

Úkoly

1. Z přiložených objektivů vyberte dva, použijte je jako lupy a změřte jejich zvětšení a zorná pole přímou metodou. Odhadněte maximální chyby měření.
2. Změřte zvětšení a zorná pole mikroskopu pro všechny možné kombinace dvou objektivů z předchozího bodu a dvou vybraných okulárů. Naměřené výsledky srovnajte s výsledky získanými v předchozím bodě a rovněž s hodnotami zvětšení udávanými výrobcem. Určete čísla zorného pole okulárů. Odhadněte maximální chyby měření.
3. Diskutujte vztah mezi číselnou aperturou mikroskopu, zorným polem mikroskopu a jeho rozlišovací schopností.
4. Pomocí polarizačního mikroskopu změřte specifickou stáčivost křemene pro vybrané vlnové délky. Určete relativní chybu měření.
5. Užitím čtvrtvlnné destičky rozhodněte, je-li islandský vápenec kladný či záporný krystal.

1 Teoretický úvod

1.1 Mikroskop

Zvětšení optického přístroje je definováno

$$Z = \frac{u'}{u} \quad (1)$$

kde u je úhel pod kterým vidíme předmět v konvenční zrakové vzdálenosti $L = 25$ cm. u' značí úhel pod kterým vidíme předmět v přístroji.

Zorné pole je udáno jako průměr největšího kruhu v předmětové rovině, jenž ještě lze v přístroji zobrazit.

Lupa je spojná čočka, sloužící jako jednoduchý optický přístroj pro zvětšování. Je-li lupa těsně u oka, pak předmět umístěný v předmětové rovině uvidíme dle [1] se zvětšením

$$Z_l' = \frac{L}{f'} + \frac{L \left(1 - \frac{L}{f'}\right)}{L_1} \quad (2)$$

kde L_1 je vzdálenost obrazu od oka a f' je ohnisková vzdálenost lupy. Pro případ, že oko je těsně u lupy akomodováno na nekonečno, je $L_1 \rightarrow \infty$. Pro zvětšení pak platí vztah

$$Z_l = \frac{L}{f'} \quad (3)$$

Mikroskop se sestává ze dvou spojných čoček - z objektivu a z okuláru. Objektiv vytváří skutečný, zvětšený obraz. Tento obraz pozorujeme okulárem, takže opět zvětšený. Celkové zvětšení mikroskopu se spočte jako součin zvětšení objektivu a okuláru. Tedy

$$Z_m = Z_{ob}Z_{ok} = \frac{L\Delta}{f'_{ob}f'_{ok}} \quad (4)$$

kde f'_{ob} je ohnisková délka objektivu, f'_{ok} je ohnisková délka okuláru a Δ je vzdálenost mezi ohniskovými body.

Zorné pole okuláru je charakterizováno číslem zorného pole d_z . Tato veličina je definována jako průměr obrazu clony zorného pole zobrazené všemi ostatními zobrazovacími prvky před ní. Nenachází-li se před ní žádné další zobrazovací prvky, je d_z přímo průměr clony zorného pole. Pro zorné pole mikroskopu ρ_m platí následující vztah

$$d_z = \rho_m Z_{ob} \quad (5)$$

Z vlnových vlastností světla plyne, že existuje určitá minimální vzdálenost, ve které jsme ještě schopni rozlišit dva body. Použijeme-li světlo o vlnové délce λ , tato vzdálenost je

$$\epsilon = 0.61 \frac{\lambda}{N \sin u} \quad (6)$$

kde N je index lomu prostředí před objektivem. Veličinu $A = N \sin u$ nazýváme číselnou aperturou.

1.2 Polarizační mikroskop a krystaly

Polarizační mikroskop je oproti obyčejnému mikroskopu opatřen ještě polarizátorem, který umožní vzorek osvětlovat polarizovaným světlem, a analyzátor, který umožňuje měnit úhel polarizace pozorovaného světla.

Pokud používáme slabé objektivy s malou numerickou aperturou, je zobrazení realizováno pouze paprsky málo odkloněnými od optické osy a můžeme použít aproximace rovnoběžných paprsků (ortoskopické uspořádání).

