

Ústav fyzikální elektroniky PŘF MU

FYZIKÁLNÍ PRAKTIKUM

Fyzikální praktikum 2

Zpracoval: Artem Gorodilov

Naměřeno: 18. prosince 2023

Obor: Astrofyzika

Skupina: Čt 8:00

Testováno:

Úloha č. 11: Interference a difrakce světla

$T = 20.9\text{ }^{\circ}\text{C}$

$p = 986\text{ hPa}$

$\varphi = 42\text{ }\%$

1. Zadání

Určit tloušťku tenké vrstvy pomocí Michelsonova interferometru.

Určit index lomu vzduchu pomocí Michelsonova interferometru.

Určit hustotu vrypů optické mřížky.

2. Teorie

2.1. Tloušťka tenké vrstvy

K určení tloušťky tenké vrstvy použijeme Michelsonův interferometr. Má zelený laser s vlnovou délkou $\lambda = 531,2\text{ nm}$. Tento interferometr promítá interferenční obrazec na stínítku.

Když změníme sklon zrcadla interferometru, změníme fázový posun, čímž se změní interferenční obrazec. Toto měření je vyjádřeno různými hodnotami vzdálenosti dvou interferenčních paprsků x_1 a posunem interferenčních proužků x_2 . Situaci lze vidět na obrázku (1).

Z toho je možné vypočítat tloušťku tenké vrstvy podle vzorce:

$$t = \frac{x_2 \lambda}{x_1 2} \quad (1)$$

2.2. Index lomu vzduchu

Pro měření indexu lomu vzduchu budu vzduch z kyvety se vzorkem odčerpávat pomocí kompresoru. Poté kompresor vypnu a počkám, až se tlak vyrovná. Vzhledem ke změně indexu lomu n v kyvetě se v důsledku rozdílu tlaků Δp změní interferenční obrazec.

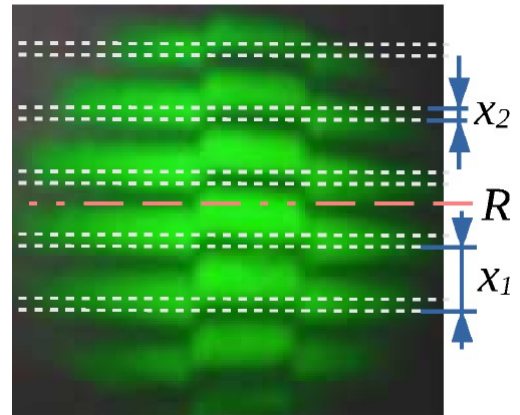


Figure (1) Vzdálenost dvou interferenčních paprsků x_1 a posun interferenčních proužků x_2

Nejprve se interferenční čáry posunou směrem nahoru, jak tlak klesá, a poté se posunou směrem dolů, jakmile se tlak vyrovná s atmosférickým tlakem p_{vz} .

Odtud zjistíme index lomu vzduchu n pomocí vzorce:

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

kde N je počet interferenčních proužků, λ je vlnová délka laseru a d je délka kyvety.

Rozdíl tlaků Δp se bude rovnat:

$$\Delta p = p_{vz} - p_1 \quad (3)$$

kde p_1 je tlak při odčerpávání vzduchu.

2.3. Hustota vrypů optické mřížky

Pro měření hustoty vtisku difrakční mřížky propustíme laser o vlnové délce $\lambda = 632.8\text{ nm}$ (červený).

Na obrazovce se pak zobrazí difrakční obrazec. Situace je vidět na obrázku (2). Při znalosti poloh difrakčních maxim můžeme vzdálenosti jednotlivých vrypů na mřížce d zjistit podle vzorce:

$$d = m\lambda \frac{\sqrt{y_m^2 + x^2}}{y_m}, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

kde m je pořadí difrakčního maxima, y_m je poloha difrakčního maxima a x je vzdálenost do difrakčního obrazce.

