

1 Pracovní úkoly

1. Z přiložených objektivů vyberte dva, použijte je jako lupy a změřte jejich zvětšení a zorná pole přímou metodou.
2. Změřte zvětšení a zorná pole mikroskopu pro všechny možné kombinace objektivů a okulárů. Naměřené výsledky srovnajte s výsledky získanými v předchozím bodě a rovněž s hodnotami zvětšení udávanými výrobcem. Určete čísla zorného pole okulárů.
3. Diskutujte vztah mezi číselnou aperturou mikroskopu, zorným polem mikroskopu a jeho rozlišovací schopností.
4. U všech měření odhadněte maximální chyby.

Polarizačním mikroskopem studujte vlastnosti dvojlomných látek:

1. Změřte specifickou stáčivost křemene pro vybrané vlnové délky.
2. Určete relativní chybu předchozího měření.
3. Užitím čtvrtvlnné destičky rozhodněte, je-li islandský vápenec kladný či záporný krystal. Totéž rozhodněte pro vzorek křemene.

2 Teoretický úvod

Teorii čerpám z publikace [1].

2.1 Mikroskop

Zvětšení Z u optického přístroje je definováno jako podíl

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

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

Zorné pole je dáno jako maximální průměr kruhu, v předmětové rovině, který je možné v přístroji zobrazit.

Lupa je spojka s relativně malou ohniskovou vzdáleností f' . Pokud umístíme předmět do její předmětové roviny a je-li lupa umístěna těsně před okem, tak je její zvětšení

$$Z = \frac{L}{f'} + 1. \quad (2)$$

Mikroskop se skládá ze dvou spojných čoček - objektivu a okuláru. Objektiv vytváří skutečný Z_b -krát zvětšený obraz, který pozorujeme okulárem jako lupou se zvětšením Z_k . Celkové zvětšení mikroskopu je pak dáno součinem těchto hodnot

$$Z_m = Z_b Z_k = \frac{L \Delta}{f'_b f'_k}, \quad (3)$$

kde f'_b je ohnisková délka objektivu, f'_k je ohnisková délka okuláru a Δ je vzdálenost ohniskových rovin objektivu a okuláru (která je daná konstrukcí mikroskopu a bývá udávána výrobcem).

Číslo zorného pole okuláru d_z je dáno 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. Zorné pole mikroskopu ρ_m je v následujícím vztahu s číslem zorného pole d_z

$$d_z = \rho_m Z_b \quad (4)$$

Rozlišovací schopnost mikroskopu je daná šířkou svazku vymezeného aperturní clonou. Můžeme ji určit ze vztahu

$$R = 0,61 \frac{\lambda}{N \sin u}, \quad (5)$$

kde λ je vlnová délka použitého světla, N je index lomu prostředí před objektivem a u je aperturní úhel daný jako polovina úhlu, který svírají v místě předmětu krajní body od aperturní clony.

2.2 Polarizační mikroskop

Polarizační mikroskop má některé prvky zcela stejné jako normální mikroskop, ale má ještě navíc další části. Zejména je opatřený natáčecím polarizátorem před a analyzátozem za vzorkem, které umožňují zkoumat závislost chování světla procházejícím vzorkem na jeho polarizaci.

Měření měrné stáčivosti se provádí v *ortoskopickém uspořádání*, při němž se používá slabých objektivů s malou numerickou aperturou, aby procházely vzorkem prakticky rovnoběžné svazky. Měrná stáčivost je závislá na vlnové délce použitého světla. Je definovaná vztahem

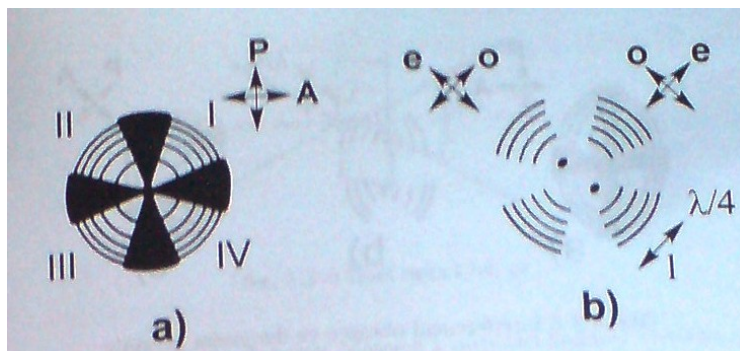
$$\rho = \frac{\alpha_{abs}}{h}, \quad (6)$$

kde α_{abs} je úhel vzájemného pootočení polarizátoru a analyzátoru při největším ztmavení zorného pole vůči poloze při největším ztmavení zorného pole bez vzorku a h je tloušťka vzorku.

