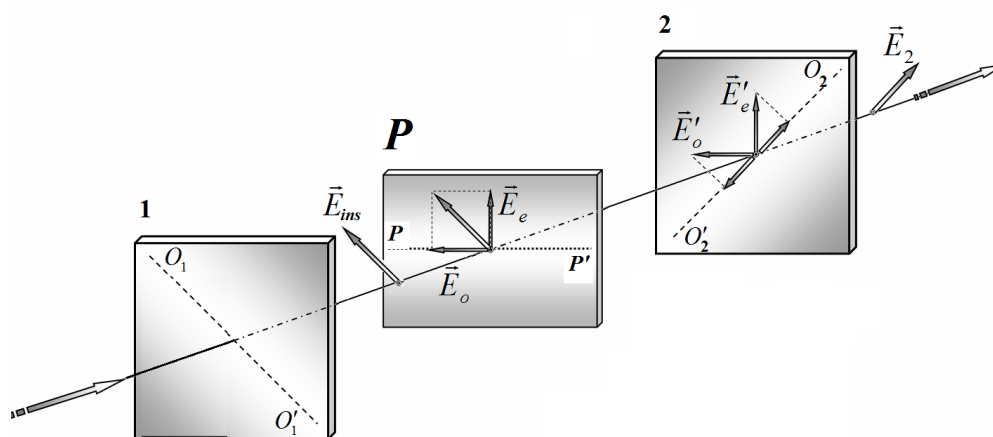


Experiment. Vizte neviditelné! (20 points)

Úvod

No to si užijete! Mnoho materiálů vykazuje optickou anizotropii, jejímž výsledkem je závislost indexu lomu na směru šíření světla a jeho polarizaci. Optická anizotropie se může objevit dokonce i v izotropním prostředí např. působením mechanického napětí, nerovnoměrným zahřátím nebo vlivem vnějšího elektrického pole. Směr, kterým se světlo šíří, aniž by došlo k tzv. dvojlomu, viz níže, se nazývá optická osa krystalu.

Uvažujme obvyklé schéma optického experimentu, ve kterém se studuje optická anizotropie (viz obr. 1), které bude použito v této experimentální úloze.



Obr. 1. Schéma optické soustavy pro studium optické anizotropie.

Nechť paprsek světla dopadne na polarizátor 1. Průnikem polarizační roviny a samotné roviny polarizátoru je přímka $O_1O'_1$. Po průchodu polarizátorem je paprsek světla lineárně polarizovaný a vektor intenzity elektrického pole $\vec{E}_{ins}$ kmitá přesně v polarizační rovině polarizátoru 1. Světelný paprsek poté dopadne na anizotropní destičku P orientovanou tak, že její optická osa PP' svírá s rovinou polarizace $O_1O'_1$ polarizátoru 1 úhel 45° . V destičce P poté vzniknou dva druhy světelného vlnění (paprsků): paprsek řádný $\vec{E}_o$, polarizované kolmo k optické ose destičky P a paprsek mimořádný $\vec{E}_e$, polarizovaný podél optické osy destičky P . Indexy lomu těchto dvou paprsků se liší a jejich rozdíl označme $\Delta n = n_o - n_e$. V důsledku tohoto rozdílu vzniká fázový rozdíl $\Delta\varphi = 2\pi h \Delta n / \lambda$ mezi dvěma paprsky (vlněními) vystupujícími z destičky P (h jsou tloušťka destičky P , λ vlnová délka dopadajícího světla ve vakuu). Polarizace vystupujícího světla se tedy změní na eliptickou. Světlo poté dopadá na polarizátor 2, jehož polarizační rovina $O_2O'_2$ je kolmá na polarizační rovinu polarizátoru 1.

Jednoduše lze ukázat, že intenzita světla, které prošlo destičkou P a polarizátorem 2 je

$$I_2 = k I_0 \sin^2 \frac{\Delta\varphi}{2}, \quad (1)$$

kde I_0 značí intenzitu světla dopadajícího na vrstvu, k značí součinitel průchodu světla destičkou P a polarizátorem 2 a $\Delta\varphi$ označuje fázový rozdíl mezi řádným a mimořádným vlněním po jejich průchodu destičkou P .

