Pracovní úkol

1. Změřte závislost indexu lomu vzduchu na tlaku.
2. Závislost $n(p)$ zpracujte graficky. Vyneste také závislost $\lambda(n)$. Proveďte lineární regresi závislosti $n(p)$, stanovte chybu parametrů získaných lineární regresí.
3. Porovnáním tabelovaného a změřeného stanovte teplotu laboratoře (včetně chyby).

Teorie

Jevu interference světla je možno ve vhodném uspořádání použít pro měření indexu lomu. Jaminův interferometr lze takto použít jako interferenční refraktometr. Uspořádání Jaminova interferometru je v [1] str. 139 obr 4.2-1. Skládá se ze dvou planparalelních desek o stejné tloušťtce zhotovených ze skla o indexu lomu N. Desky jsou pokoveny. Dopadá-li monochromatický paprsek 1 ze zdroje světla S na přední stěnu první desky, částečně se odráží $(1')$ a částečně láme. Tento lomený paprsek dopadá na zrcadlovou zadní stěnu pod úhlem α, odráží se a vystupuje z desky jako paprsek $1''$. Oba paprsky pak dopadají na přední stěnu druhé desky, kde se analogicky odráží a lámou, jak je vyznačeno na obrázku. Po výstupu z druhé desky vstupují oba paprsky do dalekohledu s dráhovým rozdílem

$$\delta = 2Nd(\cos\beta_1 - \cos\beta_2)\,, \tag{1}$$

kde β_1 a β_2 jsou úhly natočení odrazných planparalelních desek.

Do drah obou paprsků jsou vloženy dvě stejné kyvety T_1 a T_2 o délce l, naplněné plyny s indexy lomu N_1 a N_0. Po vložení kyvet se dráhový rozdíl δ_0 změní

$$\delta_1 = l(N_1 - N_0) + \delta_0\,. \tag{2}$$

Pokud například změnou tlaku změníme index lomu v prvé kyvetě z N_1 na N_2, bude dráhový rozdíl

$$\delta_2 = l(N_2 - N_0) + \delta_0\,. \tag{3}$$

Potom změna dráhového rozdílu je dána vztahem

$$\delta = \delta_2 - \delta_1 = l(N_2 - N_1)\,. \tag{4}$$

V případě, že změna probíhá spojitě a dostatečně pomalu, lze změnu dráhového rozdílu určit z počtu k proužků prošlých nitkovým křížem dalekohledu

$$\delta = k\lambda\,. \tag{5}$$

Známe-li index lomu N_1, pak druhý vypočítáme ze vztahu

$$N_2 = N_1 + \frac{k\lambda}{l}\,. \tag{6}$$

Pro závislost vlnové délky na indexu lomu platí vztah

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{N}\,, \tag{7}$$

kde λ_0 je vlnová délka světla ve vakuu.

Teplota závisí na indexu lomu a tlaku dle vztahu

$$t = \frac{1}{\gamma}\left(\frac{(N(15,p_0)-1)\cdot(1+15\gamma)p}{(N(t,p)-1)\cdot p_0} - 1\right), \tag{8}$$

kde $N(15,p_0) - 1 = 277.2\cdot 10^{-6}$ pro vlnovou délku $\lambda_0 = 589.3\,\mathrm{nm}$, $p_0 = 101.325\,kPa$ a $\gamma = 0.003670K^{-1}$.

Měření

Interferometr jsem osvětlila zdrojem kvazimonochromatického světla. Z kyvety jsem vyčerpala vzduch na mezní tlak dosažitelný použitou vývěvou (budeme ho v tomto smyslu považovat za vakuum). Odpojila jsem kohoutem K_1 vývěvu od trubice a kohoutem K_2 připouštěla pomalu vzduch a současně počítala proužky, které prošly středem nitkového kříže dalekohledu. Po projití deseti proužků jsem zastavila připouštění a po ustálení interferenčního obrazce odečetla příslušný tlak p_i. Takto jsem pokračovala, dokud se tlak v trubici nevyrovnal atmosferickému tlaku. Tento postup jsem opakovala pětkrát. Chybu určení počtu kroužků odhaduji na 0.25 kroužků, chybu určení tlaku na 0.5 hPa.