V *konoskopickém uspořádání* necháváme dvojlomným materiálem procházet sbíhavý svazek paprsků a následně pozorujeme v mikroskopu charakteristické interferenční obrazce. Protože se dráha světla ve vzorku liší pro různé pozorované paprsky, objevují se v zorném poli světlejší a tmavší oblasti dvou typů.

Proužky splňující podmínku $\varphi = \frac{k\pi}{2}$, kde k je celé číslo a φ úhel v rovině zorného pole, se nazývají *inkolory*. Proužky dané vztahem $\Delta = k\lambda$, kde Δ je dráha světla ve vzorku, se nazývají *isochromáty*. Isochromáty vytvářejí soustředné kružnice s poloměrem závislým na vlnové délce a inkolory tvoří tmavý kříž.

Po vložení čtvrtvlnové destičky za vzorek se pozorovaný obrazec změní. Pokud směr, ve kterém se světlo šíří pomaleji, půlí úhly mezi isochromáty, ve dvou protilehlých kvadrantech se kružnice isochromát posunou od optické osy a v druhých se posunou blíže k ní. Podle toho, ve kterých kvadrantech dojde k posunu směrem ven lze určit, jestli krystal je kladný, nebo záporný (tzn. jestli se v něm šíří rychleji řádný, nebo mimořádný paprsek) - posun pro kladný krystal je schematicky znázorněn na obrázku 1.



Obrázek 1: Schematické znázornění interferenčního obrazce pozorovaného polarizačním mikroskopem a následného posunu isochromát, převzato z [1]

3 Měření

3.1 Lupa

Měření zvětšení a zorného pole lupy bylo provedeno na dvou objektivěch - a to objektivu v mikroskopu zvětšujícím $3x$ (označíme ho 1) a objektivu zvětšujícím v mikroskopu $10x$ (označíme ho jako 2). U obou objektivů byla použita přímá metoda měření spočívající v zaostření na milimetrový papír v konvenční zrakové vzdálenosti a jeho sledování pomocí jednoho oka a druhým okem jsme sledoval rastr rozdělený po 0,1 mm přes objektiv, který byl přímo před okem. Srovnáním jednotlivých měřítek jsem mohl určit přímo zvětšení lupy. Zorné pole jsem mohl určit pomocí toho, kolik dílků jsem mohl na rastru pozorovat. Pro srovnání s udanou hodnotou výrobce je potřeba uvážit, že Meopta dodává mikroskopy se vzdáleností $\Delta = 17$ cm a zvětšení při pozorování v konvenční zrakové vzdálenosti pak bude $n = \frac{L}{\Delta} \approx 1,5$ krát vyšší a navíc + 1 kvůli akomodaci oka.

Vzhledem k mírně komplikované úloze zaostřit oběma očima na konvenční zrakovou vzdálenost a přitom sledovat rastr v lupě a srovnávat ho s druhou stupnicí považuji maximální chybu měření za 20% z naměřené hodnoty.

Při měření 1. objektivu odpovídalo 2,5 mm pozorovaných pomocí objektivu 2 cm pozorovaných samotným okem. Z toho je zvětšení $Z_1 = 8 \pm 2$. Zorné pole jsem určil jako $\rho_1 = (1,4 \pm 0,3)$ cm v předmětové vzdálenosti. Zvětšení podle údaje udaného výrobce je 3, což pro pozorování skrz objektiv jako lupu vychází jako 5,4, což se lídí od naměřené hodnoty v rámci předpokládané maximální chyby měření.

