

FYZIKÁLNÍ PRAKTIKUM

Zpracoval: Jakub Jedlička

Naměřeno: 25. 11. 2022

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

Testováno:

Úloha č. 12: **Spektrometrické metody**

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

$p = 990\text{ hPa}$

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

1. Úvod

V první části se budeme zabývat měření propustnosti skla a filmu a také určením spektrální závislosti indexu lomu. Dále budeme počítat tloušťku vrstvy z měřené propustnosti. A nakonec budeme změříme absorpční koeficient pomocí Lambert – Beerova zákona.

2. Teorie

Měření spektrální propustnosti

Pokud dopadá světelná vlna na rozhraní dvou prostředí, tak část její energie se odrazí a druhá část energie prochází skrz tuto prostředí do prostředí druhého. Při průchodu světelné vlny ve druhém prostředí se část energie může absorbovat. Toto se ovšem děje, pokud není tloušťka druhého prostředí příliš velká, nebo pokud toto prostředí neabsorbuje, poté zbývající část světelné energie po odrazu na druhém rozhraní vystupuje ze zkoumané látky.

Proto se v optice zavádí tři veličiny, které tyto vlastnosti popisují a opticky charakterizují danou látku. Je to odrazivost R , propustnost T a absorpce A .

$$R = \frac{I_r}{I_0} \quad [1]$$

$$T = \frac{I_t}{I_0} \quad [2]$$

S tím že se zákonem zachování energie platí:

$$R + T + A = 1 \quad [3]$$

Lambert-Beerův zákon

Tento zákon platí, pokud prochází monochromatická světelná vlna homogenní vrstvou látky tloušťky d a zanedbáme odrazivost vedoucí k reflexním ztrátám. Tento zákon je pak definován tímto vztahem:

$$T = e^{-\alpha d} \quad [4]$$

Kde α koeficient absorpce světla, který je závislý na vlnové délce, respektive na frekvenci dopadajícího záření.

3. Postup

Měření propustnosti skla a určení spektrální závislosti indexu lomu

Nejdříve jsem musel optimalizovat samotný proces měření spektrometru *Specord*. Proto jsem prvně musel nastavit nominální I_0 pro vlnové délky $\langle 200 \text{ nm}; 1000 \text{ nm} \rangle$, což je náš interval měření. Abych se ujistil, že přístroj měří přesně, tak jsem provedl měření bez přítomnosti vzorku. V takovém případě se zobrazuje závislost propustnosti na vlnové délce, ale jelikož ve spektrometru není žádný vzorek, tak se propustnost pro všechny vlnové délky měla rovnat 100 %. Poté jsem do spektrometru umístil vzorek skla BK7 a spustil měření.

Měření vlastnosti polarizačního filtru

Dále jsem změřil vlastnosti polarizačního filtru, který jsem vyjmul z krabičky s nápisem 573. Budu tedy předpokládat, že se jedná o popis vlnové délky. A tento filtr umístím do spektroskopu a provedu měření.

Určení tloušťky vrstvy z měření propustnosti

V další části budeme měřit tloušťku oxidu titaničitého (TiO_2), který je na substrátu oxidu křemičitého. Proto nejdříve do spektrometru umístím substrát a provedu měření a teprve potom změřím propustnost vzorku C v závislosti na vlnové délce.

