

9 Měření s polarizovaným světlem

18. dubna 2010

Fyzikální praktikum FJFI ČVUT v Praze	
Jméno: Vojtěch Horný	Datum měření: 12.4.2010
Pracovní skupina: 2	Ročník a kroužek: 2. ročník, pondělí 13:30
Spolupracoval Jaroslav Zeman	Hodnocení:

Abstrakt

Zabývali jsme se problematikou polarizovaného světla. Určili jsme hodnotu Brewsterova úhlu černého skleněného zrcadla na $(58,8 \pm 0,1)^\circ$, potvrdili jsme Malusův zákon, pozorovali optické jevy pro rovnoběžné a sbíhavé polarizované světlo a změřili jsme měrnou otáčivost křemíku pro čtyři spektrální čáry. Veškeré naměřené hodnoty jsou v dobém souladu s teoretickou předpovědí.

1 Úvod

Tato úloha se zabývá vlastnostmi lineárně polarizovaného světla. Polarizace světla má významné uplatnění různých vědeckých disciplínách, například v biologii, geologii a chemii. V technice se polarizace využívá u LCD monitorů, radarů či rozhlasových přijímačů.

1.1 Pomůcky

Optická lavice, otočné černé zrcadlo, polarizační filtr, multimetr, kondenzor, matnice, otočný držák pro dvojlomný vzorek, polarizační mikroskop, čtvrtvlnná destička, způzd'ovací destička 565 nm, křemenný klín, celofánový stupňový klín, vzorky dvojlomných látek, světelný zdroj, červený filtr k mikroskopu, ruční přímohledný spektroskop, přístroj pro měření polarizačního úhlu (Nörnbergův polarizační přístroj), fotočlánek s mikroampérmetrem, kruhový polarimetr, sodíková výbojka, přípravek na stlačování vzorku plexiskla.

1.2 Pracovní úkoly

1. Při polarizaci bílého světla odrazem na černé skleněné desce proměřte závislost stupně polarizace na sklonu desky a určete optimální hodnotu Brewsterova úhlu a znázorněte graficky
2. Černou otočnou desku nahraďte polarizačním filtrem a proměřte závislost intenzity polarizovaného světla na úhlu otočení analyzátoru (Malusův zákon). Výsledek srovnajte s teoretickou předpovědí - vztah 2 - a znázorněte graficky.
3. Na optické lavici osazené podle schématu na obrázku 3 prozkoumejte vliv čtyř celofánových dvojlomných filtrů, způsobujících interferenci. Vyzkoušejte vliv otáčení polarizátoru, analyzátoru a vliv otáčení dvojlomného filtru mezi zkříženými i rovnoběžnými polarizátory v bílém světle. Zjišujte

přímohledným spektroskopem, které vlnové délky z bílého světla interferencí ruší a jaký to má vliv na barvu zorného pole, pozorovanéh pouhým okem. Výsledky pozorování popište

4. Vybrané vzorky (vápenec, křemen, slída, aragonit) krystalů prozkoumejte na polarizačním mikroskopu ve sbíhavém světle bílém a monochromatickém. Výsledky pozorování popište.
5. Na optické lavici sestavte polostínový polarimetr. Ověřte vliv vzájemného pootočení polarizačních filtrů D a L na citlivost měření úhlu natočení analyzátoru. Při optimálně nastavených filtrech D a L změřte měrnou otáčivost křemíku pro 4 spektrální barvy.