V průběhu celé experimentální části neplývejte čas počítáním chyb měření.

Počítejte je tehdy a jen tehdy, chce-li se to po vás explicitně!

Popis pomůcek k experimentu je v Příloze A!

Část 1. Kvalitativní pozorování! (3,8 bodu)

Část 1.1. Polarizátory (0,8 bodu)

1.1	Nalezněte orientaci (t.j. vyberte správnou diagonálu) polarizační roviny polarizátoru 1 a polarizátoru 2. Nakreslete tyto roviny do Listu odpovědí. (0,8 bodu)
-----	--

Část 1.2. Pravítka (1,0 bodu)

V této části experimentu použijte jako zdroj světla světlo svítivou diodu (LED).

Upevněte LEDku na stojan a připojte k ní zdroj napětí. Nastavte oba polarizátory (označené čísla 1 a 2) tak, aby směřovaly jejich lící strany ke zdroji světla. Ujistěte se, že jsou polarizační roviny polarizátoru překříženy, tj. že skrz soustavu obou neprochází světlo. Zakryjte první polarizátor lístkem bílého papíru tak, že ho přiložíte na lící stranu polarizátoru, jak je zobrazeno na bbr. 1B v Příloze B.

Vložte plastové pravítko mezi polarizátory. Pravítkem můžete volně pohybovat.

1.2.1	Nalezněte směry možných optických os procházejících středem pravítka. Načrtněte tyto směry do obrázku v Listu odpovědí. (0,4 bodu)
1.2.2	Určete přibližně vzdálenost mezi místy dopadu světla na pravítko, při které bude fázový rozdíl pro modré světlo roven 2π . Vzdálenost určete pro pravítko 1 (viz příloha A) a pak pro obě pravítka přitisknutá k sobě sebe. (0,6 bodu)

Část 1.3. Pásek (0,8 bodu)

1.3.1	Nalezněte směry možných optických os pásku. Kvalitativně je zakreslete do obrázku v Listu odpovědí. (0,4 bodu)
-------	--

Pomocí kolíčků připevněte dlouhý ohebný plastový pásek ke stínítku tak, aby okraje pásu splývaly s okraji stínítka. Pásek by měl být ohnutý (viz obr. 3B). Umístěte stínítko s páskem mezi polarizátory. Pohybujte stínítkem kolmo na optickou osu soustavy tak, abyste pozorovali změny barvy na pásku. Měřte x -ovou souřadnici pásu, na měřítku odečítejte vždy polohu levého okraje držáku stínítka, jak je zobrazeno na obr. 3B v Příloze B.

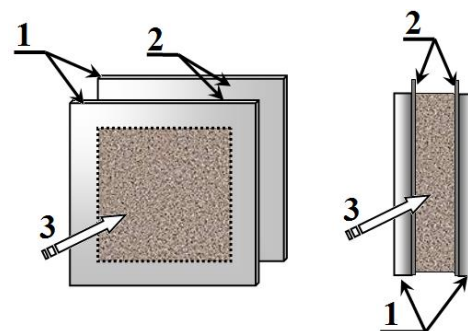
V celé úloze jsou souřadnice měřeny měřítkem na stínítku. Za ukazatele polohy používejte výhradně levý okraj držáku stínítka, který je označen na obr. 3B v příloze B šipkou!

1.3.2	Naměřte souřadnice středů dvou tmavých pásů, levého x_L a pravého x_R , které jsou na pásku viditelné. (0,4 bodu)
-------	---

Část 1.4. Buňka tekutého krystalu (0,9 bodu)

Tekutý krystal (LC) je stav hmoty mezi pevným krystalem a amorfni kapalinou. Orientace jeho molekul může být snadno nasměrována a udržována pomocí elektrického pole. LC buňka vykazuje optickou anizotropii se dvěma základními indexy lomu. Míra tohoto efektu závisí na přivedeném stejnosměrném napětí. Buňka tekutého krystalu sestává ze dvou skleněných destiček 1, jejichž vnitřní povrchy jsou potaženy průhlednou vodivou vrstvičkou 2. Mezi destičkami je tenká (asi 10ti mikrometrová) vrstva roztoku 3, který je ve stavu tekutého krystalu. Vodiče jsou připájeny k destičkám, aby bylo možné je připojit ke zdroji střídavého napětí. Není-li tekutý krystal pod napětím, jsou jeho dlouhé molekuly orientovány rovnoběžně s destičkami. Směr orientace molekul odpovídá optické ose krystalu.

