

FYZIKÁLNÍ PRAKTIKUM

Zpracoval: Jakub Jedlička

Naměřeno: 25. 11. 2022

Obor: učitelství Bi, F **Ročník:** 3. **Semestr:** 3.

Testováno:

Úloha č. 11: **Interference a difrakce světla**

$T = 20,5\text{ }^{\circ}\text{C}$

$p = 990\text{ hPa}$

$\varphi = 40\text{ }\%$

1. Úvod

V první a druhé části úlohy se budeme zabývat určením tloušťky tenké vrstvy a určením indexu lomu vzduchu díky Michelsonova interferometru. A nakonec se budeme zabývat určením hustoty vrypů optické mřížky.

2. Teorie

Index lomu světla

Ve vakuu má světlo rychlost $c = 2,997 \cdot 10^8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, ale pokud se světlo šíří v jiném prostředí, než je vakuum, tak je jeho rychlost snížena na:

$$c = \frac{c_0}{n}$$

[1]

Kde n je index lomu prostředí. Jedná se o jednu z nejdůležitějších vlastností prostředí, která je závislá na hodně faktorech, jako třeba na vlnové délce světla λ (barvě světla), ale stejně tak i na teplotě a tlaku.

Rovinné monochromatické vlny

V rámci elektromagnetického pojetí je světlo elektromagnetická vlna, která je charakterizována elektrickým polem $\vec{E}(\vec{r}, t)$, nazývaným optické pole. Světlo z laseru, lze v našem případě aproximovat na rovinnou monochromatickou vlnu. Pokud se vlna bude šířit podél osy x , tak časovou a prostorovou závislost optického pole lze popsat:

$$E(x, t) = E_0 \cdot \cos(k \cdot x - \omega \cdot t + \phi_0)$$

[2]

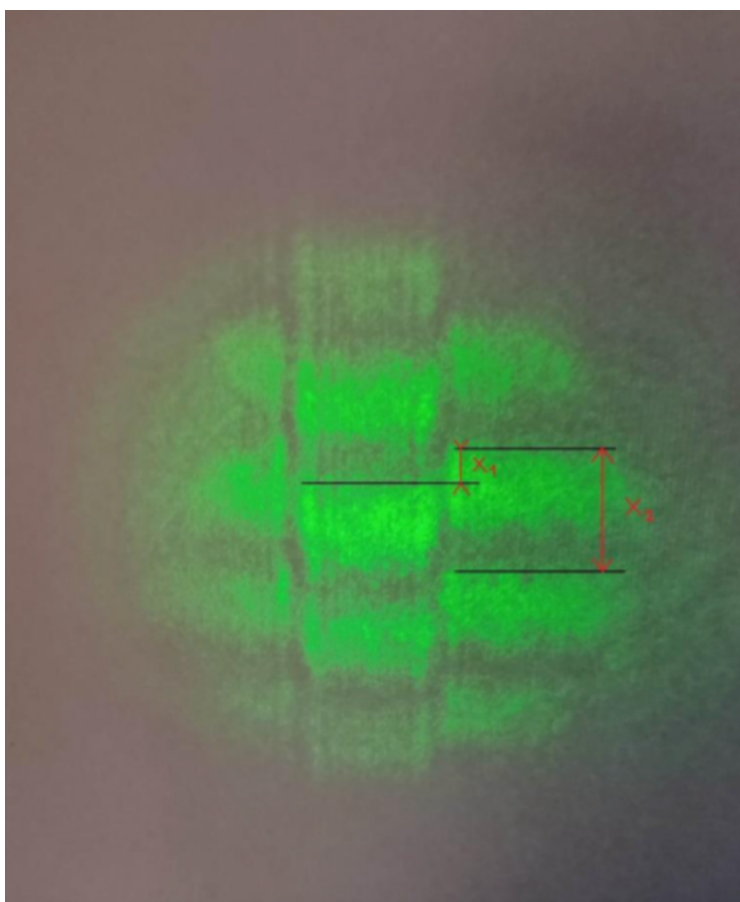
Kde ω je úhlová frekvence, k je úhlové vlnové číslo a ϕ_0 je počáteční fáze.