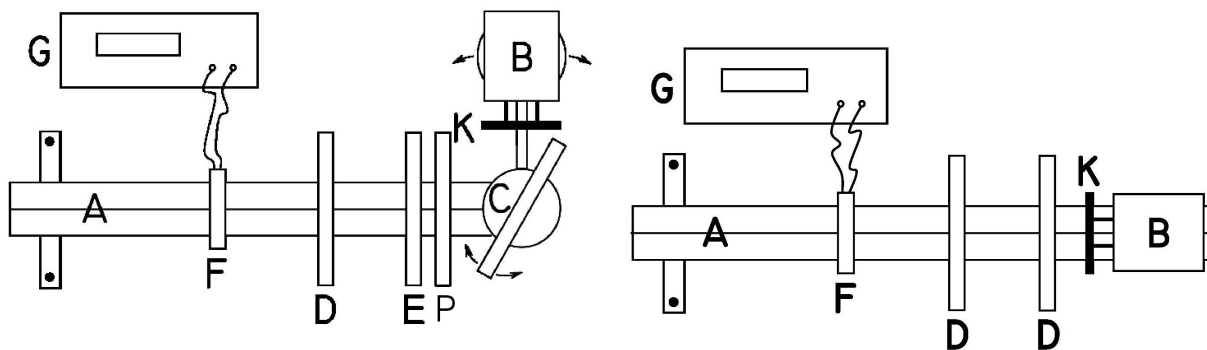
2 Základní pojmy a vztahy

2.1 Fresnelovy rovnice

Dopadá-li světlo šikmo na skleněnou desku, dochází při odrazu k jeho polarizaci, tj. usměrnění kmitání do směru daného kolmicí na směr šíření, spadající do roviny zrcadla. Stupeň této polarizace závisí na úhlu, který svírá dopadající paprsek s rovinou zrcadla. Optimální hodnota tohoto úhlu je dána Brewsterovým zákonem, který říká, že paprsky odražené a lámající se na rozhraní musí být na sebe kolmé. Je-li index lomu pro dané rozhraní n , plyne pro Brewsterův úhel α vztah

$$n = \operatorname{tg} \alpha \quad (1)$$

Brewsterův úhel tedy závisí i na vlnové délce dopadajícího světla. Uspořádání experimentu je na obrázku 1.



Obrázek 1: Měření Brewsterova úhlu. A – optická

lavice, B – světelný zdroj, C – otočné černé zrcadlo, D – polarizační filtr, E – čtvrtvlnná destička, K – matnice, P – matnice, G – multimetr, F – fotočlánek

Obrázek 2: Uspořádání při měření Malusova zákona: A – optická lavice, B – světelný zdroj, K – matnice, D – polarizační filtr, F – fotočlánek

2.2 Malusův zákon

Necháme-li procházet lineárně polarizované světlo optickým prvkem, který je schopen sám polarizovat, zjistíme, že intenzita prošlého světla je závislá na vzájemné úhlové poloze polarizační roviny světelného svazku a polarizátoru, jímž tento svazek prochází. Intenzita prošlého záření I' závisí na úhlu mezi polarizačními rovinami paprsku a polarizátoru φ Malusovým vztahem

$$I(\varphi) = I_0 \cdot \cos^2 \varphi. \quad (2)$$

Uspořádání experimentu je na obrázku 2.

veličina	definice	nastavení aparatury
E_1	$\langle E_x^2 \rangle_\tau$	polarizátor 0°
E_2	$\langle E_y^2 \rangle_\tau$	polarizátor 90°
E_3	$\frac{1}{2} \langle E_x^2 \rangle_\tau + \frac{1}{2} \langle E_y^2 \rangle_\tau + \langle E_x E_y \rangle_\tau$	polarizátor 45°
E_4	$\frac{1}{2} \langle E_x^2 \rangle_\tau + \frac{1}{2} \langle E_y^2 \rangle_\tau + \langle E_x(\omega t - \frac{\pi}{2}) E_y(\omega t) \rangle_\tau$	polarizátor 45° , $\frac{\lambda}{4}$ destička

Tabulka 1: Měřené veličiny pro polarizaci odrazem.