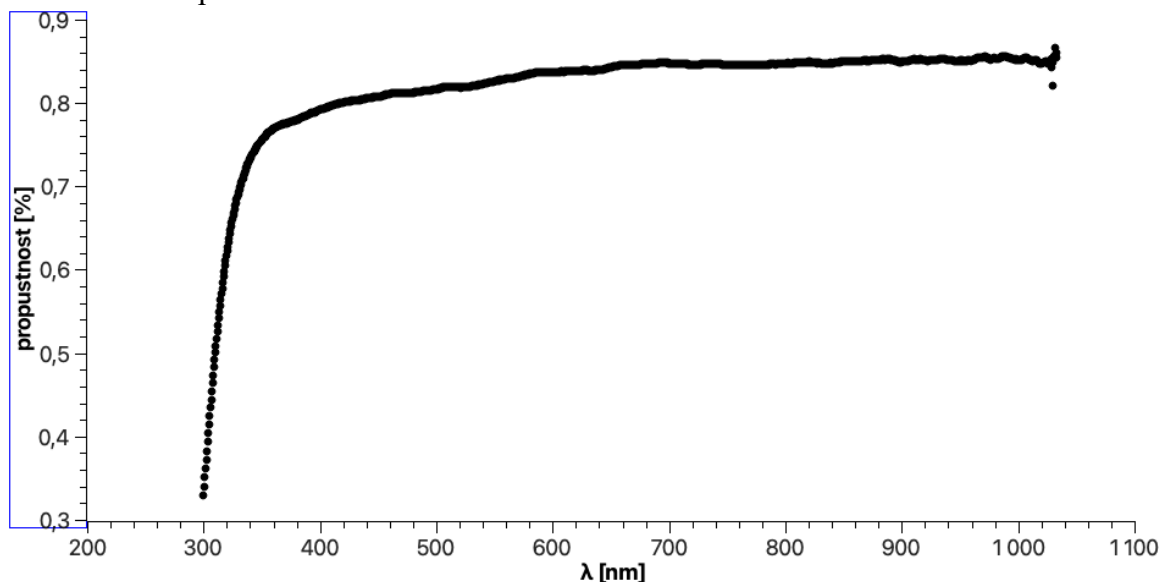
Lambert-Beerův zákon, měření absorpčního koeficientu

K dispozici jsem měl 4 destičky ze stejného materiálu, které jsem si nejdříve musel změřit posuvným měřítkem. Poté jsem je jednu po druhé dával na sebe změřit do spektrometru.

4. Zpracování měření

Měření propustnosti skla a určení spektrální závislosti indexu lomu

Měření pro vzorek BK7.

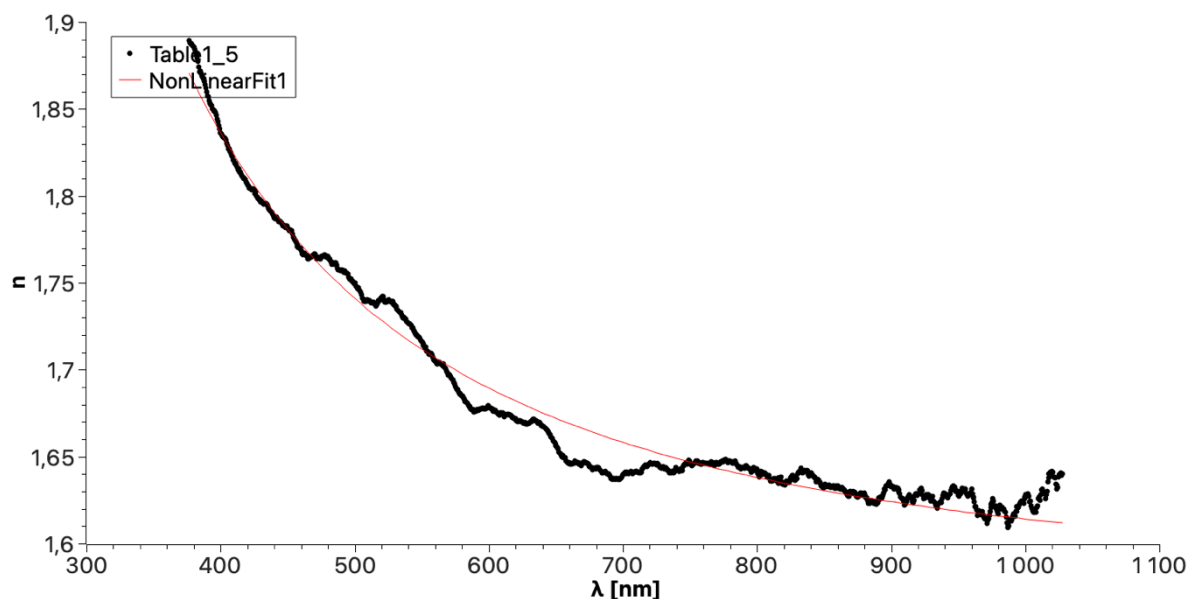


Obrázek 1: Propustnost skla BK7

Propustnost T se dá podle následujícího vzorce přepočítat na index lomu n , který se obecně mění s vlnovou délkou.

$$n = \frac{1 + \sqrt{1 - T}}{T}$$

Dále jsem index lomu proložil Cauchyovým vztahem, který jsem omezil na kvadratický člen rozvoje.