3. Postup

Určení tloušťky tenké vrstvy za použití Michelsonova interferometru

Vzorek jsem umístil do drážky Michelsonova interferometru (vlnová délka použitého zeleného laseru je $\lambda = 531,2\text{ nm}$). Otáčením šroubu jsem docílil optimalizace polohy obrazu na stínítku. A otáčením dalšího šroubu jsem docílil změny sklonu zrcátka a tím i změně fázového posunu, díky tomu vznikaly nové interferenční obrazce. Nastavíme na stínítku zhruba 5–10 interferenčních proužků. Poté co jsem natočením zrcátka vytvořil nový interferenční obrazec, jsem mobilním telefonem vyfotil stínítko. Tento postup jsem několikrát opakoval a díky tomu jsem získal pro každou ze tří poloh vzorku čtyři fotografie.

Tyto fotky jsem poté analyzoval v programu na počítači, kde jsem získal hodnoty x_1 (vzdálenost dvou interferenčních paprsků) a x_2 (posun interferenčních proužků) v pixelech.



Obrázek 1: Interferenční obrazec vzorku

Určení indexu lomu vzduchu díky za použití Michelsonova interferometru

Při měření indexu lomu vzduchu jsem postupoval tak, že jsem v kyvetě, která měla délku $d = 40 \text{ mm}$, odčerpal kompresorem vzduch. Pak jsem odečetl rozdíl atmosférického tlaku a tlaku v kyvetě Δp a poté čekáme na opětovné vyrovnání tlaků. Než se tlaky vyrovnají, tak počítáme počet proužků, které se posouvají po stínítku. Počet posunutých interferenčních proužků označíme jako N . Jako nejistotu N zvolíme půl proužku, protože při pozorování toto nemusíme dobře odhadnout, a navíc obraz je lehce rozostřen.

Zjištění hustoty vrypů optické mřížky

Do posuvného držáku jsem umístil destičku s nominální hustotou vrypů 300 mm^{-1} a zapnul jsem červený laser o vlnové délce $\lambda = 632,8 \text{ nm}$. Po zapnutí laseru jsem umístil stojan s mřížkou, tak aby na stínítku vznikl difrakční obraz prvního a druhého řádu. Na milimetrovém papíře jsem odečetl jednotlivé vzdálenosti difrakčních maxim od difrakčního maxima prvního řádu, a to vpravo i vlevo od difrakčního maxima prvního řádu. Dále jsem pravítkem změřil vzdálenost stínítka od mřížky s vrypy. Poté jsem nastavil novou polohu mřížky a postup opakoval desetkrát.

4. Zpracování měření

Určení tloušťky tenké vrstvy za použití Michelsonova interferometru

i	1. poloha		2. poloha		3. poloha	
	x1 [px]	x2 [px]	x1 [px]	x2 [px]	x1 [px]	x2 [px]
1	109	26	90	22	95	23
2	99	23	109	28	89	23

3	70	18	119	29	117	29
4	118	29	115	29	90	23

Tabulka 1: Naměřené vzdálenosti a posunu interferenčních proužků

Tloušťku tenké vrstvy počítám spočítám díky vztahu:

$$t = \frac{x_2}{x_1} \cdot \frac{\lambda}{2}$$

[3]

Kde λ je v našem případě 531,2 nm, jak již bylo jednou řečeno.

1. poloha	2. poloha	3. poloha
63,4	64,9	64,3
61,7	68,2	68,6
68,3	64,7	65,8
65,3	67,0	67,9

Tabulka 2: Vypočítané tloušťky tenké vrstvy

Pro měření 1., 2. a 3. polohy vzorku mi vyšly velice podobné hodnoty tloušťky tenké vrstvy. Z toho usuzuji, že mé měření je relativně přesné a tloušťka tenké vrstvy se nějak nemění vzhledem k posuvu vzorku.