2.3 Stokesovy parametry

Stokesovy parametry slouží k praktickému popisu částečně polarizovaného světla. Označme složky elektrického pole kolmé ke směru šíření jako E_x, E_y . Pak definujeme Stokesovy parametry jako:

$$P_1 = \frac{\langle E_x^2 \rangle_\tau - \langle E_y^2 \rangle_\tau}{\langle E_x^2 \rangle_\tau + \langle E_y^2 \rangle_\tau}, \quad (3)$$

$$P_2 = \frac{\langle 2E_x E_y \rangle_\tau}{\langle E_x^2 \rangle_\tau + \langle E_y^2 \rangle_\tau}, \quad (4)$$

$$P_3 = \frac{\langle 2E_x(\omega t - \frac{\pi}{2}) E_y(\omega t) \rangle_\tau}{\langle E_x^2 \rangle_\tau + \langle E_y^2 \rangle_\tau}. \quad (5)$$

$$(6)$$

Stupněm polarizace je pak velikost vektoru $\vec{P} = (P_1, P_2, P_3)$

$$|\vec{P}| = \sqrt{P_1^2 + P_2^2 + P_3^2}. \quad (7)$$

K určení všech Stokesových parametrů je nutno vypočítat všechny čtyři požadované intenzity. Postupně pro každý úhel měříme čtyři veličiny definované v tabulce 1.

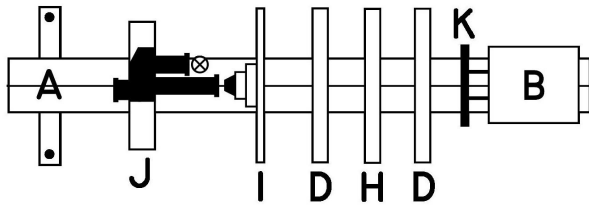
2.4 Interference rovnoběžně polarizovaného světla

Prochází-li lineárně polarizované světlo dvojlomnou destičkou, rozdělí se na dva svazky, šířící se různou rychlostí a vycházející z destičky s určitým dráhovým rozdílem. Procházejí-li tyto dva paprsky polarizátorem, projdou jen jejich složky spadající do jeho polarizační roviny a dojde k interferenci. Dráhový rozdíl obou interferujících paprsků je dán tlouškou destičky a rozdílem indexů lomu destičky pro oba paprsky a je proto závislý na vlnové délce světla. Pro některé vlnové délky dostaneme interferenční maxima, pro jiné minima. Největší světelný kontrast mezi maximem a minimem nastane tehdy, je-li rovina kmitů použitého monochromatického polarizovaného světla rovnoběžná nebo kolmá na rovinu kmitu polarizátoru a přitom směry kmitů paprsku v destičce svírají s těmito směry úhel 45° . Pro bílé světlo dojde k vymizení určité části spektra.

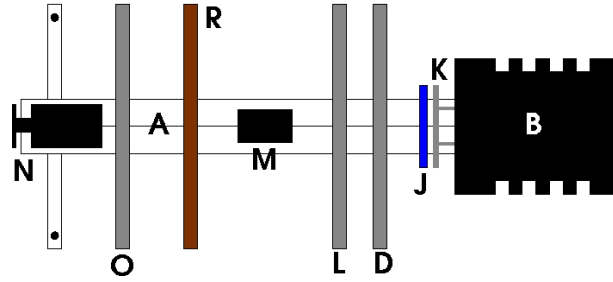
Uspořádání experimentu je na obrázku 3.

2.5 Interference ve sbíhavém světle

Interferenční podmínky jsou potom splněny jen pro určitá místa destičky, takže v zorném poli se objeví systém tmavých a světlých míst. Svírají-li polarizační roviny použitého světla a polarizátoru úhel 90° a je-li dvojlomná destička vyříznuta z jednoosého krystalu kolmo k optické ose, objeví se v zorném poli tmavý kříž (tzv. inkolora), prostoupený systémem soustředných kružnic (tzv. izochromáty). U desky vyříznuté z dvojosého krystalu kolmo k optické ose mají inkolory tvar dvou ramen rovnoramenné hyperboly, jejíž asymptoty souhlasí s rovinami kmitu použitého světla a polarizátoru. Izochromáty mají tvar Cassiniho