Polohy difrakčních maxim y_m jsou dány vztahem:

$$y_m = \frac{y'_m + y''_m}{2} \quad (5)$$

kde y'_m je poloha difrakčního maxima nalevo od středu difrakčního obrazce a y''_m je poloha difrakčního maxima napravo od středu difrakčního obrazce.

Pak hustotu vrypů optické mřížky N můžeme zjistit podle vzorce:

$$N = \frac{1}{d} \quad (6)$$

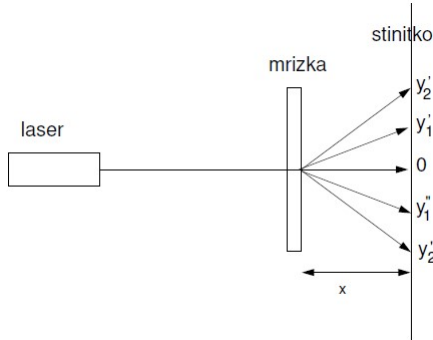


Figure (2) Schéma difrakční mřížky

3. Měření

3.1. Tloušťka tenké vrstvy

Pro měření tloušťky tenké vrstvy jsme změřili hodnoty x_1 a x_2 pro tři různé polohy zrcátka interferometru. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce (1).

| poloha №1 | | poloha №2 | | poloha №3 | |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| $x_{1,1}$ [px] | $x_{1,2}$ [px] | $x_{2,1}$ [px] | $x_{2,2}$ [px] | $x_{3,1}$ [px] | $x_{3,2}$ [px] |
| 103(1) | 25(1) | 105(1) | 26(1) | 110(1) | 28(1) |
| 86(1) | 21(1) | 93(1) | 23(1) | 101(1) | 25(1) |
| 75(1) | 18(1) | 104(1) | 26(1) | 109(1) | 27(1) |
| 102(1) | 25(1) | 75(1) | 19(1) | 86(1) | 21(1) |
| 91(1) | 22(1) | 90(1) | 22(1) | 93(1) | 24(1) |

Poté jsme změřili tloušťku tenké vrstvy pro každý stav systému podle vzorce (1). Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce (2).

| t_1 [nm] | t_2 [nm] | t_3 [nm] |
|------------|------------|------------|
| 65(3) | 66(3) | 68(3) |
| 65(3) | 66(3) | 66(3) |
| 64(4) | 66(3) | 66(3) |
| 65(3) | 67(4) | 65(3) |
| 64(3) | 65(3) | 69(3) |

Table (1) Vypočtené hodnoty tloušťky tenké vrstvy pro tři různé polohy zrcátka interferometru

Odtud získáme hodnotu tloušťky tenké vrstvy t :

$$t = 66(2) \text{ nm}$$

3.2. Index lomu vzduchu

Po měření byly získány následující hodnoty p_{vz} , Δp , d a N :

$$p_{vz} = 98600 \text{ Pa}$$

$$\Delta p = 0.73 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} = 71589 \text{ Pa}$$

$$d = 40 \text{ mm}$$

$$N = 23.0(5)$$

Odtud zjistíme hodnoty indexu lomu světla pro vzduch podle vzorce (2):

$$n_{vz} = 1.000210(5)$$

3.3. Hustota vrypů optické mřížky

Pro měření hustoty vrypů optické mřížky jsme změřili polohy difrakčních maxim y'_1 , y'_2 a y''_1 , y''_2 pro 4 různých stavů soustavy pro mřížku nominální hustotou vrypů 300 mm^{-1} a 600 mm^{-1} resp.

Hodnoty y_1 a y_2 pak byly vypočteny podle vzorce (5) a hodnoty d pro každou z konfigurací systému byly vypočteny podle vzorce (4). Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce (3) a (4).