Při zpracování dat budu považovat za nejpravděpodobnější hodnotu tloušťky tenké vrstvy aritmetický průměr.

$$\bar{t} = \frac{\sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^3 t_{ij}}{12}$$

[4]

Za nejpravděpodobnější hodnotu aritmetického průměru budu považovat směrodatnou odchylku aritmetického průměru.

$$u(\bar{t}) = \sqrt{\frac{(\sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^3 (d_{ij} - \bar{d})^2)}{12 \cdot (12 - 1)}}$$

[5]

$$t = 65,8(6) \text{ nm}$$

Určení indexu lomu vzduchu za použití Michelsonova interferometru

Index lomu vzduchu určíme z tohoto vztahu:

$$n_{vz} = 1 + \frac{N\lambda p_{vz}}{2d \Delta p}$$

[6]

Kde N je počet proužků, o které se interferenční obrazec na stínítku posune během toho, co se vyrovnává tlak v kyvetě. λ je vlnová délka použitého laseru, p_{vz} je atmosférický tlak vzduchu a Δp je rozdíl tlaků $\Delta p = p_{vz} - p_1$, kde p_1 je tlak v kyvetě při odčerpání vzduchu. Nakonec d označuje délku kyvety.

$$N = 23(0,5)$$

$$p_{vz} = 99000 \text{ Pa}$$

$$d = 0,04 \text{ m}$$

$$\lambda = 531,2 \text{ nm}$$

$$\Delta p = 0,74 \text{ kg.cm}^2 = 72569 \text{ Pa}$$

Za nejistotu budu považovat pouze nejistotu počtu proužků, kterou jsem stanovil, jak jsem již dříve napsal na půl proužku.

Nejistotu pro index lomu tedy stanovím ze zákona přenosu nejistot tímto vztahem:

$$u(n_{vz}) = \sqrt{\left(\frac{\lambda p_{vz}}{2d\Delta p}\right)^2 u(N)^2}$$

[7]

$$n_{vz} = 1,000208(5 \cdot 10^{-6})$$

Určení hustoty vrypů optické mřížky

V první části jsem měřil desetkrát difrakci pro mřížku, která měla od výrobce definováno 300 vrypů na mm. A ve druhé části jsem měřil difrakci pro mřížku, která měla od výrobce definováno 600 vrypů na mm.

x [cm]	y11 [cm]	y12 [cm]	y21 [cm]	y22 [cm]
39,5	7,50	15,90	7,45	15,95
29,5	5,60	11,90	5,60	11,85
20,5	3,90	8,25	3,90	8,20
19,4	3,60	7,80	3,65	7,85
29,0	5,50	11,70	5,50	11,70
31,9	6,00	12,80	5,95	12,75
36,8	7,00	14,90	7,00	14,85
43,6	8,30	17,60	8,25	17,60
37,6	7,10	15,20	7,15	15,25
27,5	5,20	11,10	5,20	11,15

Tabulka 3: Naměřené hodnoty pro mřížku s 300 vrypy na milimetr

x [cm]	y11 [cm]	y12 [cm]	y21 [cm]	y22 [cm]
11,2	4,50	13,10	4,45	13,10
9,7	3,80	11,10	3,80	11,05
8,8	3,50	10,00	3,50	10,05
8,0	3,10	9,00	3,15	8,95
7,0	2,75	7,90	2,75	7,95
6,5	2,50	7,20	2,50	7,20
16,1	6,60	18,30	6,55	18,30
14,8	5,90	16,70	5,95	16,70
13,1	5,20	14,80	5,20	14,80
12,1	4,90	13,70	4,85	13,70

Tabulka 4: Naměřené hodnoty pro mřížku s 600 vrypy na milimetr

Hodnoty y_{11} a y_{12} označují první a druhé difrakční maximum na pravé straně a hodnoty y_{21} a y_{22} jsou hodnoty difrakčních maxim na levé straně. Pro další počítání budeme používat aritmetické průměry prvního a druhého řádu.

x [cm]	y1 [cm]	y2 [cm]
39,5	7,48	15,93

29,5	5,60	11,88
20,5	3,90	8,23
19,4	3,63	7,83
29,0	5,50	11,70
31,9	5,98	12,78
36,8	7,00	14,88
43,6	8,28	17,60
37,6	7,13	15,23
27,5	5,20	11,13