Index lomu N vzduchu při daném tlaku jsem stanovila dle (6), kde za počáteční stav pokládám vyčerpanou kyvetu, tedy $N_1 = 1$. Délka kyvety byla $l = 50$cm. Jako zdroj světla byla použita sodíková výbojka o vlnové délce $\lambda_0 = 589.3$nm.

Výsledky měření závislosti indexu lomu vzduchu na tlaku udává Tabulka 1. Graficky je měření zpracováno v Grafech 1-5, které jsou přiloženy na konci dokumentu. Závislosti jsou proloženy programem `Gnuplot` přímkou s předpisem $n = 1 + ap$. Koeficienty lineární regrese jsou

$$a_1 = (2.569 \pm 0.004) \cdot 10^{-9}\,\mathrm{Pa}^{-1}$$

$$a_2 = (2.585 \pm 0.002) \cdot 10^{-9}\,\mathrm{Pa}^{-1}$$

$$a_3 = (2.575 \pm 0.004) \cdot 10^{-9}\,\mathrm{Pa}^{-1}$$

$$a_4 = (2.568 \pm 0.006) \cdot 10^{-9}\,\mathrm{Pa}^{-1}$$

$$a_5 = (2.577 \pm 0.002) \cdot 10^{-9}\,\mathrm{Pa}^{-1}$$

Výsledná směrnice je $a = (2.57 \pm 0.01) \cdot 10^{-9}\,\mathrm{Pa}^{-1}$.

Závislost vlnové délky na indexu lomu je vynesena v Grafu 6. Vlnovou délku jsem vypočítala dle vztahu (7). Graf je opět přiložen na konci dokumentu.

Teplotu určím dle vztahu (8) $t_k = (32 \pm 1)\,°\mathrm{C}$. Teplota v laboratoři byla změřena teploměrem jako $t_l = (22.5 \pm 0.5)\,°\mathrm{C}$.

Diskuze

Všechny změřené závislosti jsou lineární (viz Grafy 1-5). Koeficient a je dle tabulek $a = 2.655 \cdot 10^{-9}\,\mathrm{Pa}^{-1}$. Určené hodnoty směrnice se neshodují ani v rámci přesnosti měření. V chybě není zahrnuta aproximace ve vztahu (6), kdy jsem za N_1 dosadila 1, tedy index lomu odpovídající vakuu. V kyvetě však vakuum nebylo. Použitá rotační vývěva dokáže odčerpat vzduch z kyvety na tlak $1\,Pa$, což je ovšem o dva řády nižší tlak, než byl schopen zaregistrovat použitý manomentr. Mnou použitá aproximace je tedy oprávněná.

Další chyby, které jsme se dopustili, je zanedbání změny vlnové délky při rostoucím tlaku. Ve vzorci (6) uvažuji vlnovou délku světla pro vakuum. Řádově je však rozdíl po korekci 10^{-12}, tedy opět můžeme provést aproximaci.

Index lomu světla je závislý na dalších faktorech, například vlhkosti vzduchu, které nebyly při měření zohledněny. Proto si myslím, že mnou uvedená chyba je podhodnocena.

k	N	p_1 [hPa]	p_2 [hPa]	p_3 [hPa]	p_4 [hPa]	p_5 [hPa]
0	1.000000	5	3	4	4	1
10	1.000012	53	48	54	53	48
20	1.000024	98	98	98	99	93
30	1.000035	144	139	144	144	139
40	1.000047	189	184	190	190	184
50	1.000059	234	230	235	235	230
60	1.000071	279	276	280	280	275
70	1.000083	326	321	326	326	321
80	1.000094	371	366	372	371	367
90	1.000106	417	412	417	417	412
100	1.000118	462	457	463	463	457
110	1.000130	507	504	508	508	503
120	1.000141	553	547	553	553	553
130	1.000153	598	594	599	599	598
140	1.000165	643	639	644	664	643
150	1.000177	689	684	686	690	689
160	1.000189	734	730	730	732	734
170	1.000200	781	774	776	775	779
180	1.000212	825	820	822	821	825
190	1.000224	870	865	869	870	869
200	1.000236	916	910	912	914	912
210	1.000248	960	956	958	961	957
220	1.000259	1007	1003	1003	1007	1004
224	1.000264	1020	1020	1020	1020	1020