Umístěte buňku tekutého krystalu (LCC) mezi polarizátory. Připojte na ni zdroj elektrického napětí. Měňte napětí na LCC a pozorujte změny barvy světla, které buňkou projde.



1.4.1	Experimentálně nalezněte možné směry optické osy LCC při nulovém a maximálním napětí, které je na LCC přivedeno. Zakreslete tyto směry do obrázku v Listu odpovědí. Osa z míří směrem
-------	---

	nahoru. (0,6 bodu)
1.4.2	Naměřte napětí U_{cr} přivedené na LCC, při kterém dojde k rychlé změně orientace molekul tekutého krystalu o 90° . Zkontrolujte, že máte multimetr přepnut na měření střídavého napětí. (0,3 bodu)

Část 2. Měřte! (16,5 bodu)

Odpojte LEDku od zdroje napětí a odstraňte ji z optické lavice. Odstraňte proužek bílého papíru.

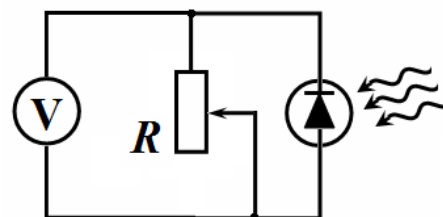
V této části budete používat jako zdroj světla laser. Ujistěte se, že jste ho připojili ke zdroji napětí.

Vložte laser, polarizátor 1, stínítko se štěrbínou a fotodetektor (fotodiodu) do držáků. Nastavte laser tak, aby paprsek mířil skrz polarizátor a šterbinu ve stínítku přímo na fotodiodu. Pro nastavení šířky paprsku použijte šroub 5c. Ujistěte se, že šířka stopy dopadajícího paprsku na fotodetektor je kolem 5-6 mm.

Laser emituje lineárně polarizované světlo. Pomocí kroužku 5a, určeného pro změnu orientace paprsku, laser nastavte tak, aby jeho paprsek téměř celý prošel skrz první polarizátor a hlavní osa elipticky polarizovaného paprsku byla svislá. V následujících měření musí být orientace laseru a fotodetektoru zafixovaná šrouby 5d a 15c. Vložte polarizátor 2. Ujistěte se, že polarizační osy polarizátorů jsou překříženy. Obr. 4B ukazuje celé uspořádání experimentu s upevněným stínítkem.

Část 2.1. Studium fotodiody (3,2 bodu)

Pro měření intenzity světla se používá fotodioda, jejíž elektromotorické napětí je komplikovanou funkcí samotné dopadající intenzity světla. Proto se pro měření intenzity světla používá obvod zobrazený na obr. 2. Stejnoseměrné napětí měřené multimetrem závisí na intenzitě dopadajícího světla a na odporu rezistoru. **Hlavním úkolem je zjistit vhodnou velikost odporu tak, aby napětí na něm bylo rozumně úměrné intenzitě světla dopadajícího na fotodiodu.**



Obr. 2. Obvod pro měření elektromotorického napětí fotodiody.

Pro měření v této části odstraňte druhý polarizátor a stínítko z optické lavice.

Dva filtry, které tlumí intenzitu paprsku je třeba připevnit pomocí kuliček na zadní stranu polarizátoru, jak je zobrazeno na Obr. 5B.

Maximální hodnota měřeného napětí musí být alespoň 300 mV.