Obrázek 2: Propustnost skla BK7

[10. prosince 2022 21:28:54 CET Plot: "Graph1"]
Non-linear fit of dataset: Table1_5, using function: $a+b/(x^2)$
Y standard errors: Unknown
Scaled Levenberg-Marquardt algorithm with tolerance = 0,0001
From $x = 376,37583$ to $x = 1\,027,512363$
 $a = 1,57185178806017 \pm 0,000577201855500863$
 $b = 42\,303,2014507301 \pm 193,222611066495$

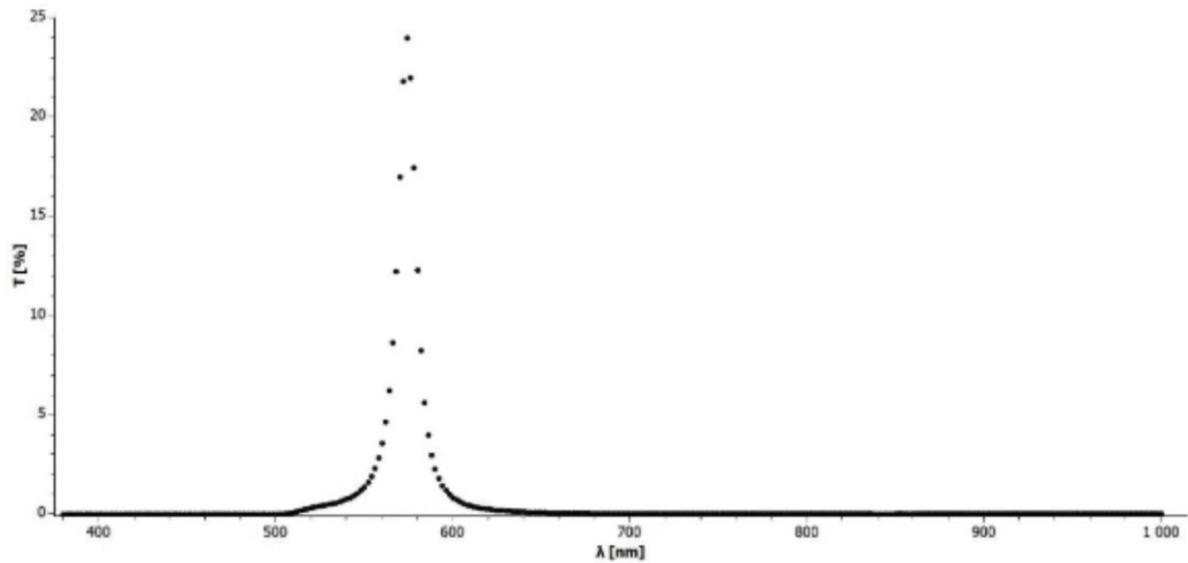
$\chi^2 = 0,118297552596604$
 $R^2 = 0,999963507823621$

Iterations = 2
Status = success

$A = 1,57185(6)$
 $B = 42303(193) \text{ nm}^2$

Měření vlastnosti polarizačního filtru

Filtr s pravděpodobnou hodnotou 573 nm.