Table (2) Naměřené hodnoty x_1 a x_2 pro tři různé polohy zrcátka interferometru

| x [cm] | y'_1 [cm] | y''_1 [cm] | y'_2 [cm] | y''_2 [cm] | y_1 [cm] | y_2 [cm] | d_1 [nm] | d_2 [nm] |
|---------|-------------|--------------|-------------|--------------|------------|------------|------------|------------|
| 20.0(5) | 3.70(5) | 3.70(5) | 8.00(5) | 8.00(5) | 3.70(4) | 8.00(4) | 3479(33) | 3408(15) |
| 29.0(5) | 5.50(5) | 5.50(5) | 11.70(5) | 11.70(5) | 5.50(4) | 11.70(4) | 3396(22) | 3383(10) |
| 32.0(5) | 6.10(5) | 6.05(5) | 12.90(5) | 12.95(5) | 6.075(35) | 12.925(35) | 3393(20) | 3379(9) |
| 37.5(5) | 7.05(5) | 7.05(5) | 15.05(5) | 15.05(5) | 7.05(4) | 15.05(4) | 3425(17) | 3398(8) |

Table (3) Naměřené hodnoty y'_1 , y''_1 a y'_2 , y''_2 , y_1 , y_2 a d_1 , d_2 pro 4 různé vzdaleni do difrakčního obrazce pro mřížku s hustotou vrypů 300 mm^{-1}

| x [cm] | y'_1 [cm] | y''_1 [cm] | y'_2 [cm] | y''_2 [cm] | y_1 [cm] | y_2 [cm] | d_1 [nm] | d_2 [nm] |
|--------|-------------|--------------|-------------|--------------|------------|------------|------------|------------|
| 6.0(5) | 2.30(5) | 2.30(5) | 7.10(5) | 7.10(5) | 2.30(4) | 7.10(4) | 1768(27) | 1657(7) |
| 7.0(5) | 2.75(5) | 2.75(5) | 9.00(5) | 9.00(5) | 2.75(4) | 9.00(4) | 1731(22) | 1603(5) |
| 8.0(5) | 3.50(5) | 3.50(5) | 10.00(5) | 10.00(5) | 3.50(4) | 10.00(4) | 1579(16) | 1621(5) |
| 9.5(5) | 3.75(5) | 3.75(5) | 11.05(5) | 11.05(5) | 3.75(4) | 11.05(4) | 1723(16) | 1669(4) |

Table (4) Naměřené hodnoty y'_1 , y''_1 a y'_2 , y''_2 , y_1 , y_2 a d_1 , d_2 pro 4 různé vzdaleni do difrakčního obrazce pro mřížku s hustotou vrypů 600 mm^{-1}

Odtud získáme hodnoty d_{300} a d_{600} :

$$d_{300} = (3408 \pm 20) \text{ nm}$$

$$d_{600} = (1669 \pm 40) \text{ nm}$$

Odtud získáme hodnotu hustoty vrypů optické mřížky N_{300} a N_{600} :

$$N_{300} = (294 \pm 2) \text{ mm}^{-1}$$

$$N_{600} = (599 \pm 10) \text{ mm}^{-1}$$

K výpočtu veličin a jejich nejistot byla použita knihovna Uncertainties pro Python: pypi.org/project/uncertainties. Kód je přiložen k protokolu.

4. Závěr

4.1. Tloušťka tenké vrstvy

Po měření byla získána hodnota tloušťky tenké vrstvy $t = 66(2) \text{ nm}$.

4.2. Index lomu vzduchu

Po měření byla získána hodnota indexu lomu vzduchu $n_{vz} = 1.000210(5)$, což odpovídá nominální hodnotě $n_{vz} = 1.000273$ resp.

4.3. Hustota vrypů optické mřížky

Po měření byly získány hodnoty $N_{300} = (294 \pm 2) \text{ mm}^{-1}$ a $N_{600} = (599 \pm 10) \text{ mm}^{-1}$, což odpovídá nominálním hodnotám $N_{300} = 300 \text{ mm}^{-1}$ a $N_{600} = 600 \text{ mm}^{-1}$ resp.