Naopak konoskopické uspořádání je určeno pro pozorování interferenčních jevů, které nastanou při průchodu sbíhavého svazku polarizovaného světla anizotropním prostředím. Konoskopického uspořádání v praxi dosáhneme zasunutím Bertrandovy čočky do aparatury. Podle studijního textu [1] se měření měrné stáčivosti provádí v ortoskopickém uspořádání. Nejprve se nastaví polarizátor a analyzátor tak, aby byly zkřížené polarizační roviny, tedy máme tmavý obraz. Po vložení vzorku natočíme analyzátor o úhel α tak, abychom znovu dosáhli zkřížení polarizačních rovin. Měrná stáčivost je pro vzorek tloušťky d definována jako

$$\rho = \frac{\alpha}{d} \quad (7)$$

Měříme-li v konoskopickém uspořádání a svazek paprsků prochází dvojlomným materiálem, pozorujeme interferenční obrazce. Objeví se tmavší a světlejší oblasti dvou typů. Tmavé proužky se nazývají inkolory a odpovídají paprskům s polarizačními rovinami ležícími ve zkřížených rovinách polarizátoru a analyzátoru. Celkem tyto proužky vytvoří tmavý kříž. Světlé soustředné kružnice interferenčního obrazce jsou nazývané izochromáty. Jak název napovídá, jejich poloměr závisí na vlnové délce světla.

Vsuneme-li do cesty svazku čtrtvlnovou destičku, interferenční obrazec se změní. Rychlost šíření světla v destičce závisí na směru polarizace. Pokud nastavíme obrazec tak, aby směr, ve kterém se destičkou šíří světlo pomaleji, půlil úhel mezi inkolory, po vložení destičky se roztáhnou izochromáty v kvadrantech obsahujících osu rovnoběžnou s rovinou polarizace pomalejšího paprsku. Tak poznáme, zda jde o kladný, či záporný krystal.

2 Výsledky měření

2.1 Zvětšení objektivů

Vybral jsem si objektivy ob.10 a ob.6. Objektiv jsem umístil na stojánek v konvenční zrakové vzdálenosti 25 cm nad podložku se stupnicí v mm. Do ohniskové vzdálenosti jsem vložil jemnou stupnici s dílkem 0.1 mm. Porovnával jsem vzdálenosti měřené na obou stupnicích. Měříme-li blízko u optické osy, můžeme použít paraxiální aproximaci. Potom pro úhel u platí $u = \frac{d_n}{L}$; $u' = \frac{d_d}{L}$, kde d_d , d_n jsou velikosti předmětu na stupnici dole na podložce, respektive nahoře na jemné stupnici. Vztah (1) nám pak dá jednoduše

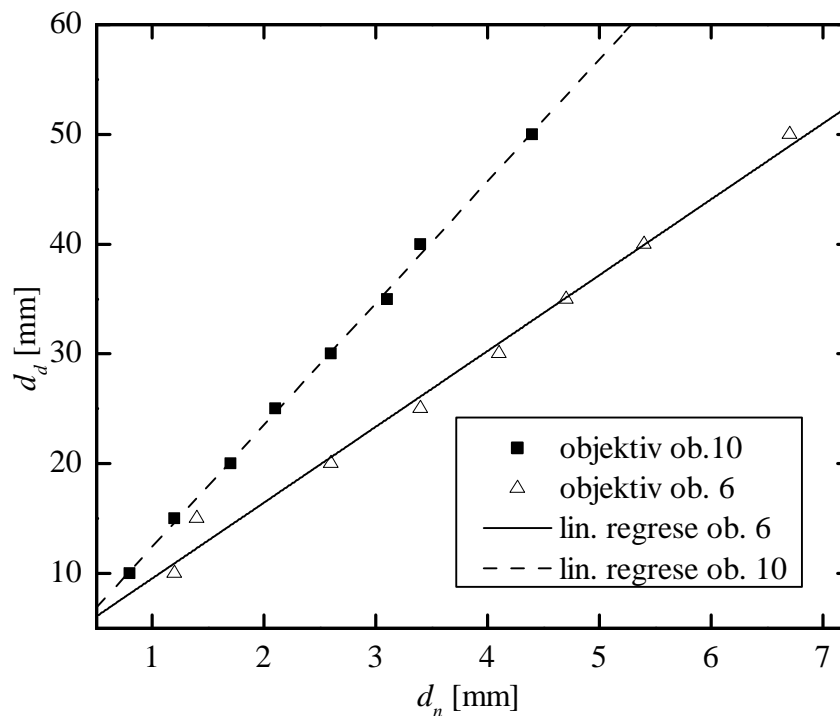
$$Z = \frac{d_d}{d_n}$$

Nejistotu měření d_n uvažuji dva dílky stupnice. Celkovou nejistotu zvětšení Z určuji ze statistické chyby lineární regrese a z nejistoty měřidla. Lineární regresi jsem provedl v programu Origin. Naměřená data jsem zanesl do tabulky 1 a lineární regresi jsem znázornil v grafu na obrázku 1.