Obrázek 3: Měření interference v rovnoběžném polarizovaném světle: A – optická lavice, B – světelný zdroj, D – polarizátor, H – otočný držák, I – irisová clona, J – přímohledný mikroskop, K – matnice



Obrázek 4: Měření optické aktivity – polostínový polarimetr: A – optická lavice, B – světelný zdroj, N – dalekohled, O, D – polarizační filtry, R – zkoumaný vzorek, M – spojka +100, L – pro dvojlomný vzorek, J – přímohledný mikroskop, K – matnice, J – barevný filtr

křivek (brýlí), jejichž středy leží ve vrcholech hyperbolických inkolor a určují polohu optických os. V bílém světle jsou izochromáty barevné. Souhlasí-li polarizační roviny použitého světla a polarizátoru, je celý jev doplňkový, tj. inkolory jsou světlé a izochromáty mají doplňkovou barvu.

2.6 Optická aktivita

Optická aktivita je schopnost chirálních látek stáčet rovinu polarizovaného světla. Látky vyznačující se optickou aktivitou se označují jako opticky aktivní. Mezi opticky aktivní látky patří některé krystaly (např. křemen) a některé kapaliny (různé organické kapaliny, např. roztok třtinového cukru). Závislosti optické otáčivosti na koncentraci opticky aktivní látky je využíváno v analytické chemii při stanovení koncentrace. Míra stáčení polarizace závisí také na vlnové délce světla, čemuž říkáme rotační disperze.

Uspořádání experimentu je na obrázku 4.

3 Experimentální data

3.1 Polarizace odrazem

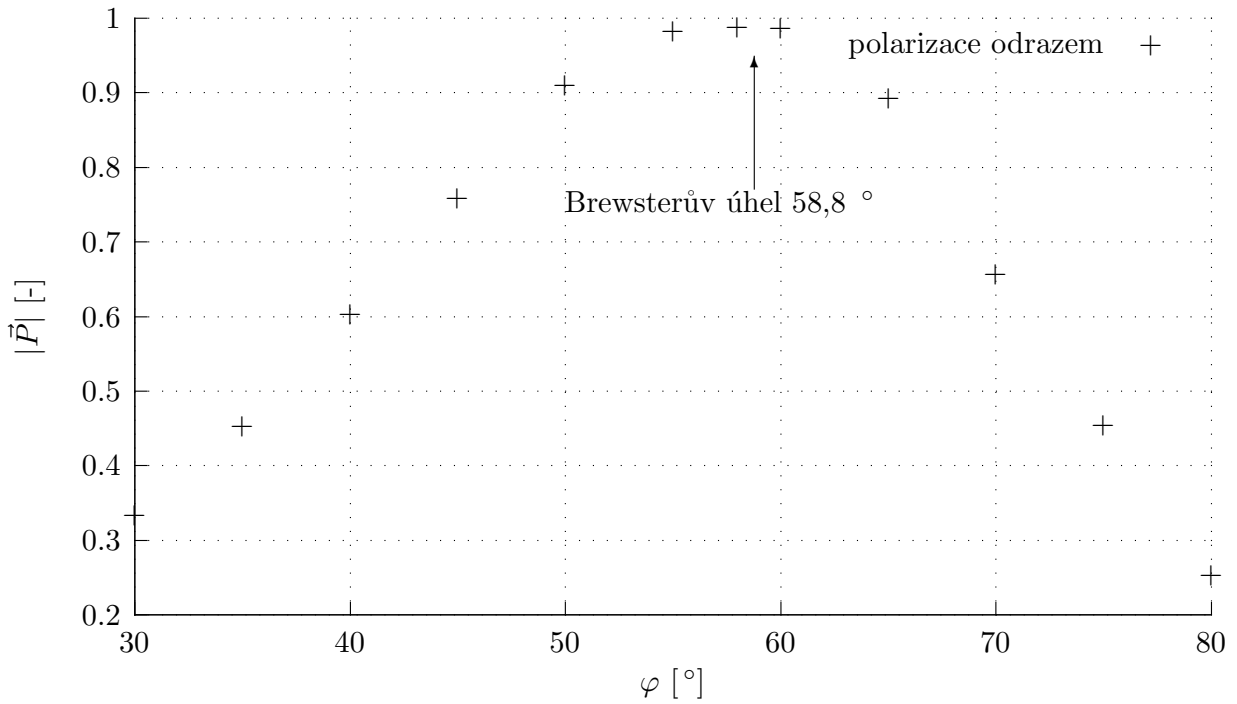
Měřili jsme čtyři intenzity E_i definované v tabulce 1. Z těchto intenzit jsme vypočítali hodnoty $\langle E_x^2 \rangle_\tau$, $\langle E_y^2 \rangle_\tau$, $\langle E_x E_y \rangle_\tau$ a $\langle E_x(\omega t - \frac{\pi}{2}) E_y(\omega t) \rangle_\tau$. Pomocí vztahů 3, 4 a 5 jsme určili Stokesovy parametry. Z nich jsme vztahem 7 vyčíslili stupeň polarizace.