Tabulka 5: Zprůměrované hodnoty poloh difrakčních maxim pro mřížku s 300 vrypy na milimetr

x [cm]	y1 [cm]	y2 [cm]
11,2	4,48	13,10
9,7	3,80	11,08
8,8	3,50	10,03
8,0	3,13	8,98
7,0	2,75	7,93
6,5	2,50	7,20
16,1	6,58	18,30
14,8	5,93	16,70
13,1	5,20	14,80
12,1	4,88	13,70

Tabulka 6: Zprůměrované hodnoty poloh difrakčních maxim pro mřížku s 600 vrypy na milimetr

Pro zjištění vzdálenosti jednotlivých vrypů na mřížce se spočítá pomocí tohoto vztahu:

$$d = \frac{m\lambda\sqrt{y_m^2 + x^2}}{y_m}$$

[8]

Kde λ je vlnová délka použitého laseru, m je přirozené číslo, které odpovídá řádu maxima a y_m je poloha difrakčního maxima m -tého řádu.

d [nm]	d [nm]
3422,93	3464,86
3412,78	3469,25
3405,71	3478,64
3464,63	3463,55
3415,79	3462,87
3456,71	3483,98
3406,16	3457,51
3413,41	3461,31
3418,55	3452,55
3425,52	3455,17

Tabulka 7: Vypočítané hodnoty vzdáleností vrypů pro 300 vrypy na milimetr

d [nm]	d [nm]
--------	--------

1705,5074	1665,0986
1734,8334	1682,3947
1712,2629	1684,0293
1739,1757	1695,3993
1730,6055	1688,6087
1762,7768	1705,0444
1673,7507	1685,6801
1702,6267	1691,0800
1715,1709	1690,1633
1693,3258	1688,5508

Tabulka 8: Vypočítané hodnoty vzdáleností vrypů pro 600 vrypů na milimetr

Pokud tyto výsledky zprůměrujeme a spočítáme statistickou nejistotu tak dostaneme nejpravděpodobnější vzdálenost dvou vrypů na mřížce.

$$d_{300} = 3395(4)$$

$$d_{600} = 1702(5)$$

Pokud udělám převrácenou hodnotu z d a převedu ji na milimetry a nejistotu získám ze zákona přenosu nejistot

$$N_{300} = 295(1)$$

$$N_{600} = 588(2)$$

5. Závěr

Určení tloušťky tenké vrstvy za použití Michelsonova interferometru

Tloušťka tenké hliníkové vrstvy mi vyšla $t = 65,8(6)$ nm. Díky relativně malé nejistotě usuzuji, že mé měření bylo relativně přesné a tuto hodnotu můžeme tudíž považovat reálnou tloušťku tenké vrstvy.

Určení indexu lomu vzduchu za použití Michelsonova interferometru

V této úloze jsme vypočítali index lomu vzduchu, který mi vyšel $n_{vz} = 1,000208(5 \cdot 10^{-6})$. Tabelová hodnota indexu lomu¹ je na této stránce 1,00026. Tato hodnota je vůči mé lehce nadhodnocená, to může být dáno tím, že námi vytvořené vakuum nemuselo být příliš kvalitní, a navíc byl použit nepříliš přesný analogový barometr, který ukazoval spíše orientační hodnoty. Taky kdybych měl měření opakovat, bych nastavil interferenční obrazec tak, aby na něm bylo mnohem více proužků. Tím bych docílil přesnějšího počítání u okraje interferenčního obrazce.

Určení hustoty vrypů optické mřížky

Mnou naměřená hodnota $N_{300} = 295(1)$ pro mřížku s nominální hodnotou 300 vrypů na jeden milimetr, je velice blízká. Proto mohu usoudit, že měření v tomto případě bylo přesné, zatímco měření pro mřížku s 600 vrypů na jeden milimetr mi už tak přesně nevyšla. $N_{600} = 588(2)$ se značně liší, i se započítanou nejistotou, od nominální hodnoty a to je pravděpodobně zapříčiněno sníženou citlivostí zařízení při měření difrakčních maxim, když je mřížka blízko stínítka, proto, kdybych měl měření opakovat, vzal toto na vědomí.

¹ <http://www.converter.cz/tabulky/index-lomu.htm>