Multimetrem můžete měřit odpor rezistoru a také úbytek napětí na něm (samozřejmě musíte nastavit správný rozsah a správně nastavit měřenou veličinu). Připojte na vhodné místo v obvodu vypínač tak, abyste mohli měřit jedním multimetrem po sobě odpor i napětí, t.j. aniž byste museli obvod jakkoliv přepojovat. Pouze přepínáte vypínač a přenastavujete měřenou veličinu na multimetru.

2.1.1	Nakreslete obvod s vypínačem pro současné měření napětí na rezistoru a jeho odporu. (0,2 bodu)
2.1.2	Změřte napětí na rezistoru jako funkci jeho odporu pro dvě hodnoty intenzity dopadajícího světla: maximum (kde počet filtrů $n = 0$) a minimum (kde počet filtrů $n = 5$). Sestrojte oba grafy do jednoho obrázku. Zřetelně označte oblast odporů, ve které je rozdíl mezi oběma napětími maximální. (1,0 bodu)
2.1.3	Měřte napětí U na rezistoru jako funkci počtu filtrů $n = 0,1,2,3,4,5$, které utlumují intenzitu dopadajícího světla na fotodiodu. Měření musí být provedena pro tři pevně zvolené hodnoty odporu, které jsou přibližně rovny $R = 30 \text{ k}\Omega$, $R = 20 \text{ k}\Omega$ a $R = 10 \text{ k}\Omega$. Narýsujte do jednoho grafu příslušné závislosti. Zvolte měřítko tak, aby bylo možné ověřit, zda napětí na rezistoru závisí na intenzitě na fotodiodu dopadajícího světla lineárně. Vyberte ze tří výše uvedených hodnot odporů jednu nejvhodnější hodnotu R_{opt} , kterou dále budete používat pro měření intenzity světla. (1,0 bodu)
2.1.4	Z naměřených dat spočtete součinitel propustnosti filtru $\gamma = I_{tr}/I_{inc}$ a určete chybu měření. I_{tr} značí intenzitu prošlého světla a I_{inc} intenzitu dopadajícího světla. Pokud je to potřeba, můžete

provést dodatečná měření. (1,0 bodu)

Všechna následující měření musí být provedena s optimální hodnotou odporu na rezistoru, kterou jste zvolili! Předpokládejte, že intenzita světla je v relativních jednotkách rovna napětí na rezistoru v mV.

Část 2.2 Průchod světla krzeváž plastová pravítka (5,4 bodu)

V této části použijete optické experimentální složení z části 1.2, vyobrazené na obr. 4B. Dávejte bacha na to, aby pravítka byla upevněna ke stínítku v pozici popsané v části 1.2.

2.2.1	Měřte intenzitu prošlého světla (v mV) v závislosti na souřadnici x bodu, kde paprsek dopadá na pravítka v rozsahu od 0 do 10 cm. Měření proveďte pro obě pravítka, která jste dostali, zvlášť a poté také pro obě pravítka přitisknutá na sebe najednou. Ve všech případech změřte maximální hodnotu napětí. Narýsujte příslušné tři grafy do jednoho obrázku. Jednotlivé případy rozlište různými symboly pro body. (2,0 bodu)
2.2.2	Pro obě dvě pravítka vypočítejte hodnoty fázového posunu $\Delta\varphi$ mezi řádným a mimořádným vlněním v rozsahu x od 0 do 7 cm. Narýsujte příslušné grafy $\Delta\varphi(x)$. Uveďte vzorce, které jste použili k výpočtům. (1,2 bodu) Záhodno zde poznamenati, že fázový rozdíl není možno jednoznačně určit ze vztahu (1), anýbrž další úvahy fyzikální nutno vzíti v potaz ku správnému určení jeho.
2.2.3	Předpokládejte, že $\Delta\varphi(x)$ je lineární pro obě pravítka, $\Delta\varphi_1 = a_1x + b_1,$ $\Delta\varphi_2 = a_2x + b_2.$ Vypočítejte číselné hodnoty výše uvedených koeficientů pro pravítka 1 i 2. (1,0 bodu)
2.2.4	Z dat, která jste získali v částech 2.2.1-2.2.3, vypočítejte pro stejné použité hodnoty souřadnic teoretické hodnoty intenzity světla procházející krzeváž obě pravítka přitisknutá na sebe. Napište vzorec, který jste použili pro vaše výpočty. Zakreslete teoretickou závislost do obrázku z části 2.2.1. (1,2 bodu)

Část 2.3 Buňka tekutého krystalu (4,5 bodu)

Průchod světla krzeváž buňku tekutého krystalu LCC

Vložte LCC mezi polarizátory, jak je znázorněno na obr. 6B.