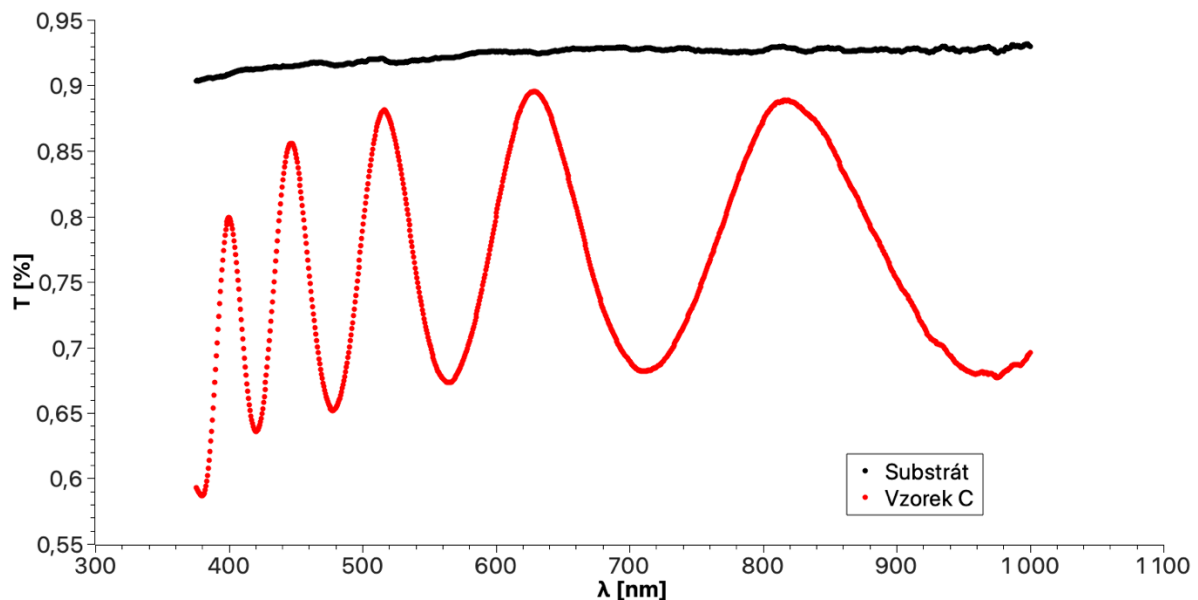


Obrázek 3: Měření filtru 573

Největší propustnost filtru byla u 574 nm. Jelikož jsem při mém měření zvolil krok 2 nm tak toto musím zohlednit při mém měření. Proto výsledek zapíšu jako: $\lambda_{max} = 574(2) \text{ nm}$.

Určení tloušťky vrstvy z měření propustnosti

Substrát SiO₂ se vzorkem C.



Obrázek 4: Propustnost vzorku C se substrátem

Pro zjištění tenké vrstvy oxidu titaničitého (TiO₂) bude potřeba znát index lomu této vrstvy.

$$n_v = \frac{1 + \sqrt{1 - T_{min}}}{T_{min}} \sqrt{n_s}$$

Kde n_s je index lomu substrátu a T_m je propustnost propustnost v lokálním minimu funkce propustnosti v závislosti na vlnové délce.

$$T_{min} = T_m \frac{1 - R_s}{1 + R_s (1 - T_m)}$$

[7]

Kde pro veličiny T_m a R_s platí tyto vztahy:

$$T_m = \frac{T_C}{T_s}$$

[8]

$$R_s = \frac{(n_s - 1)^2}{(n_s + 1)^2}$$

[9]

Kde T_C je propustnost vzorku A, T_s je propustnost substrátu bez vrstvy TiO_2 a n_s je index lomu substrátu.

Tabulka 1: Vlnové délky, indexy lomu vrstvy pro sobě jdoucí lokální minima propustnosti

i	λ [nm]	T_s [%]	T_C [%]	n_s	R_s	T_m [%]	T_{min} [%]	n_v
1	421	91,9	63,25	1,398	0,0275	68,82	66,36	2,25
2	477	91,57	65,15	1,409	0,0288	71,15	68,53	2,20
3	563	92,01	67,19	1,394	0,0271	73,02	70,53	2,13
4	708	92,81	67,99	1,366	0,0240	73,26	71,05	2,10
5	969	92,45	67,48	1,379	0,0254	72,99	70,66	2,12

Tloušťka oxidu titanu se spočítá tímto vztahem:

$$d = \frac{\lambda_i \lambda_{i+1}}{2(n_i \lambda_{i+1} - n_{i+1} \lambda_i)}$$

[10]

Kde λ_i , λ_{i+1} jsou vlnové délky pro 2 po sobě jdoucí minima propustnosti a n_i , n_{i+1} jsou indexy lomu pro dvě po sobě jdoucí minima propustnosti příslušné vlnovým délkám λ_i , λ_{i+1} .

