

Od bezkontaktního měření vzdálenosti k měření indexu lomu

Vojtěch Žák

Katedra didaktiky fyziky MFF UK

Abstrakt

V tomto článku je představeno měření indexu lomu několika kapalin a jedné pevné látky pomocí bezkontaktního měřiče vzdálenosti, který se k měření vzdáleností běžně používá v praxi. Je zde odvozeno, že index lomu se rovná podílu délky, kterou měřič vyhodnotí při měření v daném prostředí, a skutečné délky (ve vzduchu). Měření indexu lomu touto metodou jsou poměrně přesná. Ve výuce fyziky je možné se dále zabývat měřením indexu lomu dalších látek, zpřesňováním měření a jejich diskuzí.

Úvodem

Měřením indexu lomu optických prostředí se zabývá mnoho příspěvků zaměřených na fyzikální vzdělávání, a to jak domácích, tak mezinárodních. Z domácích můžeme uvést např. příspěvky [1], [2], [3] a [4] uvedené v *Souhrnném sborníku Veletrhu nápadů učitelů fyziky* [5].

Tento článek se zabývá metodou měření indexu lomu pomocí bezkontaktního měřiče vzdálenosti (viz Obr. 1), který lze pod názvy *laserový dálkoměr*, *měřič vzdálenosti*, *měřič délky* apod. koupit v obchodech s měřicí technikou, náradím atd. (včetně e-shopů). Tato metoda není v českém prostředí zcela neznámá (viz např. [6]), nicméně ve výuce fyziky není příliš rozšířená, a proto jí chceme věnovat pozornost.



Obr. 1. Bezkontaktní měřič vzdálenosti (délky) použitý při měření uvedených v tomto článku (vlevo – měřič, v pozadí – krabička).

Základem použité metody měření délky (viz Obr. 2) je, že měřič vyšle laserový signál, který se odrazí od překážky, a měřič dále zaznamená návrat odraženého signálu, vyhodnotí dobu, která uplynula, a dopočítá příslušnou délku (vzdálenost, dráhu). Délka je určena jako součin rychlosti světla ve vzduchu (vakuu) a příslušné doby ($s = ct$). Měřič tedy při vyhodnocování délky předpokládá rovnoměrné šíření světla (signálu) ve vzduchu. Pokud umístíme signálu do cesty jinou látku, ve které se světlo pohybuje jinou rychlostí, vyhodnotí měřič délku chybně. Toho využijeme v našich experimentech (Obr. 2).



Obr. 2. Základní uspořádání experimentu pro měření indexu lomu kapaliny – měřič je umístěn těsně u stěny nádoby (zvnějšku), v nádobě je měřená kapalina, těsně u protější stěny nádoby je překážka (zvnějšku, např. krabička), od které se signál odrazí zpět.

Odvození vztahu pro index lomu na základě měření délky

Pro index lomu n daného optického prostředí platí, že $n = \frac{c}{v}$, kde c je rychlost světla ve vakuu (dostatečně přesně také ve vzduchu) a v je rychlost světla v daném prostředí.

- Pro délku (dráhu), kterou měřič ukáže při měření ve vzduchu, platí: $s_1 = ct_1$, kde t_1 je čas, za který světlo urazí dráhu s_1 ve vzduchu.
- Délka, kterou měřič chybně ukáže při měření v jiném prostředí, jehož skutečná délka je s_1 , je: $s_2 = ct_2$, kde t_2 je čas, za který světlo urazí dráhu s_1 (nikoli s_2) v daném (jiném) prostředí. Měřič totiž předpokládá, že světlo při měření prochází jen vzduchem, a proto správný čas t_2 násobí chybnou rychlostí c .
- Skutečná délka je tedy stále s_1 a platí pro ni: $s_1 = vt_2$, kde v je rychlost světla v daném (jiném) prostředí.

Na základě posledních dvou uvedených vztahů tudíž můžeme pro index lomu napsat:

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\frac{s_2}{t_2}}{\frac{s_1}{t_2}} = \frac{s_2}{s_1}.$$

Index lomu daného prostředí je tedy roven podílu délky naměřené chybně v daném prostředí a délky naměřené správně ve vzduchu.