Při měření 2. objektivu odpovídalo 0,5 mm pozorovaných pomocí objektivu 0,7 cm pozorovaných samotným okem. Z toho je zvětšení $Z_2 = 14 \pm 3$. Zorné pole jsem určil jako $\rho_2 = (5 \pm 1)$ mm v předmětové vzdálenosti. Zvětšení podle údaje udaného výrobce je 10, což pro pozorování skrz objektiv jako lupu vychází jako 15,7, což v rámci chyby odpovídá naměřené hodnotě.

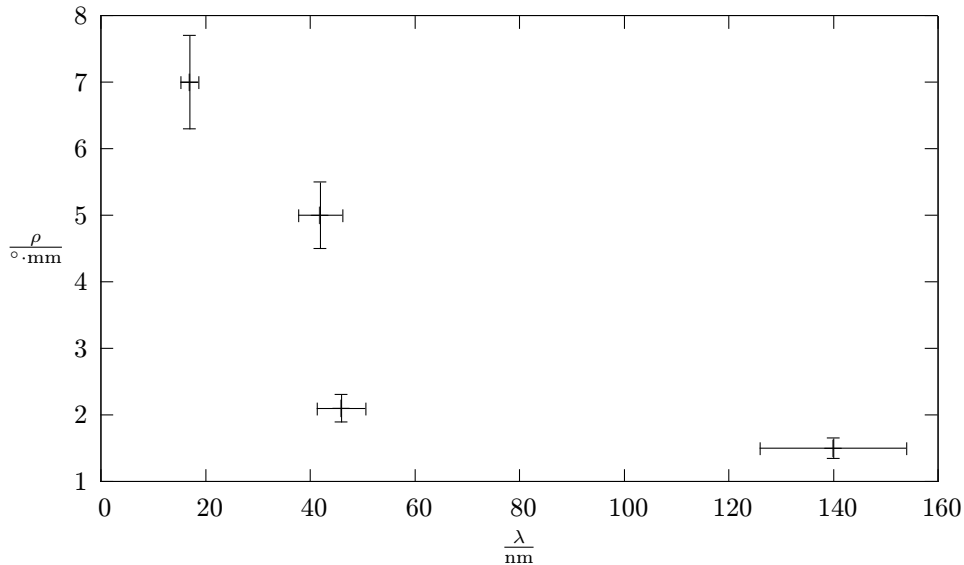
3.2 Mikroskop

Při přímém měření zvětšení mikroskopu byla použita obdobná metoda, jenom stačilo sledovat jedním okem obě dvě stupnice bylo tak jednodušší zaostřovat. Naměřené hodnoty pro všechny kombinace dvou okulárů a dvou objektivů jsou v tabulce č. 1. Jsou zde uvedeny i teoretické hodnoty zvětšení mikroskopu. Graficky znázorněná závislost naměřeného zorného pole na naměřeném zvětšení je v grafu 2.

V rámci maximální chyby měření, kterou jsem určil jako 10%, se hodnoty udané výrobce shodují s naměřenými hodnotami. Pouze u kombinace objektivu 10x a objektivu 6x došlo k vyšší odchylce od hodnoty udané výrobcem než je maximální chyba.

Tabulka 1: Měření zvětšení a zorného pole mikroskopu

okulár	1 (6x)	2 (15x)	2 (15x)	1 (6x)
objektiv	1 (3x)	1 (3x)	2 (10x)	2 (10x)
naměřené zvětšení	1 mm \cong 1,7 cm $Z_{11} = 17 \pm 2$	0,5 mm \cong 2,1 cm $Z_{21} = 42 \pm 4$	0,3 mm \cong 4,2 cm $Z_{22} = 140 \pm 14$	0,5 mm \cong 2,3 cm $Z_{12} = 46 \pm 5$
teor. Z	18	45	150	60
zorné pole	7 mm	5 mm	1,5 mm	2,1 mm