tabulka 1: zvětšení ob.10 a ob.6							[mm]	
d_d	10	15	20	25	30	35	40	50
d_n ob.10	0.8	1.2	1.7	2.1	2.6	3.1	3.4	4.4
d_n ob.6	1.2	1.4	2.6	3.4	4.1	4.7	5.4	6.7

Výsledek měření získaný z lineární regrese je pro objektiv ob.10 $Z_{ob.10} = 11 \pm 2$ a pro ob.6 $Z_{ob.6} = 7 \pm 1$, přičemž výrobce udává $Z_{ob.10v} = 10$ a $Z_{ob.6v} = 6$.

Velikost zorného pole jsem naměřil jako $\rho_{ob.10} = (4.9 \pm 0.5)$ mm
a $\rho_{ob.6} = (7.3 \pm 0.5)$ mm.



Obrázek 1: Závislost velikosti předmětu na stupnici dole a nahoře s lineární regresí.

2.1.1 Zvětšení mikroskopu

Zvětšení mikroskopu jsem měřil pro všechny čtyři kombinace objektivů ob.6 a ob.10 a okulárů ok.6 a ok.8. Do mikroskopu jsem místo vzorku umístil opět stejnou jemnou stupnici. Dále jsem vedle mikroskopu umístil velkou stupnici (milimetrový papír). Obraz milimetrového papíru byl zrcátkem a hranolem přenášen před mikroskop tak, abych viděl obě stupnice najednou. Přitom byla vzdálenost mezi mým okem u hranolu a velkou stupnicí 25 cm. Opět používám značení d_n pro jemnou stupnici a d_d pro velkou stupnici. Nejistotu měření na jemné stupnici uvažuji polovinu nejmenšího dílku, tedy 0.5 mm.

Podle vztahu (5) jsem určil čísla zorného pole. Nejistotu jsem určil ze statistické chyby lineární a regrese a nejistoty jednotlivých měření pomocí zákona o přenosu chyb. Naměřená data společně se zornými poli, zvětšení určených analogicky jako

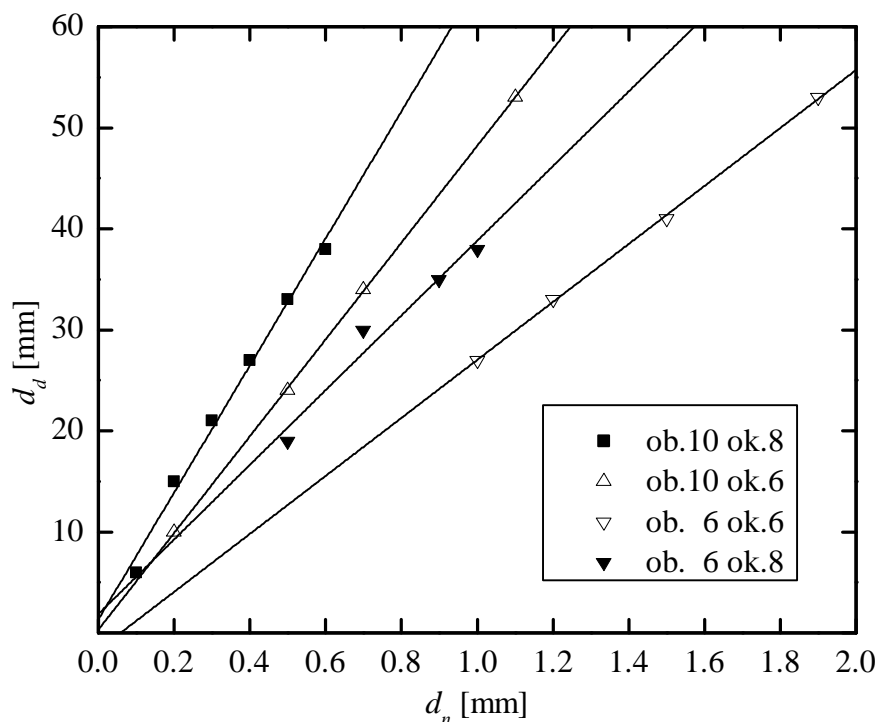
výše a zvětšení udaná výrobcem jsem zaznamenal do tabulky 2. V tabulce 2 jsou tučně vyznačené měření použité pro zjištění zorného pole. Lineární regrese jsou v grafu na obrázku 2.

