

Experiment. Att se det osynliga! (20 poäng)

Inledning

Många ämnen är anisotropa, dvs. deras egenskaper är olika i olika riktningar. Även isotropa ämnen kan bli anisotropa om de utsätts för mekanisk belastning, upphettning eller elektrisk spänning, etc. I fallet med ljus innebär anisotropi att ämnets brytningsindex beror på det infallande ljusets riktning och polarisation. Om infallande ljus delar upp sig i två riktningar kallas ämnet dubbelbrytande. Det finns dock en riktning i ämnet längs vilken ingen uppdelning av ljuset sker och den riktningen kallas optisk axel.

Fig. 1 nedan visar en vanlig uppställning för att studera optisk anisotropi, vilken också kommer att användas i kommande experiment.

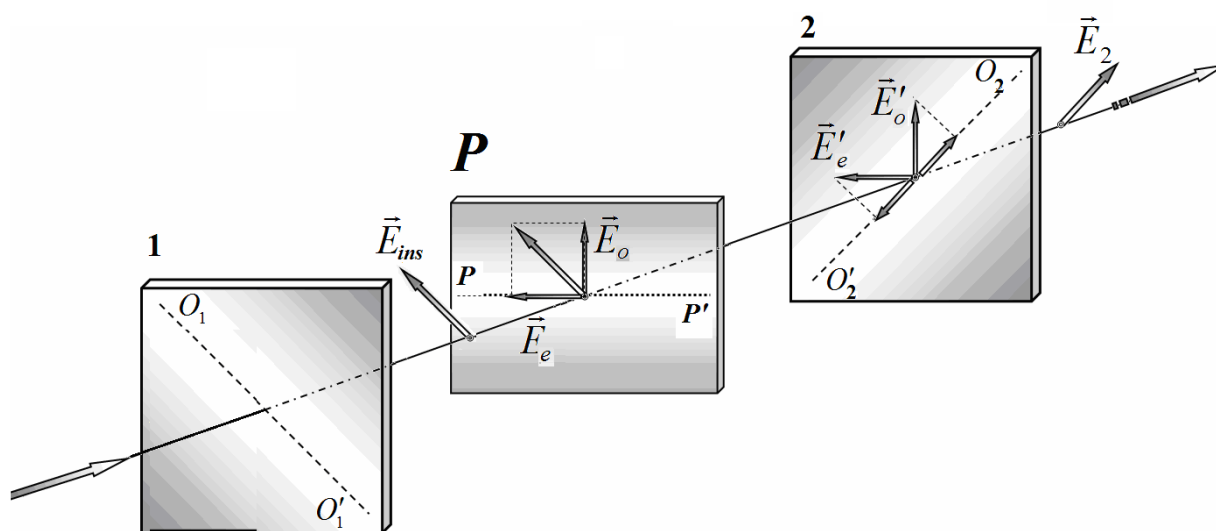


Fig. 1. En schematisk uppställning för studiet av optisk anisotropi

Om polarisator (polarisationsfilter) 1 belyses, polariseras ljuset i riktning $O_1O'_1$. Efter passagen är ljuset linjärt polariserat, vilket innebär att dess elektriska fältvektor $\vec{E}_{ins}$ svänger i planet som utgörs av $O_1O'_1$ och utbredningsriktningen. Därefter passerar ljuset den anisotropa plattan P , vars optiska axel PP' är parallell med plattan och har vinkeln 45° mot $O_1O'_1$ hos polarisator 1. Efter passagen av den anisotropa plattan P består ljuset av två vågor, en ordinär våg (stråle) $\vec{E}_o$, polariserad vinkelrätt mot optiska axeln i plattan, och en extraordinär våg $\vec{E}_e$, polariserad längs optiska axeln. Brytningsindex är olika för dessa två vågor (strålar) och skillnaden beskrivs av $\Delta n = n_o - n_e$. Beroende på plattans tjocklek (h) blir vågorna inbördes fasförskjutna med $\Delta\varphi = 2\pi h\Delta n/\lambda$, där λ är ljusets våglängd. Resultatet blir s.k. elliptiskt polariserat ljus. Detta ljus passerar slutligen polarisator 2, vilket polariserar ljuset i riktning $O_2O'_2$, vinkelrätt mot $O_1O'_1$.

Av det ljus med intensiteten I_0 som inföll mot plattan P , återstår efter passagen av polarisator 2

$$I_2 = kI_0 \sin^2 \frac{\Delta\varphi}{2}, \quad (1)$$

där k är plattans transmissionskoefficient och $\Delta\varphi$ är fasförskjutningen mellan den ordinära och den extraordinära vågen efter passagen.