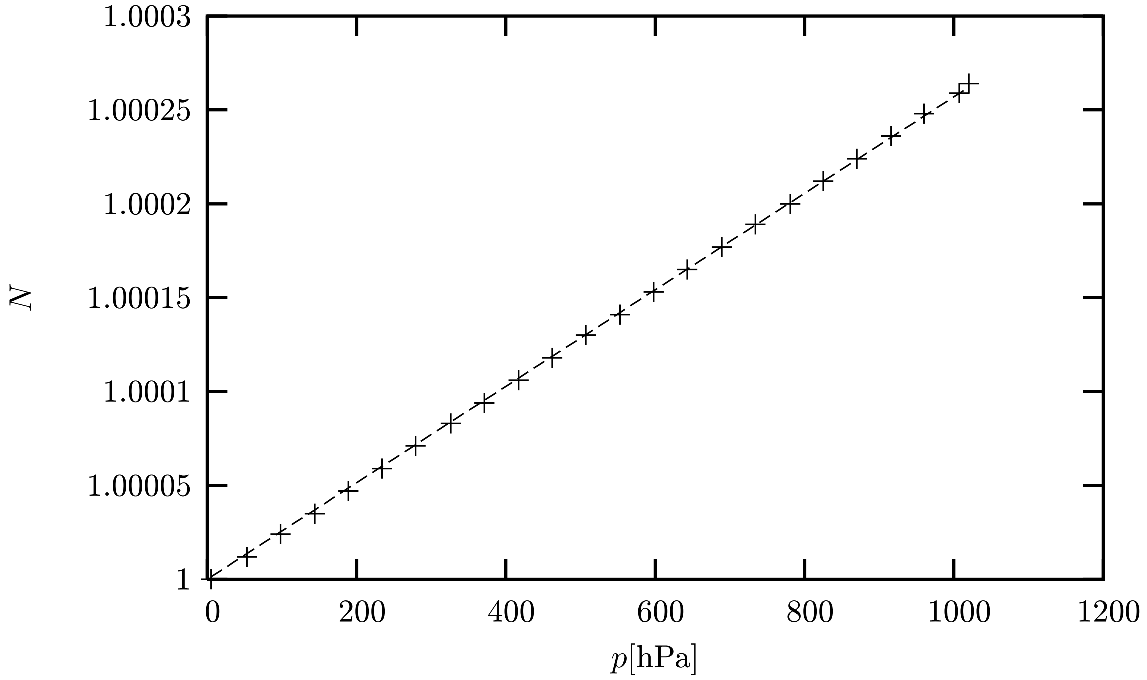
Tabulka 1.: Měření závislosti indexu lomu vzduchu na tlaku