Obrázek 2: Graf závislosti zorného pole na zvětšení mikroskopu

3.3 Polarizační mikroskop

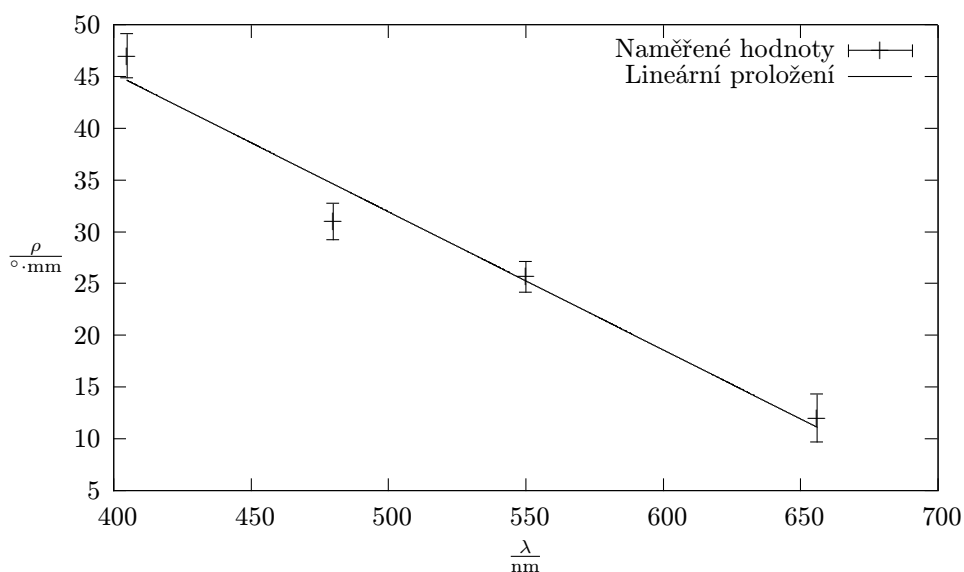
Pro měření měrné stáčivosti byla použita křemennou planparalelní destičku, která měla udanou tloušťku $h = 1 \text{ mm}$ ¹ a optickou osu měla kolmou na řez. Pro možnost změření závislosti měrné stáčivosti na vlnové délce byly použity barevné filtry propouštějící pouze úzkou oblast světelného záření viditelného světla. Pro každý filtr byl třikrát změřen úhel nastavení analyzátoru bez vzorku a posléze třikrát se vzorkem, abych mohl vypočítat chybu mého určení středu oblasti maximálního ztmavení, protože právě určení oblasti, kde dojde k maximálnímu ztmavení je kritická část měření.

Naměřené hodnoty stáčivosti a výsledné hodnoty stáčivosti jsou uvedené v tabulce č. 2.

Tabulka 2: Měření měrné stáčivosti křemene

λ/nm	bez vzorku - $\alpha_0/^\circ$				se vzorkem - $\alpha_0/^\circ$				Měrná s. + stat chyba	
	$\alpha_1/^\circ$	$\alpha_2/^\circ$	$\alpha_3/^\circ$	$\bar{\alpha}/^\circ$	$\alpha_1/^\circ$	$\alpha_2/^\circ$	$\alpha_3/^\circ$	$\bar{\alpha}/^\circ$	$\rho/(^\circ\cdot\text{mm})$	$\sigma_\rho/(^\circ\cdot\text{mm})$
656	46	48	50	48,0	38	34	36	36,0	12,0	2,3
550	52	51	49	50,7	24	25	26	25,0	25,7	1,5
480	53	49	52	51,3	20	20	21	20,3	31,0	1,8
405	73	76	74	74,3	25	29	28	27,3	47,0	2,1

¹Tloušťku vzorku považuji v rámci určení chyby měření za přesnou.



Obrázek 3: Graf závislosti měrné stáčivosti na vlnové délce proložený lineární funkcí (chybové úsečky v ose x nejsou uvedeny, protože by splývaly s naměřenými body)

Pomocí polarizačního mikroskopu a čtvrtvlnné destičky jsem pozoroval islandský vápenec a křemen v konoskopickém uspořádání. Po vložení čtvrtvlnné destičky u křemene se stáhly izochromáty v 1. a 3. kvadrantu a roztáhly ve 2. a 4. kvadrantu - krystal je tedy kladný. Naopak u islandského vápence došlo ke stáhnutí izochromát v 2. a 4. kvadrantu a jedná se tedy o záporný krystal.