Tabulka 2: tloušťka vrstvy TiO_2

i, i+1	d [nm]
1, 2	673,1
2, 3	610,3
3, 4	610,2
4, 5	640,9

d = 634(30) nm

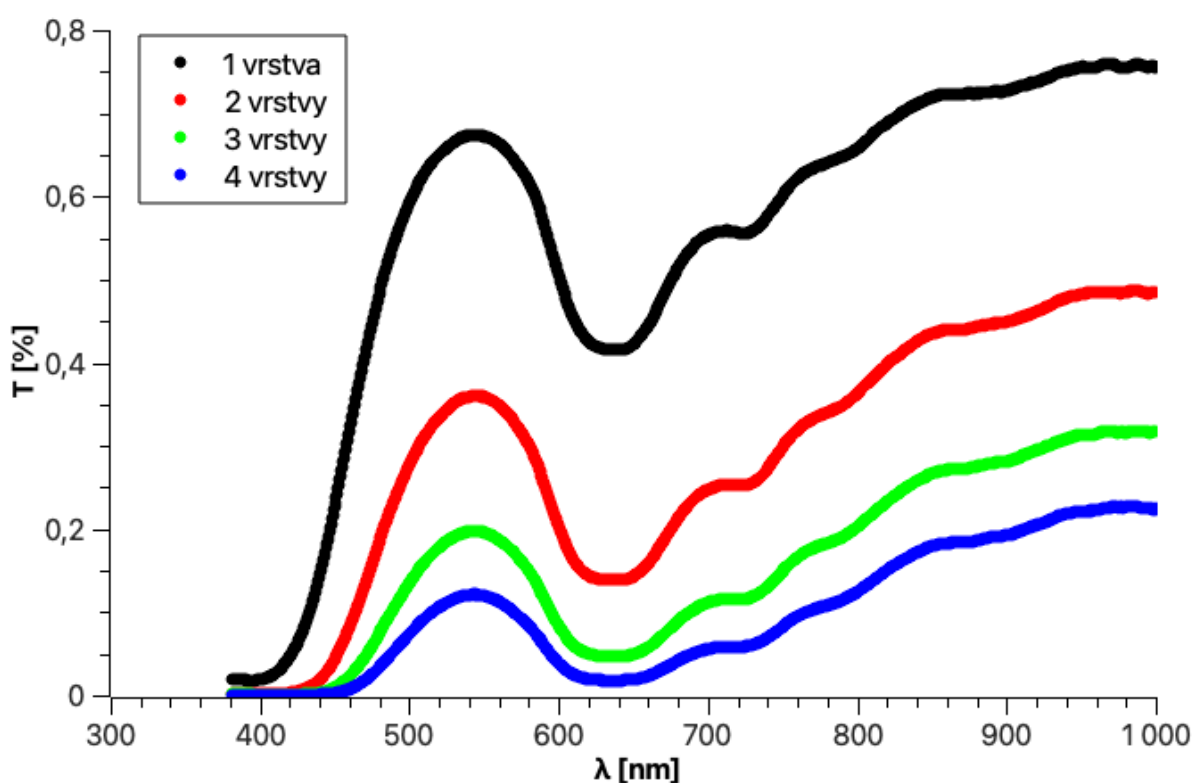
Lambert-Beerův zákon, měření absorpčního koeficientu

i	d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	d ₃ [mm]	d ₄ [mm]
1	3,50	3,45	3,50	3,50
2	3,50	3,50	3,55	3,45
3	3,45	3,55	3,50	3,50
4	3,50	3,55	3,50	3,45