Závěr

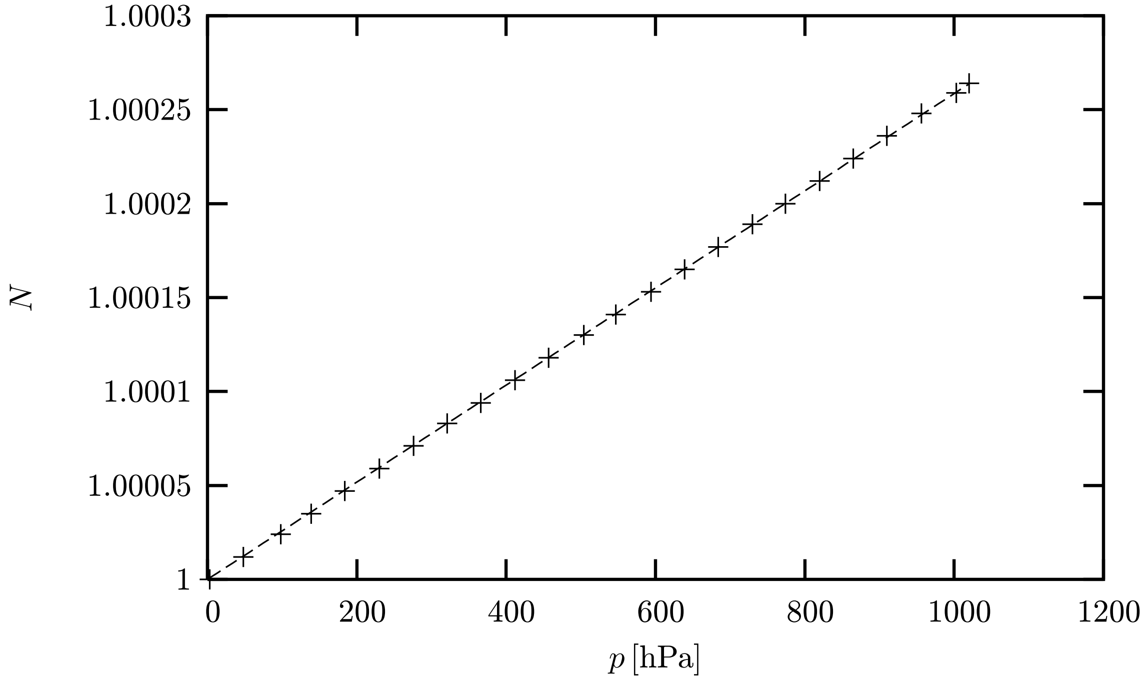
V tomto praktiku jsem proměřila závislost indexu lomu vzduchu na tlaku. Ověřila jsem linearitu této závislosti. Výsledky jsou vyneseny v Grafech 1-5. Směrnice je $a = (2.57 \pm 0.01) \cdot 10^{-9}\,\mathrm{Pa}^{-1}$. Závislost vlnové délky na indexu lomu je vynesena v Grafu 6. Teplota v laboratoři byla $t_l = (22.5 \pm 0.5)\,°\mathrm{C}$, teplota v kyvetě $t_k = (32 \pm 1)\,°\mathrm{C}$.

Literatura

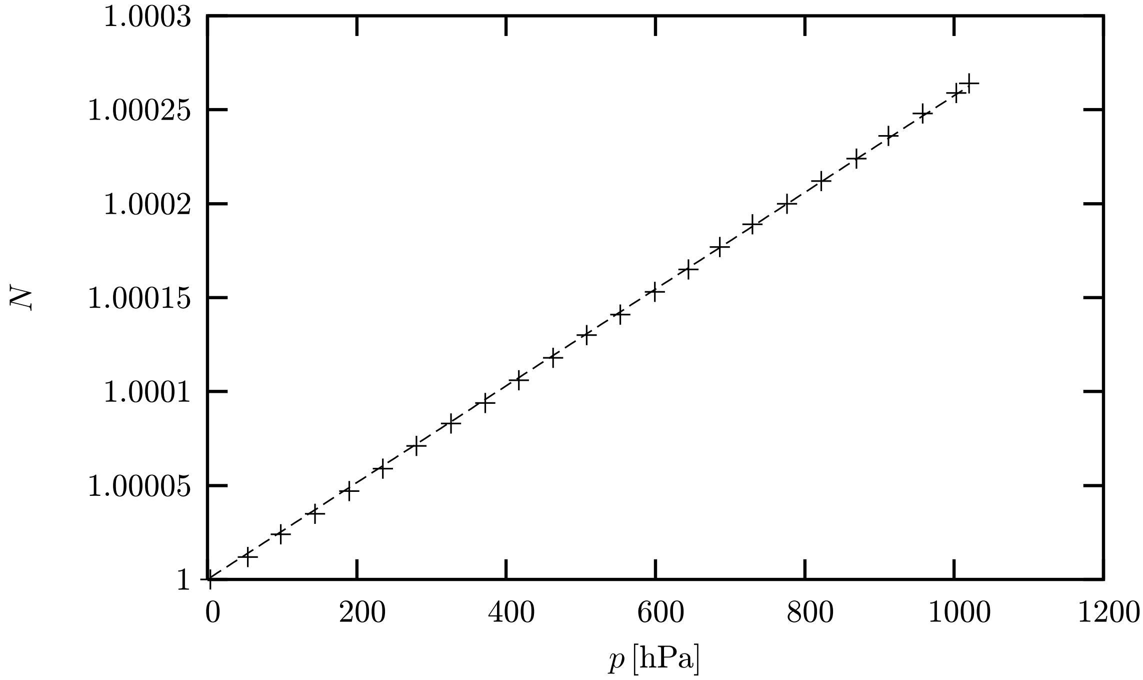
[1] Fyzikální praktikum III., I. Pelant, J. Fiala, J. Pospíšil, J. Fähnrich, Praha 1993
[2] Zpracování výsledků fyzikálních měření, J. Englich, Praha 2000
[3] Fyzikální a matematické tabulky, j. Brož a kol. SNTL, Praha 1980



