dostupné vzorky pevných látek identickým postupem. Jedinou změnou bylo pro kouřové plexisklo, že jsme místo svícení zespodu svítili z boku a využívali principu na Obr. 2b v zadání [1]. Vzorek totiž nebyl dostatečně průsvitný a odečítání probíhalo úplně stejně, jen jsme místo rozhraní světlá-tmavá pozorovali rozhraní světlá-světlejší. Vzorky jsme vždy po proměření očistili. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 1.

vzorek	n [-]
etalon	1,5140
čiré sklo	1,5065
čiré plexisklo	1,4880
kouřové plexisklo	1,4880
polypropylen	1,4970

Tabulka 1: Naměřené hodnoty indexů lomu pevných látek Abbého refraktometrem n . Chyba jednotlivých měření, určená jako polovina nejmenšího dílku měřítka, je 0,0005.

Dále jsme refraktometru využili pro změření indexu lomu kapalin. Měření probíhalo stejně, jen jsme místo pevných látek přikládali do refraktometru vždy přitlačný hranol s tenkou vrstvou proměřované kapaliny. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 2.

vzorek	n [-]	n_t [-]
monobromnaftalén	1,6635	1,658
IPA	1,3745	
destilovaná voda	1,3300	1,333
rez. olej 1	1,5110	1,515
rez. olej 2	1,5150	1,520
neznámá	1,3510	

Tabulka 2: Naměřené hodnoty indexů lomu kapalin Abbého refraktometrem n a jejich porovnání s teoretickými hodnotami indexu lomu n_t . Chyba jednotlivých měření, určená jako polovina nejmenšího dílku měřítka, je 0,0005.

Na závěr jsme si ještě chtěli ověřit principy diskutované na Obr. 3 v zadání [1]. Na to jsme použili destičku z čirého skla a jako imerzi jsme použili olej o teoretickém indexu lomu 1,515. Rozdíl námi změřených hodnot pro tyto dva vzorky byl totiž nejmenší ze všech ostatních možných kombinací. S takto nakombinovanými vzorky jsme sledovali rozhraní v pravém okuláru a došli jsme k názoru, že naše pozorování odpovídá principům ze zadání. Nepozorovali jsme totiž jednoznačné rozhraní, ale spíše plynulý přechod mezi světlou a tmavou barvou. V místech, kde bychom měli vidět rozhraní odpovídající oleji, jsme navíc viděli konstantní barvu a žádné rozhraní. Ověřili jsme tedy, že pro kvalitní měření je zapotřebí volit imerzi rozumně, tedy tak aby druhé rozhraní šlo mimo náš úhel pohledu a nemohli jsme chybně určit rozhraní.

4 Diskuse a závěr

Měření pomocí optického goniometru bylo o poznání náročnější než práce s Abbého refraktometrem. Na druhou stranu jsme goniometrem dosáhli více než o řád lepší přesnost při určení indexu lomu a ke zpřesnění o dva řády oproti refraktometru by stačila jen jemnější stupnice v okuláru, který měl nejjemnější stupnici rozdělenou po 2".

Při měření minimální odchylky jsme zvolili metodu měření jejího dvojnásobku, která je přesnější, než pokud bychom změřili nejprve úhel vychýleného paprsku a poté odebrali hranol a změřili úhel původního paprsku. Navíc bychom po odebrání hranolu ztratili možnost změřit znovu první hodnotu, protože bychom nikdy nebyli schopni hranol umístit přesně na původní místo. U optického goniometru jsme jako chybu měření brali polovinu nejmenšího dílku, jelikož jsme jiný zdroj významnější chyby nepozorovali. Dokonale přesně se nám určitě nepodařilo nastavit obě strany goniometru, vzhledem k tomu jak moc se hýbal kříž jen při dotknutí se dalekohledu rukou.

Při práci s Abbého refraktometrem jsme brali chybu také jako polovinu nejmenšího dílku. Zkusili jsme si, jaký vliv má ne úplně přesné umístění kříže v pravém okuláru na rozhraní, a určili jsme chybu nepřesného umístění jako zanedbatelnou v porovnání s přesností stupnice v levém okuláru.

Abbého refraktometr byl zkalibrován relativně dobře. Námi naměřená hodnota pro etalon byla $n_e = (1,5140 \pm 0,0005)$, zatímco přímo na něm byl uveden index lomu $n'_e = 1,5158$, což dává rozdíl $\Delta_{n_e} = 0,0018$. Tento rozdíl přisuzujeme jiné teplotě v praxi, vzhledem k tomu, že teplota je hlavní veličinou ovlivňující index lomu pevných látek. Stejně, ne-li ještě více, ovlivňuje teplota index lomu kapalin. Usuzujeme tedy, že naše měření mohou mít systematickou chybu v řádu tisícín, ale relativní vztah jednotlivých hodnot zůstane i přesto zachován.

Z výsledků je patrné, že kouřové plexisklo se od čirého plexiskla v indexu lomu neliší, nebo se liší na desetinných místech mimo naši rozlišovací schopnost. Pro monobromnaftalén jsme ověřili, že se opravdu jedná o dobře zvolenou imerzní kapalinu pro měření indexů lomu okolo 1,5. Pokud by byl index lomu imerzní vrstvy nižší než index lomu měřené vrstvy, nedojde na rozhraní měřeného vzorku s imerzí k totálnímu odrazu a danou kapalinu nelze použít pro měření indexu lomu. Neznámou kapalinu určujeme po přivonění odhadem na 67% borovičku. K výsledku jsme se dobrali lineární kombinací indexů lomu destilované vody (naměřeného) a ethanolu (předpokládáme 1,3616). Vzhledem k národnosti vedoucího praktik nám tento výsledek přijde pravděpodobný.

Reference

- [1] *Návod k úloze 5 - Měření indexu lomu některých látek* [online], [cit. 26. dubna 2015], http://optics.fjfi.cvut.cz/files/pdf/ZPOP_05.pdf
- [2] Kolektiv KF, *Chyby měření* [Online], [cit. 26. dubna 2015], <http://praktikum.fjfi.cvut.cz/documents/chybynav/chyby-o.pdf>