K výpočtu chyb byl použit následující kód:

```
#Importing the libraries

import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import pandas as pd
from scipy import stats
from scipy.optimize import curve_fit
from uncertainties import import *
from uncertainties.umath import *
from uncertainties.umath import *

#Reading data

thick= pd.read_excel('data/thick.xlsx')
disp_300 = pd.read_excel('data/disp_300.xlsx')
disp_600 = pd.read_excel('data/disp_600.xlsx')

# Constants and values

lambda_1 = 531.2 #nm
lambda_2 = 632.8 #nm

d = 0.04 #m
N = ufloat(23, 0.5) #number of fringes
p_vz = 98600 #Pa
delta_p = 0.73 #kg/cm^2

# Calculation of the thickness

x_1_1 = []
x_1_2 = []
x_2_1 = []
x_2_2 = []
x_3_1 = []
x_3_2 = []

for ii,ID in enumerate(thick['x_1_1']):
    x_1_1.append(ufloat(thick['x_1_1'][ii], 1))
    x_1_2.append(ufloat(thick['x_1_2'][ii], 1))
    x_2_1.append(ufloat(thick['x_2_1'][ii], 1))
    x_2_2.append(ufloat(thick['x_2_2'][ii], 1))
    x_3_1.append(ufloat(thick['x_3_1'][ii], 1))
    x_3_2.append(ufloat(thick['x_3_2'][ii], 1))

thick['x_1_1'] = x_1_1
thick['x_1_2'] = x_1_2
thick['x_2_1'] = x_2_1
thick['x_2_2'] = x_2_2
thick['x_3_1'] = x_3_1
thick['x_3_2'] = x_3_2

thick['t_1'] = (thick['x_1_2'] / thick['x_1_1']) * (lambda_1 / 2)
thick['t_2'] = (thick['x_2_2'] / thick['x_2_1']) * (lambda_1 / 2)
thick['t_3'] = (thick['x_3_2'] / thick['x_3_1']) * (lambda_1 / 2)

t_1_mean = ufloat(np.mean(thick['t_1'].apply(lambda x: x.nominal_value)), np.sqrt(np.std(thick['t_1'].apply(lambda x: x.nominal_value))**2 + np.mean(thick['t_1'].apply(lambda x: x.std_dev)**2)))
t_2_mean = ufloat(np.mean(thick['t_2'].apply(lambda x: x.nominal_value)), np.sqrt(np.std(thick['t_2'].apply(lambda x: x.nominal_value))**2 + np.mean(thick['t_2'].apply(lambda x: x.std_dev)**2)))
t_3_mean = ufloat(np.mean(thick['t_3'].apply(lambda x: x.nominal_value)), np.sqrt(np.std(thick['t_3'].apply(lambda x: x.nominal_value))**2 + np.mean(thick['t_3'].apply(lambda x: x.std_dev)**2)))

t_mean = (t_1_mean + t_2_mean + t_3_mean) / 3

print('t_=', t_mean)

print(thick)

# Calculation of the refractive index

delta_p = delta_p * 98066.5 #Pa

print('delta_p_=', delta_p)

n = 1 + (N*(lambda_1*10**(-9))*p_vz) / (2*d*delta_p)

print('n_=', n)

# Calculation of the dencity

disp_300_x = []
disp_300_y11 = []
disp_300_y12 = []
disp_300_y21 = []
disp_300_y22 = []

for ii,ID in enumerate(disp_300['x']):
    disp_300_x.append(ufloat(disp_300['x'][ii], 0.05))
    disp_300_y11.append(ufloat(disp_300['y11'][ii], 0.05))
    disp_300_y12.append(ufloat(disp_300['y12'][ii], 0.05))
    disp_300_y21.append(ufloat(disp_300['y21'][ii], 0.05))
    disp_300_y22.append(ufloat(disp_300['y22'][ii], 0.05))