Tabulka 3: Naměřené tloušťky pro 4 destičky

Podle tohoto měření mohu usoudit, že všechny destičky jsou stejného průsvitu.

$$d = 3,50(3) \text{ mm}$$



Obrázek 5: Propustnost destiček

Pokud předpokládáme, že platí Lambert-Beerův zákon, tak platí:

$$\ln(T) = -\alpha d$$

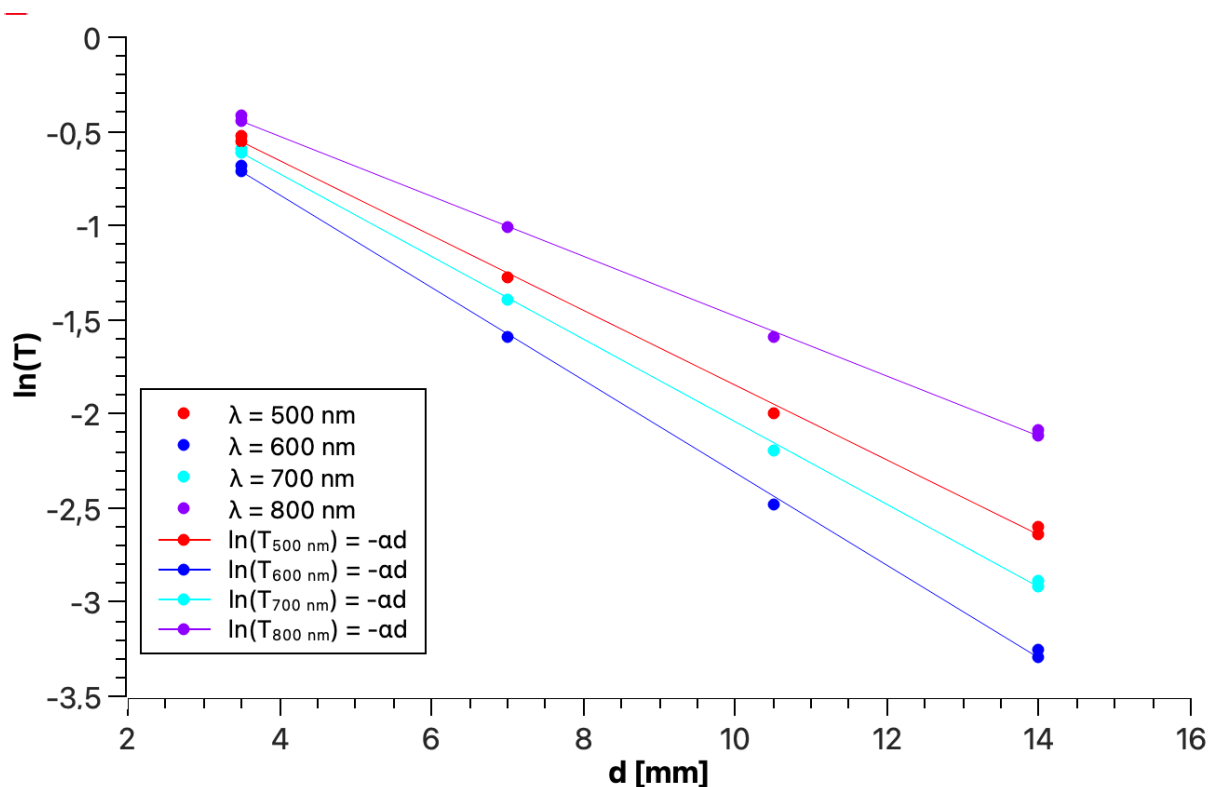
[11]

To znamená, že pro zafixovanost vlnové délky je $-\alpha$ směrnice přímky závislosti přirozeného logaritmu propustnosti na tloušťce vrstvy. Toto ověřím pro vlnové délky 500 nm, 600 nm a 800 nm.

		d [mm]			
		3,5	7,0	10,5	14,0
ln(T)	500 nm	-0,52163	-1,27880	-1,99651	-2,59956
	600 nm	-0,68275	-1,59456	-2,48159	-3,25684