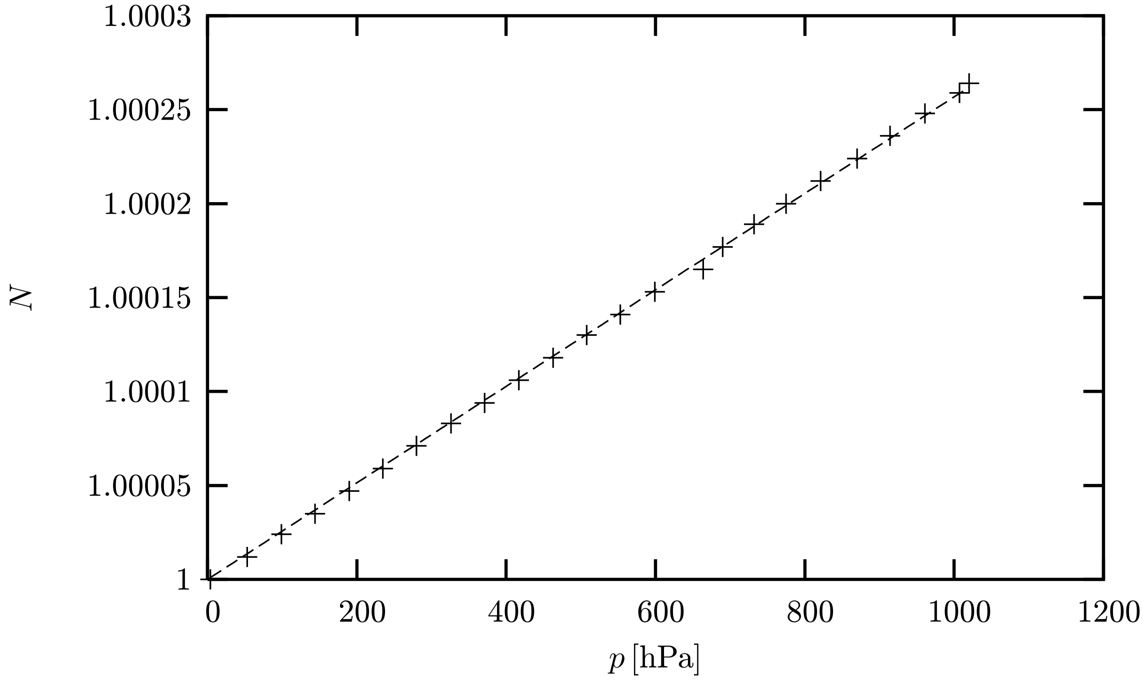
Graf 1.: Závislost indexu lomu na tlaku. Měření č.1



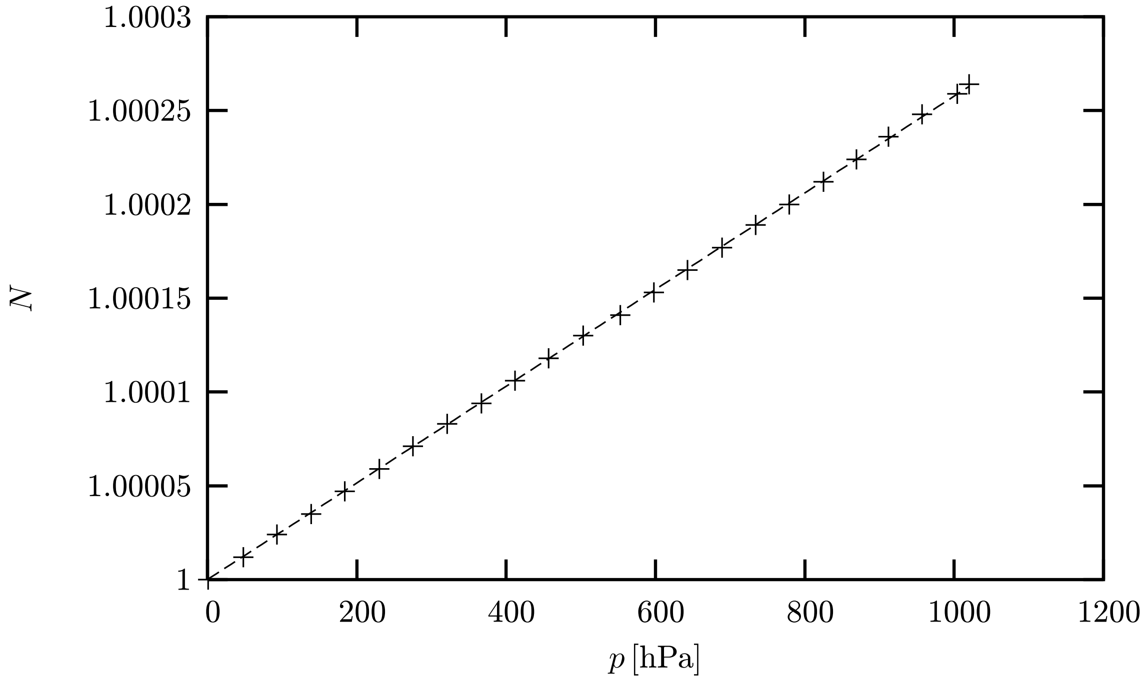
Graf 2.: Závislost indexu lomu na tlaku. Měření č.2