tabulka 2: zvětšení mikroskopu							[mm]	
ob.10 ok.8		ob.10 ok.6		ob.6 ok.6		ob.6 ok.8		
d_n	d_d	d_n	d_d	d_n	d_d	d_n	d_d	
0.1	6	1.1	53	1.0	27	1.0	38	
0.2	15	0.5	24	1.2	33	0.5	19	
0.3	21	0.2	10	1.5	41	0.7	30	
0.4	27	0.7	34	1.9	53	0.9	35	
0.5	33							
0.6	38							
příslušná zvětšení mikroskopu							[1]	
63 ± 11		48 ± 8		29 ± 5		36 ± 6		
zvětšení udaná výrobcem							[1]	
80		60		36		48		
čísla zorného pole							[mm]	
6.7 ± 1.3		12.2 ± 2.3		13.1 ± 1.9		6.9 ± 1.0		

2.1.2 Stáčivost křemene

Měřil jsem specifickou stáčivost pravotočivého vzorku křemene tloušťky 1 mm pomocí polarizačního mikroskopu Olympus 13x51 vybaveného CCD kamerou. Při výchozí poloze polarizátoru 0° a analyzátoru 0° byly polarizační roviny zkřížené, tedy temný obraz. Bílé světlo jsem filtroval na monocromatické pomocí barevných filtrů. Jako úhel stočení beru vzdálenost hodnot bez vzorku a se vzorkem. Naměřená data a určená měrná stáčivost jsou v tabulce 3. Do grafu na obrázku 3 jsem znázornil závislost specifické stáčivosti křemene na vlnové délce. Nejistotu měření úhlu uvažuji 2°.

tabulka 3: stáčivost křemene						
λ [nm]	α_1 [°]	α_2 [°]	α_3 [°]	průměr [°]	bez vzorku [°]	ρ [(°) · mm ⁻¹]
408	133	130	134	132	180	48 ± 2
483	147	146	147	147	187	40 ± 1
551	157	157	156	157	184	27 ± 1
578	160	158	163	160	184	24 ± 2



Obrázek 2: Závislost velikosti předmětu na stupnici v mikroskopu a ve vzdálenosti 25 cm s lineární regresí.

2.1.3 Islandský vápenec a Bertrandova čočka

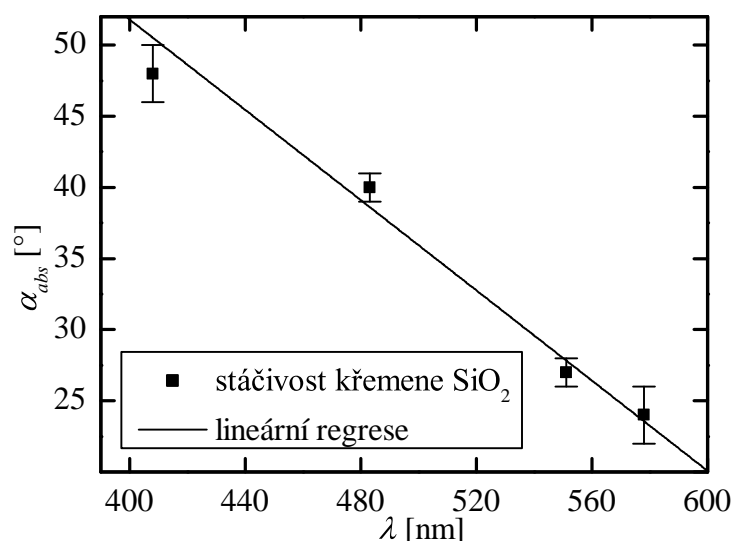
Dle postupu ve studijním textu [1] jsem zjišťoval, zda je islandský vápenec kladný či záporný krystal. Uvedeným postupem jsem zjistil, že krystal je záporný. Přesvědčit se můžete na fotografiích na obrázcích 4 a 5, pořízených CCD kamerou během měření.