	700 nm	-0,59141	-1,39634	-2,19038	-2,88552
	800 nm	-0,41936	-1,01265	-1,59566	-2,08188

Tabulka 4: Přirozený logaritmus pro různé vlnové délky a tloušťky vrstvy



Obrázek 6: Závislost přirozeného logaritmu na propustnosti na tloušťce vrstvy

500 nm

Iterations = 1

Status = success

[neděle 11. prosince 2022 13:55:25 CET Plot: "Graph1"]

Non-linear fit of dataset: Table1_2, using function: $-a \cdot x$

Y standard errors: Unknown

Scaled Levenberg-Marquardt algorithm with tolerance = 0,0001

From $x = 3,5$ to $x = 14$

$a = 0,185400000005768 \pm 0,0041573769211334$

$\chi^2 = 0,0190553706$

$R^2 = 0,998493788482844$

Iterations = 0

Status = cannot reach the specified tolerance in F

600 nm; 700 nm

[neděle 11. prosince 2022 13:58:10 CET Plot: "Graph1"]
Non-linear fit of dataset: Table1_4, using function: $-a \cdot x$
Y standard errors: Unknown
Scaled Levenberg-Marquardt algorithm with tolerance = 0,0001
From $x = 3,5$ to $x = 14$
 $a = 0,231847619043817 \pm 0,00422929384892773$

$\chi^2 = 0,0197203364666667$
 $R^2 = 0,99900271711474$

Iterations = 1
Status = success

[neděle 11. prosince 2022 13:58:56 CET Plot: "Graph1"]
Non-linear fit of dataset: Table1_6, using function: $-a \cdot x$
Y standard errors: Unknown
Scaled Levenberg-Marquardt algorithm with tolerance = 0,0001
From $x = 3,5$ to $x = 14$
 $a = 0,204736285721859 \pm 0,00415608078406228$

$\chi^2 = 0,01904349063$
 $R^2 = 0,998765295541921$

Iterations = 1
Status = success

800 nm

[neděle 11. prosince 2022 13:59:42 CET Plot: "Graph1"]
Non-linear fit of dataset: Table1_8, using function: $-a \cdot x$
Y standard errors: Unknown
Scaled Levenberg-Marquardt algorithm with tolerance = 0,0001
From $x = 3,5$ to $x = 14$
 $a = 0,148182476178906 \pm 0,00331231541055225$

