

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.

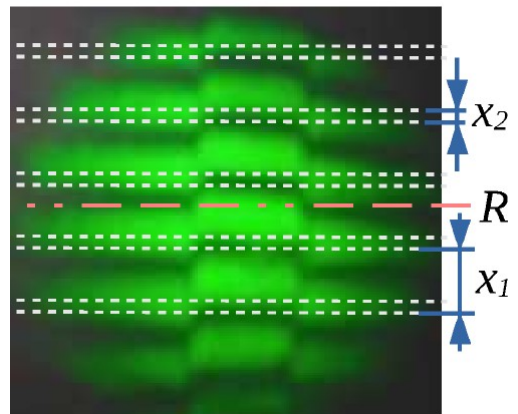
Když změníme sklon zrcadla interferometru, změníme fázový posun, čímž se změní interferenční obrazec. Toto měření je vyjádřeno různými hodnotami vzdálenosti dvou interferenčních paprsků  $x_1$  a posunem interferenčních proužků  $x_2$ . Situaci lze vidět na obrázku (1).

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  $\Delta p$  změní interferenční obrazec.



Obrázek (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,  $\lambda$  je vlnová délka laseru a  $d$  je délka kyvety.

Rozdíl tlaků  $\Delta p$  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.

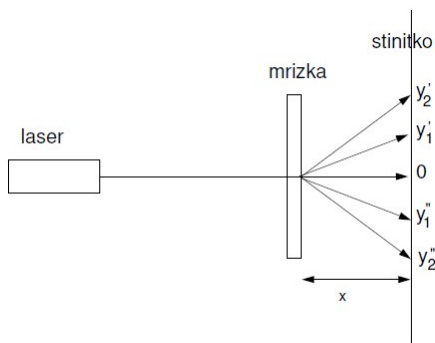
Polohy difrakčních maxim  $y_m$  jsou dány vztahem:

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

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:

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



Obrázek (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).

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)

Tabulka (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  $p_{vz}$ ,  $\Delta p$ ,  $d$  a  $N$ :

$$\begin{aligned} p_{vz} &= 98600 \text{ Pa} \\ \Delta p &= 0.73 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} = 71589 \text{ Pa} \\ d &= 40 \text{ mm} \\ N &= 23.0(5) \end{aligned}$$

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  $y'_1$ ,  $y''_1$  a  $y'_2$ ,  $y''_2$  pro 4 různých stavů soustavy pro mřížku nominální hustotou vrypů  $300 \text{ mm}^{-1}$  a  $600 \text{ mm}^{-1}$  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).

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)

Tabulka (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)

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

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)

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

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](https://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)

```