Tabulka 2 ukazuje naměřené hodnoty intenzit, vypočtené hodnoty Stokesových parametrů a samotný stupeň polarizace v závislosti úhlu dopadu paprsku na černé zrcadlo. Samotnou závislost stupně polarizace na úhlu dopadu naleznete v grafu 1.

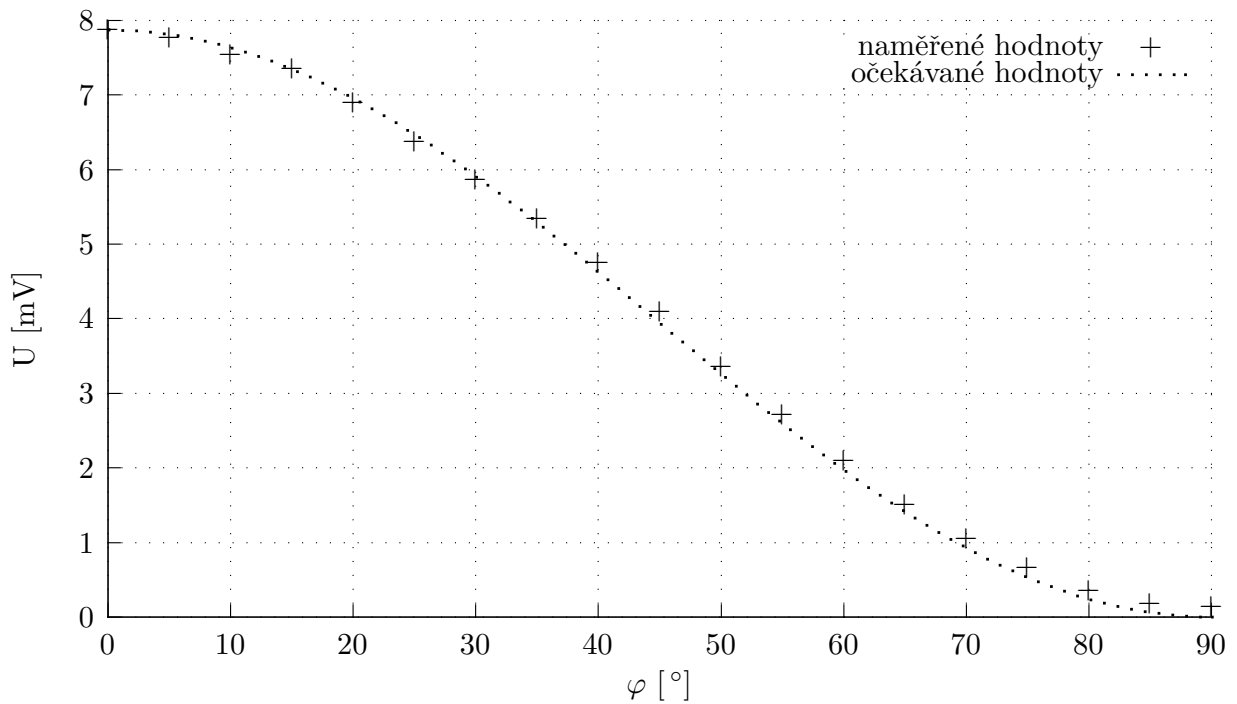
Optimální hodnota Brewsterova úhlu je dle našeho měření $(58,8 \pm 0,1)^\circ$. Můžeme tímto určit index lomu materiálu, z něhož je vyrobeno černé zrcadlo dle vztahu 1. Vychází $n_{sklo} = (1,65 \pm 0,01)$.