disp_300['x'] = disp_300_x
disp_300['y11'] = disp_300_y11
disp_300['y12'] = disp_300_y12
disp_300['y21'] = disp_300_y21
disp_300['y22'] = disp_300_y22

disp_600_x = []
disp_600_y11 = []
disp_600_y12 = []
```

```

disp_600_y21 = []
disp_600_y22 = []

for ii,ID in enumerate(disp_600['x']):
    disp_600_x.append(ufloat(disp_600['x'][ii], 0.05))
    disp_600_y11.append(ufloat(disp_600['y11'][ii], 0.05))
    disp_600_y12.append(ufloat(disp_600['y12'][ii], 0.05))
    disp_600_y21.append(ufloat(disp_600['y21'][ii], 0.05))
    disp_600_y22.append(ufloat(disp_600['y22'][ii], 0.05))

disp_600['x'] = disp_600_x
disp_600['y11'] = disp_600_y11
disp_600['y12'] = disp_600_y12
disp_600['y21'] = disp_600_y21
disp_600['y22'] = disp_600_y22

disp_300['y1'] = (disp_300['y11'] + disp_300['y12']) / 2
disp_300['y2'] = (disp_300['y21'] + disp_300['y22']) / 2

disp_600['y1'] = (disp_600['y11'] + disp_600['y12']) / 2
disp_600['y2'] = (disp_600['y21'] + disp_600['y22']) / 2

disp_300['d.1'] = (1*lambda_2)* (((disp_300['y1']*10**(7))**2 + (disp_300['x']*10**(7))**2)**(1/2))/
    (disp_300['y1']*10**(7))
disp_300['d.2'] = (2*lambda_2)* (((disp_300['y2']*10**(7))**2 + (disp_300['x']*10**(7))**2)**(1/2))/
    (disp_300['y2']*10**(7))

disp_600['d.1'] = (1*lambda_2)* (((disp_600['y1']*10**(7))**2 + (disp_600['x']*10**(7))**2)**(1/2))/
    (disp_600['y1']*10**(7))
disp_600['d.2'] = (2*lambda_2)* (((disp_600['y2']*10**(7))**2 + (disp_600['x']*10**(7))**2)**(1/2))/
    (disp_600['y2']*10**(7))

d_1_300_mean = ufloat(np.mean(disp_300['d.1'].apply(lambda x: x.nominal_value)), np.sqrt(np.std(
    disp_300['d.1'].apply(lambda x: x.nominal_value)**2 + np.mean(disp_300['d.1'].apply(lambda x: x.
    std_dev)**2)))
d_2_300_mean = ufloat(np.mean(disp_300['d.2'].apply(lambda x: x.nominal_value)), np.sqrt(np.std(
    disp_300['d.2'].apply(lambda x: x.nominal_value)**2 + np.mean(disp_300['d.2'].apply(lambda x: x.
    std_dev)**2)))

d_1_600_mean = ufloat(np.mean(disp_600['d.1'].apply(lambda x: x.nominal_value)), np.sqrt(np.std(
    disp_600['d.1'].apply(lambda x: x.nominal_value)**2 + np.mean(disp_600['d.1'].apply(lambda x: x.
    std_dev)**2)))
d_2_600_mean = ufloat(np.mean(disp_600['d.2'].apply(lambda x: x.nominal_value)), np.sqrt(np.std(
    disp_600['d.2'].apply(lambda x: x.nominal_value)**2 + np.mean(disp_600['d.2'].apply(lambda x: x.
    std_dev)**2)))

d_300_mean = (d_1_300_mean + d_2_300_mean) / 2
d_600_mean = (d_1_600_mean + d_2_600_mean) / 2

print('d_300=', d_300_mean)
print('d_600=', d_600_mean.nominal_value, '+-', d_600_mean.std_dev)

N_300 = 1/d_300_mean * 10**(6)
N_600 = 1/d_600_mean * 10**(6)

print('N_300=', N_300)
print('N_600=', N_600)

print(disp_300)
print(disp_600)

```