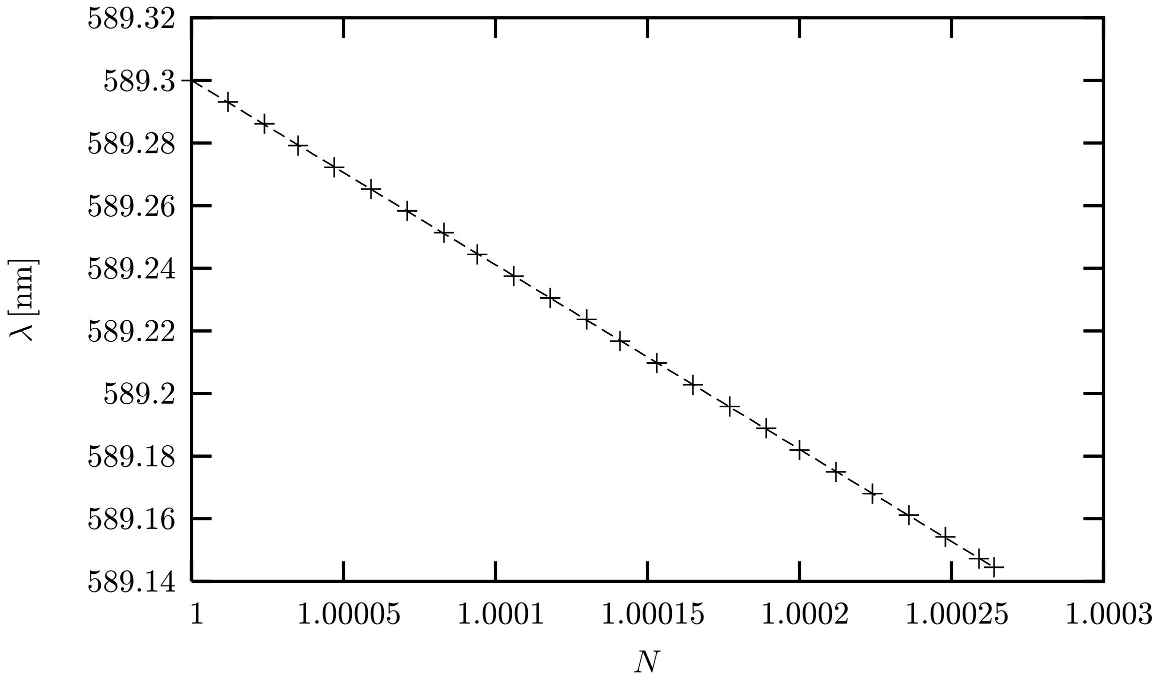
Graf 3.: Závislost indexu lomu na tlaku. Měření č.3



Graf 4.: Závislost indexu lomu na tlaku. Měření č.4



Graf 5.: Závislost indexu lomu na tlaku. Měření č.5



Graf 6.: Závislost vlnové délky na indexu lomu