Experimentální závislost, kterou právě zkoumáte je silně nemonotonní. V některých oblastech dochází k prudkým změnám. Mějte to na paměti při Vašem měření, a měňte v těchto oblastech napětí na buňce s krokem v řádu setin.

K měření střídavého napětí zdroje LCC a stejnosměrného napětí fotodetektoru, připojujte příslušné vodiče přímo k multimetru, nevymýšlejte chytrý obvod.

2.3.1	Měřte intenzitu prošlého světla jako funkci napětí na LCC. Narýsujte příslušný graf. (2,0 bodu)
2.3.2	Vypočítejte fázový posun mezi řádným a mimořádným vlněním $\Delta\varphi_0$, pokud není zdroj napětí připojen k LCC. (1,5 bodu)
2.3.3	V dostatečně široké oblasti poklesu napětí na LCC závisí fázový rozdíl mezi řádným a mimořádným vlněním na přiloženém napětí mocninnou závislostí $\Delta\varphi = CU^\beta.$ Pomocí vašich naměřených dat, narýsujte graf, který vám umožní určit oblast použitelnosti výše uvedené závislosti a vypočítat exponent β . Vyznačte zřetelně oblast použitelnosti vztahu a určete číselnou hodnotu parametru β . (1,0 bod)

Část 2.4 Průchod světla zakřiveným páskem. (3,4 bodu)

Pripevněte plastový pásek na stínítko, jak je popsáno v části 1.3.

2.4.1	Měřte intenzitu světla prošlého optickým systémem jako funkci souřadnice x bodu, kde světlo vniká do pásku v rozsahu ± 20 mm od středu pásku. Vyneste tuto závislost do grafu. (1,2 bod)
2.4.2	Vypočítejte fázový posun mezi řádnou a mimořádnou vlnou, $\Delta\varphi_0$, procházející krzeváž rovný

(nezakřivený) pásek. Je známo, že $\Delta\varphi_0$ leží v intervalu od 10π do 12π . (1,2 bodu)

V blízkosti středu pásku je možné jeho tvar považovat za oblouk kružnice o poloměru R . Teoretická závislost fázového posunu $\Delta\varphi$ na vzdálenosti z od středu proužku, $z \ll R$, má tvar:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_0 \left(1 + \frac{z^2}{2n^2R^2} \right),$$

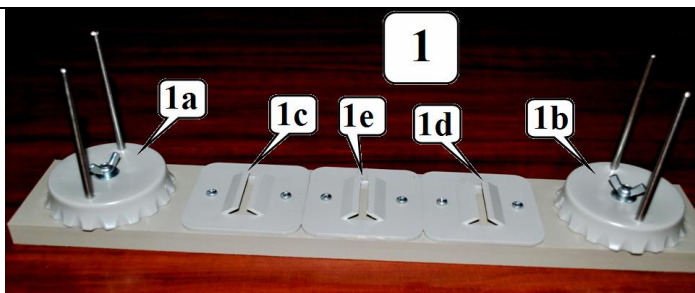
kde $n = 1,4$ je index lomu materiálu, z kterého je páska zhotovena.

2.4.3	Pomocí dat naměřených v předchozích částech, případně znázorněním dalších závislostí, vypočtete poloměr křivosti R pásku blízko jeho středu. Index lomu materiálu, ze kterého je pásek vyroben je $n = 1,4$. (1,0 bodu)
-------	--

Příloha A. Aparatura a pomůcky

Optická lavice 1 s držáky:

- 1a – stojan zdroje světla (vypadá jako velké víčko od lahvičky) se šroubem;
- 1b – stojan fotodetektoru se šroubem;
- 1c, 1d – stojany pro polarizátory;
- 1e – stojan pro stínítko a buňku tekutého krystalu (LCC z angl., liquid crystal cell).