3 Diskuze

V prvním úkolu jsem se při měření zvětšení objektu dopustil chyby hlavně kvůli obtížnosti sledování stupnice na podložce jedním okem a druhým okem stupnice pod lupou. Naměřené hodnoty zvětšení jsou větší než hodnoty udané výrobcem, ovšem víceméně na hranici nejistoty měření, která je poměrně vysoká. Z grafu na obrázku 1 vidíme, že hodnoty poměrně dobře sedí na přímku.

Zorné pole jsem určil jako nejdelší vzdálenost na jemné stupnici, jenž bylo možno porozovat v jeden okamžik, zde jsem nejistotu stanovil odhadem na 0.5 mm.

Při určování nejistoty zvětšení mikroskopu jsem započítal i chybu způsobenou



Obrázek 3: Závislost specifické stáčivosti křemene na vlnové délce.

nepřesným nastavením aparatury s konvenční zrakovou vzdáleností. V grafu na obrázku 2 opět vidíme, že hodnoty poměrně dobře sedí na přímku. Měřená zvětšení se ovšem dost liší od hodnot stanovených výrobcem. Zorné pole jsem u mikroskopu určoval stejně jako v předchozím případě. Hodnoty jsou zvýrazněny v tabulce 2. Pro výpočet čísla zorného pole jsem použil naměřené hodnoty zvětšení objektivů.

Při měření stáčivosti jsem určoval úhel pro nejmenší jas. Tento úhel často nešel ani citlivou CCD kamerou určit přesněji než v rozmezí dvou stupňů, odtud uvažovaná chyba. z grafu na obrázku 3 vidíme, že závislost specifické stáčivosti křemene na vlnové délce je lineární.

Zápornost krystalu islandského vápence jsem pravděpodobně určil dobře, nenastala-li nějaká velká systematická chyba. Z fotografií je zřejmý výsledek.

4 Závěr

Naměřil jsem zvětšení dvou objektivů. Pro objektiv ob.10 $Z_{ob.10} = 11 \pm 2$ a pro ob.6 $Z_{ob.6} = 7 \pm 1$, přičemž výrobce udává $Z_{ob.10v} = 10$ a $Z_{ob.6v} = 6$. Stanovil jsem velikost jejich zorného jako $\rho_{ob.10} = (4.9 \pm 0.5)$ mm a $\rho_{ob.6} = (7.3 \pm 0.5)$ mm.

Změřil jsem zvětšení, zorná pole a čísla zorných polí mikroskopu se čtyřmi různými kombinacemi okulárů a objektivů. Výsledky jsem přehledně zaznamenal do tabulky 2.

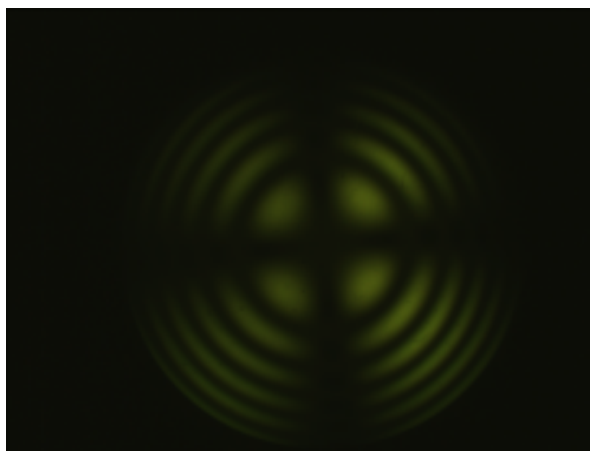
Pomocí polarizačního mikroskopu jsem změřil specifickou stáčivost ρ křemene

pro 4 různé vlnové délky. (hodnoty tab.3, obr.3)

Pomocí polarizačního mikroskopu jsem určil, že islandský vápenec je krystal záporný. (fotografie obr. 5 a 6)

Reference

- [1] I. Pelant a kolektiv - **Fyzikální praktikum III - Optika**, matfyzpress, Praha 2005



Obrázek 4: Islandský vápenec s Bertrandovou čočkou bez čtvrtvlnové destičky.



Obrázek 5: Islandský vápenec s Bertrandovou čočkou se čtvrtvlnovou destičkou.