3.2 Malusův zákon

Ověřovali jsme Malusův zákon 2. Tabulka 3 ukazuje naměřené hodnoty, graf 2 zobrazuje závislost naměřené intenzity U na úhlu mezi analyzátořem a polarizátorem φ . Vidíme, že se naměřené hodnoty odchylojí od předpovězených minimálně.



Graf 1: Závislost stupně polarizace $|\vec{P}|$ na úhlu dopadu φ .



Graf 2: Závislost naměřeného signálu na úhlu stočení φ . Očekávané hodnoty jsou reprezentovány Malusovým vztahem 2.

φ [°]	E_1 [mV]	E_2 [mV]	E_3 [mV]	E_4 [mV]	P_1 [-]	P_2 [-]	P_3 [-]	$ \vec{P} $
30	3,47	1,91	2,57	2,26	0,290	-0,045	-0,160	0,334
35	3,95	1,58	2,64	2,38	0,429	-0,045	-0,139	0,453
40	4,23	1,11	2,52	2,31	0,584	-0,056	-0,135	0,602
45	5,95	0,86	3,26	2,99	0,747	-0,043	-0,122	0,758
50	6,52	0,36	3,34	2,90	0,895	-0,029	-0,157	0,909
55	7,51	0,12	3,68	3,21	0,969	-0,035	-0,159	0,982
58	12,61	0,15	6,40	5,46	0,976	0,003	-0,144	0,987
60	9,15	0,16	4,49	3,74	0,966	-0,035	-0,197	0,986
65	12,15	0,73	6,45	5,76	0,887	0,002	-0,106	0,893
70	14,87	3,17	8,90	8,15	0,649	-0,013	-0,096	0,656
75	17,55	6,75	12,16	11,03	0,444	0,001	-0,092	0,454
80	21,6	13,25	17,30	16,00	0,240	-0,007	-0,082	0,253

Tabulka 2: Naměřené intezity E_1 , E_2 , E_3 a E_4 , vypočtené Stokelovy parametry P_1 , P_2 , P_3 a stupeň polarizace $|\vec{P}|$ v závislosti na úhlu dopadu φ .

3.3 Interference v rovnoběžném polarizovaném světle

Sestavili jsme optickou aparaturu podle vzoru C a zkoumali jsme vliv čtyř celofánových dvojlomných filtrů, způsobujících interferenci.

Vzorek 1

1. *Analyzátor rovnoběžně s polarizátorem* - když je destička rovnoběžně s podstavou, vidíme celé spektrum. Při otáčení deskou mizí červená barva nad 600 nm a modrá barva pod 490 nm.

Subjektivně okem se barva jeví zelená.

2. *Analyzátor kolmo k polarizátoru* - když je destička rovnoběžně s podstavou, nevidíme nic. Při destičce natočené o 45° vůči podstavě se objeví pás červené se středem na vlnové délce 610 nm a pás od 530 nm do 430 nm.

Subjektivní barevný vjem - růžová.

Vzorek 2

1. *Analyzátor rovnoběžně s polarizátorem* - když je destička rovnoběžně s podstavou, vidíme celé spektrum. Při otáčení deskou mizí části spektra v úsecích (510 - 480) nm, (590 - 610) nm.

Subjektivně okem se barva jeví béžová.