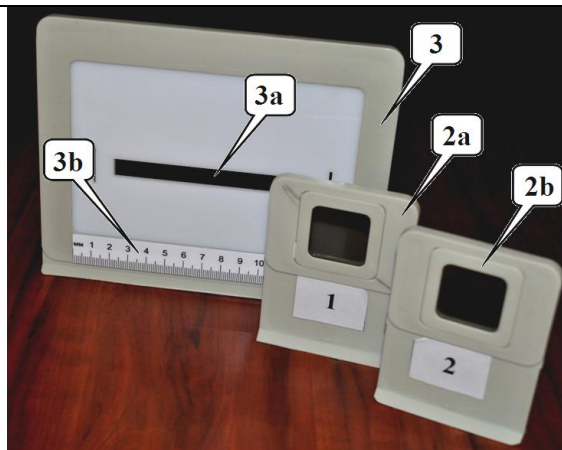


2a, 2b – polarizátory ve stojanech. Na lící straně jsou očíslovány čísly 1 a 2.

Polarizátory vždy instalujte lící stranou směrem ke zdroji světla!

Roviny polarizace polarizátorů svírají se svislým směrem úhel 45°.

3 – stínítko se štěrbinou (3a) a měřítkem (3b)



Světelné zdroje:

4 – svítivá dioda (LED):

4a – vodiče ke zdroji napětí;

4b – upevňovací šroub;

5 – laser:

5a – kroužek k otáčení laseru se stupnicí, stupnici nebudete používat;

5b – vodiče ke zdroji napětí;

5c – šroub na štelování šířky svazku paprsků (malý čvoneč vepředu);

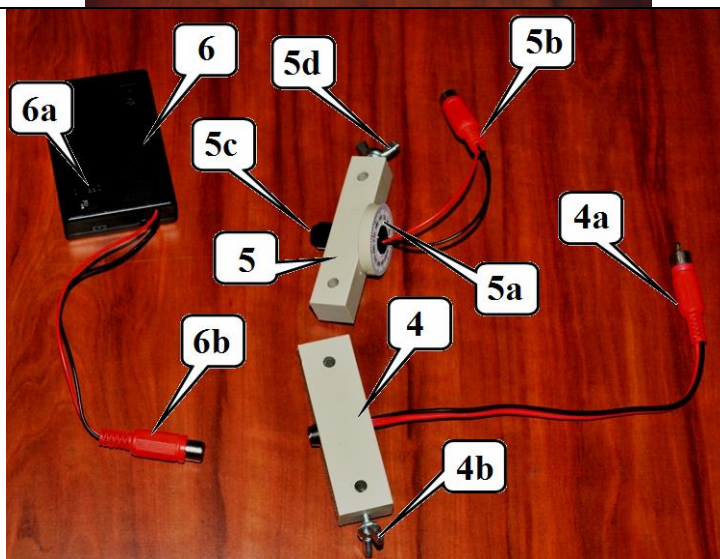
5d – upevňovací šroub;

6 – zdroj napětí pro světelné zdroje

6a – vypínač;

6b – vodiče ke světelnému zdroji.

**Nechte zdroj zapnutý pouze během měření!
Nemířte si laserovým paprskem do očí, je to velice nebezpečné. Raději se laserem nepokoušejte likvidovat ani své čínské protivníky!**



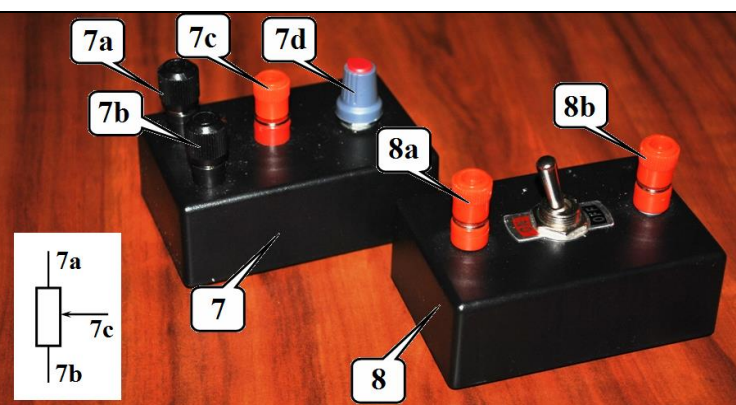
7 – proměnný odpor (reostat):

7a, 7b, 7c – zdířky pro připojení do obvodu

7d – knoflík měnící odpor.