$\chi^2 = 0,0120960052466667$
 $R^2 = 0,998503280476712$

Iterations = 1
Status = success

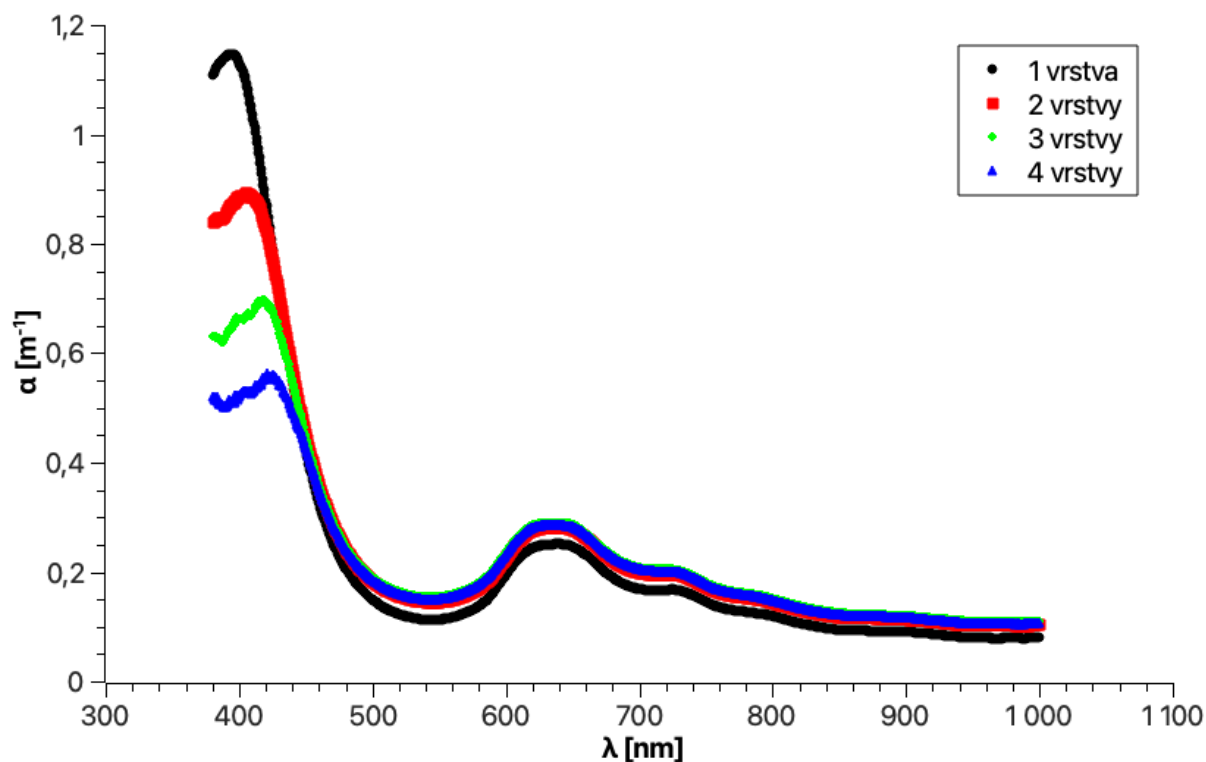
$$\begin{aligned}\alpha(500 \text{ nm}) &= (185 \pm 4) \text{ m}^{-1} \\ \alpha(600 \text{ nm}) &= (232 \pm 4) \text{ m}^{-1} \\ \alpha(700 \text{ nm}) &= (205 \pm 4) \text{ m}^{-1} \\ \alpha(800 \text{ nm}) &= (148 \pm 3) \text{ m}^{-1}\end{aligned}$$

Pro ověření Lambert-Beerova zákona, musím upravit výraz [11] na výraz:

$$\alpha = -\frac{\ln(T)}{d}$$

[12]

Kde jsem získal absorpční koeficient pro všechny vlnové délky. Toto jsem následně vynesl do grafu v závislosti na vlnové délce.



Obrázek 7: Závislost absorpčního koeficientu na vlnové délce

Z tohoto grafu lze vidět, že Lambert-Beerův zákon platí na intervalu $\langle 440;1000 \rangle$ nm, kde se jednotlivé absorpční koeficienty překrývají.

5. Závěr

Měření propustnosti skla a určení spektrální závislosti indexu lomu

Z měření spektrální závislosti propustnosti záření vyplývá, že s tím, jak roste vlnová délka, tak roste i propustnost skla BK7. Pro index lomu zas na druhou stranu platí, že s rostoucí vlnovou délkou se snižuje, a to aproximativně podle Cauchyova vztahu, který je omezen na kvadratický člen rozvoje.

Měření vlastnosti polarizačního filtru

Výsledkem měření propustnosti filtru bylo, že $\lambda_{max} = 574(2)$ nm, tím že nominální hodnota filtru byla $\lambda_{max} = 573$ nm. Nominální hodnota spadá do intervalu měření, proto usuzuji, že mé měření bylo správné.

Určení tloušťky vrstvy z měření propustnosti

Námi vyšlá hodnota tloušťky oxidu titaničitého TiO₂ je $d = 634(30)$ nm.

Lambert-Beerův zákon, měření absorpčního koeficientu

Tímto měřením jsem ověřil platnost Lambert-Beerova zákona, ale také jsem zjistil že platí pouze pro určitý interval vlnových délek. Z mého měření usuzuji, že interval je $\langle 440; 1000 \rangle$ nm.

Maximální propustnost v oblasti viditelného světla nastala pro vlnovou délku 540 nm, přičemž oko vnímá tuto vlnovou délku jako zelenou barvu. Stejnou zelenou barvu měli i destičky.