2. *Analyzátor kolmo k polarizátoru* - když je destička rovnoběžně s podstavou, nevidíme nic. Při natočení destičky o 45° vůči podstavě pozorovatelné části spektra v úsecích zelené a modré (530 - 480) nm a červené (590 - 610) nm.

Subjektivní barevný vjem - zelenožlutá.

Vzorek 3

1. *Analyzátor rovnoběžně s polarizátorem* - když je destička rovnoběžně s podstavou, vidíme celé spektrum. Při otáčení deskou mizí části spektra v úsecích červené nad 610 nm a mezi žlutou a zelenou (540 - 515) nm.

φ [°]	U_{exp} [mV]	U_{teor} [mV]	U_{exp}/U_0 [-]	U_{teor}/U_0 [-]	U_{exp}/U_{teor} [-]
0	7,87	7,87	1,00	1,00	1,00
5	7,78	7,81	0,99	0,99	1,00
10	7,55	7,63	0,96	0,97	0,99
15	7,35	7,34	0,93	0,93	1,00
20	6,90	6,95	0,88	0,88	0,99
25	6,38	6,46	0,81	0,82	0,99
30	5,86	5,90	0,74	0,75	0,99
35	5,35	5,28	0,68	0,67	1,01
40	4,75	4,62	0,60	0,59	1,03
45	4,10	3,94	0,52	0,50	1,04
50	3,36	3,25	0,43	0,41	1,03
55	2,72	2,59	0,35	0,33	1,05
60	2,10	1,97	0,27	0,25	1,07
65	1,52	1,41	0,19	0,18	1,08
70	1,05	0,92	0,13	0,12	1,14
75	0,66	0,53	0,08	0,07	1,25
80	0,36	0,24	0,05	0,03	1,52
85	0,18	0,06	0,02	0,01	3,01
90	0,14	0,00	0,02	0,00	$4,74 \cdot 10^{30}$

Tabulka 3: Ověřování Malusova zákona. Naměřené hodnoty napětí U_{exp} , očekávané hodnoty U_{teor} a poměry mezi nimi.

Subjektivně okem se barva jeví žlutá.

2. *Analyzátor kolmo k polarizátoru* - když je destička rovnoběžně s podstavou, nevidíme nic. Při natočení destičky o 45° vůči podstavě pozorovatelné části spektra v úsecích červené kolem 600 nm, zelené od (560 do 500) nm a modré pod 480 nm.

Subjektivní barevný vjem - zelenožlutá.

Vzorek 4

1. *Analyzátor rovnoběžně s polarizátorem* - když je destička rovnoběžně s podstavou, vidíme celé spektrum. Při otáčení deskou mizí části spektra v úsecích mezi červenou a oranžovou okolo 580 nm, v zelené okolo 515 nm a mezi zelenou a modrou okolo 470 nm.

Subjektivně okem se barva jeví nazelenalá.

2. *Analyzátor kolmo k polarizátoru* - pozorováno inverzní spektrum vůči předchozímu.

Subjektivní barevný vjem - žlutá.

Pro všechny čtyři vzorky platí ještě následující dvě pozorování:

- *Vzorek vodorovně s podstavou, otáčení analyzátozem* - Je-li analyzátor na 0° , nevidíme nic, je-li na 90° , vidíme celé spektrum. Při otáčení od 0° k 90° se postupně snižuje rychlost zmenšování intenzity.
- *Vzorek otočen o 45° k podstavě, polarizátor na 0° , pohybujeme analyzátozem* - při pohybu analyzátoru od 0° k 90° pozorován přechod od stavu 1 do stavu 2.