8 – vypínač:

8a, 8b – zdířky pro připojení do obvodu



9a – buňka tekutého krystalu (LCC) 9a upevněná v držáku (9b), 9c – vodič ke zdroji energie;

10 – zdroj napětí pro LCC:

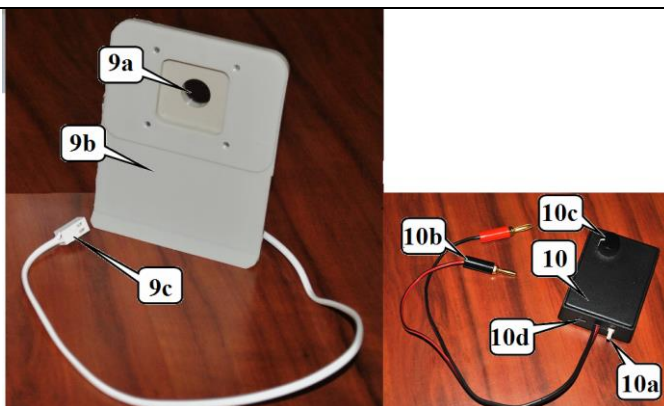
10a – konektor k LCC;

10b – vodiče k měření výstupního napětí;

10c – knoflík ke štelování výstupního napětí;

10d – vypínač on/off.

Nechte zdroj zapnutý pouze během měření!



11 – multimetr;

Nemačkejte tlačítko „HOLD“.

11a – oblast k měření odporu (200 kΩ);

11b – oblast k měření stejnosměrného (DC) napětí (2V);

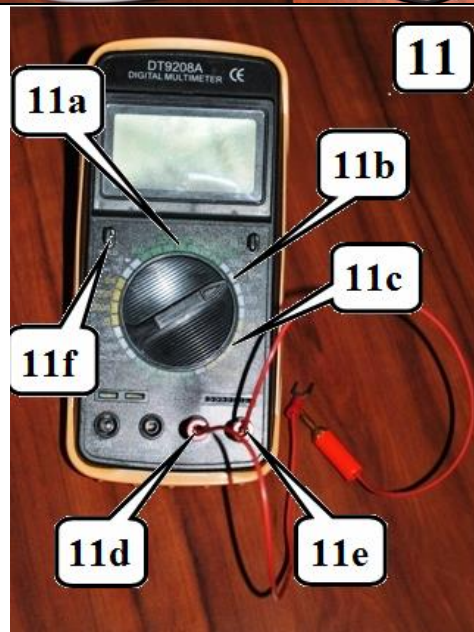
11c – oblast k měření střídavého (AC) napětí (20V);

11d, 11e – zdířky pro vodiče;

11f – vypínač on/off.

Chcípne-li displej multimetru do hlubokého spánku, zmáčkní dvakrát tlačítko vypínače!

Měříte-li multimetrem odpor, měřený prvek musí být odpojen od zdroje napětí!