4 Diskuse

Přímé měření zvětšení a zorného pole je komplikované kvůli potřebě správně zaostřit. Zejména u měření lupy, kdy se používají obě oči, protože pokud se člověk soustředí na stupnici v lupě, tak má tendenci přestřevovat na jinou vzdálenost než na konvenční zrakovou vzdálenost, na kterou ostří druhým okem. Navíc při určování zorného pole ještě dochází k tomu, že je potřeba pohnout okem, protože oko není tak citlivé, aby se daly snadno dopočítat dílky z jednoho kraje do druhého kraje zorného pole najednou a navíc soustředění se na stupnici v lupě podporuje změnu zaostření. Proto jsem také odhadl **maximální** chybu měření na 20% při měření objektivů jako lup. Určení jedné hodnoty vyplývalo z delšího pozorování a co „nejlepšího“ zaostření. Nemělo valný smysl udávat více hodnot, protože by pak už byly stejné. Zejména u měření s mikroskopem, kde naopak nedocházelo k přestřevování na jinou vzdálenost a oko bylo po celou dobu zaostřené na jednu vzdálenost. Vybíral jsem navíc dílky, které si nejlépe odpovídaly a byly od sebe relativně vzdálené, abych omezil chybu měření.

Chyba měření mohla být vnesena nedodržením přesné konvenční zrakové vzdálenosti - zejména u mikroskopu, kde vzdálenost od podložky přes zrcadlo k hranolu a oku nemusela být odměřena správně a navíc držák moc nedržel. Posunutí o 1 cm by pak vytvořilo systematickou chybu 4%.

Kromě jedné kombinace okuláru a objektivu naměřené hodnoty zvětšení odpovídaly hodnotám udaným výrobcem. U kombinace 6x a 10x lze podle výsledků usuzovat, že mohla nastat hrubá chyba.

Při srovnání naměřeného zvětšení lupy se zvětšením udaným výrobcem bylo třeba započítat, že okulár je dodáván jako součástka do mikroskopu a má definované zvětšení právě pro použití v mikroskopu a bylo potřeba tuto hodnotu přepočítat na zvětšení při pozorování okulárem jako lupou,

kde jsme předpokládali, že máme přesně udané $\Delta = 17$ cm, kterou udal výrobce, ale je možné, že menší chyba plyne z předpokladu, že je tato hodnota přesná. Také je tato vzdálenost důležitá pro správné určení celkového zvětšení mikroskopu, protože pokud je tato vzdálenost jiná, pak zase nemůžeme použít hodnoty popsané na okuláru a objektivu, ale bylo by je potřeba přepočítat.

Nepřesnost měření u měrné stáčivosti mohla být způsobena tím, že nebylo použito monochromatické světlo, ale filtr, který propouští úzký úsek vlnových délek, ale vzhledem k tomu, že se jedná o opravdu relativně úzký úsek, tak chyba vnesená tímto zanedbáním není velká. Daleko vyšší chyba plyne ze samotného určování okamžiku, kdy nastavení analyzátoru odpovídá nejnižšímu jasů, protože i v oblasti \pm několik stupňů kolem hledaného místa je procházející záření vzorkem relativně slabé, zejména u filtru na 656 nm, který je navíc pro pozorování lidským okem nevýhodný i z důvodu, že v této spektrální oblasti je citlivost oka daleko slabší než v oblasti kolem 550 nm, kde je lidské oko nejcitlivější.

Určení křemene a islandského vápence jako kladný resp. záporný krystal bylo pouze kvalitativní a výsledky měření odpovídají běžně udávaným údajům o jejich povaze.

5 Závěr

Změřil jsem dva okuláry jako lupy a určil jejich zvětšení a zorná pole. Změřil jsem u všech kombinací dvou objektivů a dvou okulárů zvětšení mikroskopu a jeho zorné pole.

Změřil jsem měrnou stáčivost polarizovaného světla křemene pro 4 různé vlnové délky a výsledky jsem graficky zpracoval.

6 Literatura

- [1] *I. Pelant a kol.: Fyzikální praktikum III - Optika, 1993*