3.4 Interference ve sbíhavém světle

Mikroskopem jsme pozorovali monochromatickým světlem podsvícené vzorky křemene, vápence, aragonitu a dusičnanu draselného. Křemen a vápenec jsou podle našeho pozorování jednoosé krystaly, aragonit a dusičnan draselný dvouosé.

krystal	pozorování
slída	hyperboly
aragonit	hyperboly
křemen	púdorys románské rotundy se čtyřmi apsidami
vápenec	kříž, poškozený vzorek

3.5 Měrná otáčivost křemíku

Měřili jsme měrnou otáčivost křemenné destičky 1 mm tlusté. Monochromatické světlo jsme vytvářeli přiloženými barevnými filtry. Naměřené hodnoty jsou zatíženy vysokou chybou.

barva	λ [nm]	$\Delta\varphi/d$ [$^\circ$ /mm]
modrá	490	28,8
zelená	510	28,2
červená	630	20,9
oranžová	590	18,1
bílé světlo		26,0

Tabulka 4: Měrná otáčivost křemenné destičky pro různé vlnové délky a pro bílé světlo

4 Diskuse

4.1 Polarizace odrazem

Určili jsme Brewsterův úhel s poměrně velkou přesností. Kdybych znal index lomu černého zrcadla, mohl bych porovnat naměřený Brewstrův úhel s vypočteným podle vztahu 1. Dopustili jsme se několika nedostatků. Bohužel se nepodařilo dostatečně odstínit přijímač od jiných světelných zdrojů, jako je například odraz ode zdi. Při příštím měření bych také ztlumil záři notebooku.

4.2 Malusův zákon

Naměřené hodnoty se dobře shodují s teoretickou předpovědí. Malusův vztah byl tedy experimentálně potvrzen.

4.3 Interference v rovnoběžném polarizovaném světle

Pozorované jevy dobře souhlasí s teoretickou předpovědí. Umístíme-li destičku se vzorkem tak, aby s podstavou svírala úhel 45° , pak spektra pozorovaná při vzájemném natočení analyzátoru a polarizátoru 0° a 90° jsou vzájemně inverzní.

4.4 Interference ve sbíhavém polarizovaném světle

Pokusili jsme se odhadnout, které krystaly jsou dvoosé a které jednoosé. Nebyli jsme přitom příliš pečliví. Naše závěry by bylo třeba znovu překontrolovat.

4.5 Měrná otáčivost křemíku

Dle předpokladů při vyšších vlnových délkách je měrná otáčivost křemíku nižší. Měření bylo bohužel zachyceno výraznou chybou určení.

5 Závěr

- Při polarizaci bílého světla odrazem na černé skleněné desce jsme proměřili závislost stupně polarizace na sklonu desky a určili optimální hodnotu Brewsterova úhlu na $(58,8 \pm 0,1)^\circ$. Závislost jsme graficky znázornili do grafu 1.
- Proměřili jsme závislost intenzity polarizovaného světla na úhlu otočení analyzátoru. Závislost je graficky znázorněna na grafu 2. Výsledky jsou v souladu s teoretickou předpovědí.
- Přesvědčili jsme se o vlastnostech rovnoběžného polarizovaného světla. Vyzkoušeli jsme vliv otáčení polarizátoru, analyzátoru a vliv otáčení dvojlomného filtru mezi zkříženými i rovnoběžnými polarizátory v bílém světle. Zjistili jsme přímohledným spektroskopem, které vlnové délky z bílého světla se interferencí ruší a jaký to má vliv na barvu zorného pole, pozorovaného pouhým okem.
- Vybrané vzorky (vápenec, křemen, slída, aragonit) krystalů jsme prozkoumali na polarizačním mikroskopu ve sbíhavém světle bílém a monochromatickém. Určili jsme, že křemen a vápenec jsou podle našeho pozorování jednoosé krystaly, aragonit a dusičnan draselný dvouosé.
- Změřili jsme měrnou otáčivost křemíku pro čtyři spektrální barvy. Potvrdili jsme, že při vyšších vlnových délkách je měrná otáčivost křemíku nižší. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 4.

Reference

- [1] FJFI ČVUT, *Měření s polarizovaným světlem* [online], [cit. 18. dubna 2010], <http://praktika.fjfi.cvut.cz/Polarizace/node3.html>