Studované optické prvky

12 – plastová pravítka:

12a – č. 1 (s měřítkem od 0 do 14 cm)

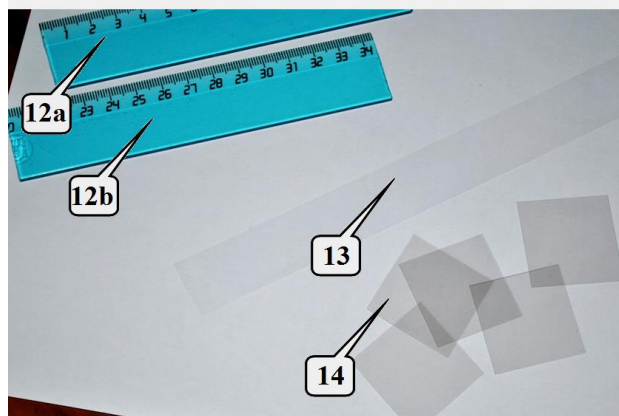
12b – č. 2 (s měřítkem od 20 do 34 cm)

13 – ohebný plastový pásek;

14 – sada shodných světelných filtrů;

Filtry a pásek vám dáme ve zvláštní obálce!

Plastová pravítka a ohebný pásek vykazují dvojlomnost, jejich optická osa leží v jejich vlastních rovinách.

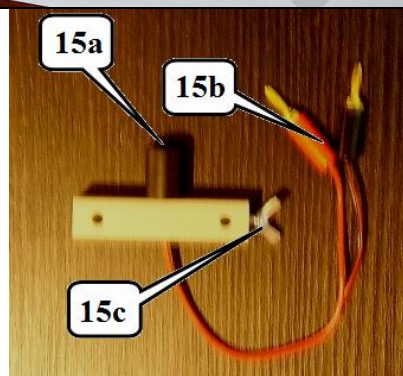


15 Fotodetektor (fotodioda)

15a – vstupní otvor (okénko);

15b – vodiče k měření výstupního napětí;

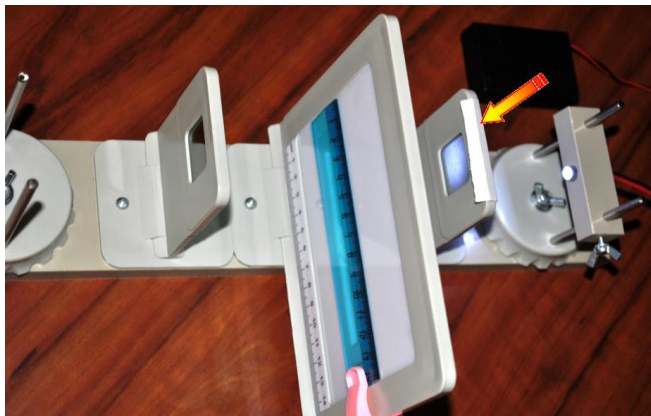
15c – upevňovací šroub.



Spojovací vodiče, svorky, papírový ubrousek, kousek papíru.

Nedotýkejte se optických prvků, jimiž prochází světlo! Pokud to bude nutné, otřete je papírovým ubrouskem!

Příloha B. Snímky experimentálního uspořádání



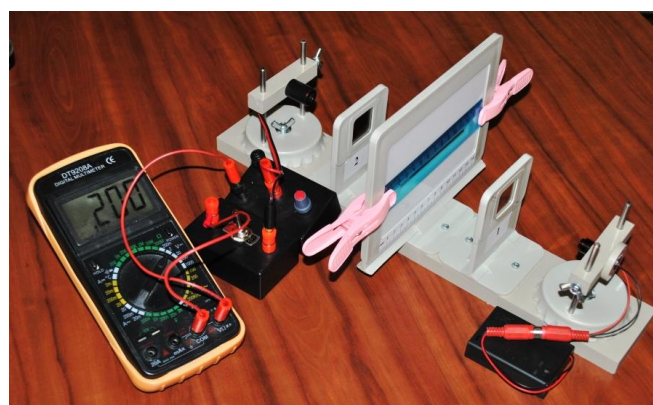
Obr. 1B Experimentální složení pro studium dvojlomu v pravítku. Šipka označuje bílý papír zakrývající polarizátor 1.



Obr. 2B Pravítko připevněné ke stínítku.



Obr. 3B Připevnění ohebného plastového proužku ke stínítku.



Obr. 4B Experimentální složení pro měření průchodnosti světla plastovým pravítkem.



Obr. 5B Připevnění filtrů na polarizátor.



Obr. 6B Experimentální složení pro měření vlastností LCC.