K uvedenému vztahu lze dojít také *následující úvahou*: Index lomu daného prostředí nám říká, kolikrát je světlo rychlejší ve vakuu (vzduchu) než v daném prostředí. Pokud se světlo v daném prostředí pohybuje pomaleji, registruje měřič delší čas, a tudíž ukáže větší délku

(přímá úměrnost pro rovnoměrný pohyb). Zobrazená délka je tolikrát větší, kolikrát je rychlost světla v daném prostředí menší. Index lomu tak bude roven podílu délky změřené chybně v daném prostředí („větší délka“) a délky změřené správně ve vzduchu („menší délka“).

Index lomu různých prostředí na základě měření délky

V následující Tab. 1 jsou uvedeny naměřené délky a dopočítané indexy lomu různých prostředí. Pro představu o rozptylu naměřených hodnot je u každého prostředí uvedena nejmenší změřená délka s_{\min} a největší změřená délka s_{\max} . Dále je uvedena průměrná hodnota s_{prum} , která je typicky počítána ze šesti naměřených hodnot. Ta tedy obecně není přesně aritmetickým průměrem s_{\min} a s_{\max} . Z minimální, maximální a průměrné hodnoty délky jsou dopočítány indexy lomu n_{\min} , n_{\max} a n_{prum} . Pokud je to možné, je také uvedena tabulková hodnota indexu lomu daného prostředí n_{tab} (viz [7], [8]). Délku nádoby jsme pomocí pravítka změřili jako 27,1 cm (použito u kapalin), délku tyčky z plexiskla jako 24,9 cm.

Tabulka 1. Naměřené délky použité k výpočtu indexu lomu různých prostředí a indexy lomu těchto prostředí.

| Prostředí (látka) | $\frac{s_{\min}}{\text{cm}}$ | $\frac{s_{\max}}{\text{cm}}$ | $\frac{s_{\text{prum}}}{\text{cm}}$ | n_{\min} | n_{\max} | n_{prum} | n_{tab} |
|---|------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|------------|------------|-------------------|------------------|
| slunečnicový olej | 40,7 | 41,0 | 40,85 | 1,502 | 1,513 | 1,51 | 1,47 |
| voda (kohoutková) | 37,0 | 37,2 | 37,08 | 1,365 | 1,373 | 1,37 | 1,33 |
| cukerný roztok I (250 ml vody + 50 g cukru) | 37,4 | 37,7 | 37,53 | 1,380 | 1,391 | 1,38 | --- |
| cukerný roztok II (250 ml vody + 100 g cukru) | 38,0 | 38,2 | 38,08 | 1,402 | 1,410 | 1,41 | --- |
| cukerný roztok III (250 ml vody + 150 g cukru) | 38,7 | 39,1 | 38,90 | 1,428 | 1,443 | 1,44 | --- |
| limonáda (Kubík–jahoda) | 37,0 | 37,3 | 37,15 | 1,365 | 1,376 | 1,37 | --- |
| plexisklo (tyčka) | 37,6 | 37,9 | 37,72 | 1,510 | 1,522 | 1,51 | 1,49 |

- Z případů, kdy je možné porovnat index lomu určený na základě našich měření s indexem lomu uvedeným v tabulkách (olej, voda, plexisklo) vyplývá, že změřené hodnoty se od tabulkových liší maximálně o 3 %. (U slunečnicového oleje bylo provedeno porovnání s tabulkovou hodnotou pro rostlinný olej, u kohoutkové vody bylo provedeno porovnání s tabulkovou hodnotou pro vodu.)
- Index lomu obecně závisí také na vlnové délce použitého světla, takže tabulkové hodnoty indexu lomu bývají uvedeny jen pro určitou vlnovou délku světla.
- U cukerných roztoků (použit byl „bílý krystal“ z kuchyně) je na základě měření a výpočtů zřejmé, že s rostoucím podílem cukru roste index lomu roztoku. Tento trend koresponduje s tabulkovými hodnotami pro cukerný roztok uvedenými v [8].
- Limonáda (Kubík–jahoda) má na základě našich měření index lomu velmi podobný jako kohoutková voda, i když je tato limonáda sladká. Není to ovšem překvapením, protože podle informací na láhvi tohoto nápoje připadá na 100 ml nápoje „jen“ 4,9 g cukru, tj. jde o relativně malý podíl cukru (oproti našim roztokům I, II a III).

- Z naměřených hodnot, které vedou k určení indexu lomu vody a slunečnicového oleje, je zřejmé, že *být hustší* a *být opticky hustší* je skutečně něco jiného. Zatímco slunečnicový olej má menší hustotu (přesněji: objemovou hustotu hmotnosti) než voda, což víme z běžného života z kuchyně, má olej podle našich měření větší index lomu než voda, a tudíž je slunečnicový olej opticky hustší.
- Do měření a výpočtu indexu lomu kapalin nebyl zahrnut vliv nádoby, přesněji odlišný index lomu materiálu jejích stěn. S touto korekcí je možné se seznámit v [6].

Závěrem

V tomto článku bylo představeno měření indexu lomu několika kapalin a jedné pevné látky pomocí bezkontaktního měřiče vzdálenosti, který se k měření vzdálenosti běžně používá v praxi. Bylo odvozeno, že index lomu se rovná podílu délky, kterou měřič ukáže při měření v daném prostředí, a skutečné délky (ve vzduchu). Měření indexu lomu jsou poměrně přesná, přestože v úvahách zanedbáváme stěny nádoby (při proměřování kapalin). Odchytky od hodnot uvedených v tabulkách jsou do 3 %. Při měření se ukázalo, že index lomu vodného roztoku cukru roste s rostoucím množstvím rozpuštěného cukru (což také odpovídá tabulkovým hodnotám). Ve výuce fyziky je možné se mimo jiné dále zabývat měřením indexu lomu dalších látek a zpřesňováním měření.

Literatura

- [1] Baník I., Baník R.: *Tri triky z optiky*. In: Souhrnný sborník Veletrhu nápadů učitelů fyziky. [cit. 25. 8. 2021]. Dostupné online: <http://vnuf.cz/sbornik/prispevky/06-01-Banik.html>
- [2] Baník I., Chovancová M.: *Trochu optiky na domácí půdě*. In: Souhrnný sborník Veletrhu nápadů učitelů fyziky. [cit. 25. 8. 2021]. Dostupné online: <http://vnuf.cz/sbornik/prispevky/10-08-Banik.html>
- [3] Horváth P.: *Meranie indexu lomu svetla vo vode pomocou CD*. In: Souhrnný sborník Veletrhu nápadů učitelů fyziky. [cit. 25. 8. 2021]. Dostupné online: <http://vnuf.cz/sbornik/prispevky/18-06-Horvath.html>
- [4] Onderová Ľ.: *Jednoduché pokusy z optiky*. In: Souhrnný sborník Veletrhu nápadů učitelů fyziky. [cit. 25. 8. 2021]. Dostupné online: <http://vnuf.cz/sbornik/prispevky/11-18-Onderova.html>
- [5] *Souhrnný sborník Veletrhu nápadů učitelů fyziky*. [cit. 25. 8. 2021]. Dostupné online: <http://vnuf.cz/sbornik/>
- [6] *Měření indexu lomu pomocí digitálního dálkoměru*. [cit. 24. 8. 2021]. Dostupné online: <http://fyzikalnipokusy.cz/2184/mereni-indexu-lomu-pomoci-digitalniho-dalkomeru>
- [7] Kotlík B., Lank V., Růžičková K., Vondra M., Vošický Z.: *Matematické, fyzikální a chemické tabulky*. Fragment, Praha 2003. ISBN 978-80-7200-521-5.
- [8] *List of refractive indices*. [cit. 24. 8. 2021]. Dostupné online: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_refractive_indices