I detta experiment krävs ingen felkalkyl om inget annat sägs!
Den experimentella utrustningen beskrivs i Appendix A.

Del 1. Kvalitativa observationer! (3,5 poäng)

Del 1.1. Polarisatorer (0,8 poäng)

1.1	Finn polariseringsriktningen för polarisator 1 resp. polarisator 2. Fyll i dessa riktningar i figuren i svarsbladet. (0,8 poäng)
-----	--

Del 1.2. Linjaler (1,0 poäng)

Använd lysdioden (LED-lampan) som ljuskälla i denna del av experimentet.

Fixera lysdioden i hållaren för ljuskälla, och koppla in den till sin strömkälla. Montera båda polarisatorerna, med framsidan (markerade med 1 resp. 2) riktade mot ljuskällan. Kontrollera att polarisatorerna är korsade, dvs. att ljusstrålen inte kan passera genom båda. Placera en vit papperslapp i strålens väg på framsidan av den första polarisatorn, så som visas i fig. 1B i Appendix B.

Håll plastlinjal 1 för hand mellan polarisatorerna.

1.2.1	Bestäm de möjliga riktningarna för den optiska axeln i mitten av linjalen. Rita in dessa riktningar i figuren på svarsbladet (0,4 poäng)
1.2.2	Bestäm approximativt vid vilket avstånd längs linjal 1, respektive längs båda linjalerna ihoplagda, som fasförskjutningen för det blå ljuset ökat till 2π . (0,6 poäng)

Del 1.3. Remsa (0,8 poäng)

1.3.1	Bestäm de möjliga riktningarna hos den långa böjliga plastremsans optiska axel. Rita in dessa i figuren på svarsbladet. (0,4 poäng)
-------	---

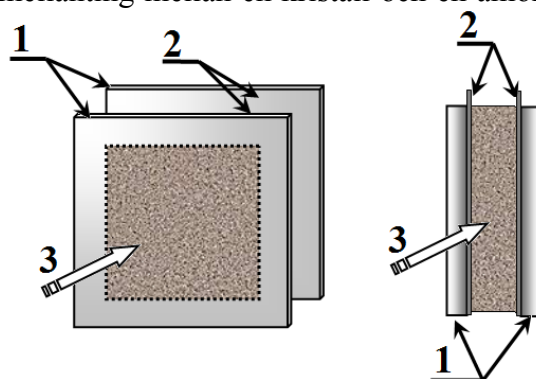
Fixera nu remsan på skärmen med hjälp av klädnyporna, så att ändarna hamnar vid skärmens kanter. Remsan ska vara böjd (se fig. 3B). Placera skärmen med remsa i hållaren mellan polarisatorerna. Observera färgändringarna när skärmen skjuts i sidled. Definiera x -koordinater för punkter på skärmen med hjälp av dess skala, med hållarens vänsterkant som referenspunkt enl. fig. 3B.

I försättningen ska koordinater mätas med hjälp av skärmens skala, med hållarens vänsterkant som referenspunkt (se pilen i fig. 3B)!

1.3.2	Mät koordinaterna för mittpunkterna hos de två mörka band som kan ses på remsan, en till vänster (x_L), och en till höger (x_R). (0,4 poäng)
-------	--

Del 1.4. Vätskekristallcell (0,9 poäng)

Vätskekristall (flytande kristall, liquid crystal, LC) är ett mellanting mellan en kristall och en amorf vätska. Dess molekyler kan lätt upplinjas, och detta kan styras med ett pålagt elektriskt fält. Vätskekristaller uppvisar optisk anisotropi, med två olika brytningsindex. Storleken av denna effekt beror på den pålagda växelspänningen. En LC-cell består av två glasplattor (1 i figuren t.h.), vilkas innerytor är belagda med ett genomskinligt ledande lager (2). Mellan plattorna finns ett tunt (c:a 10 μm) lager av en lösning (3) med vätskekristallegenskaper. Anslutningar har löts fast vid de ledande skikten, för att anslutas till en växelspänningskälla. **I frånvaro av spänning orienterar sig vätskekristallens långa molekyler parallellt med plattorna. Dessa molekylers riktning definierar den flytande kristallens optiska axel.**



Placera vätskekristallcellen (LCC:n) mellan polarisatorerna, och anslut den till sin spänningskälla. Observera färgvariationerna hos det transmitterade ljuset när spänningen över LCC:n varierar.

1.4.1	Bestäm de möjliga riktningarna hos LCC:ns optiska axel när spänningen över den är noll resp. maximal. Rita in dessa riktningar i figuren på svarsbladet. Z-axeln är riktad vertikalt. (0,6 poäng)
1.4.2	Mät den spänning U_{cr} över cellen, vid vilken vätskekristallens molekyler abrupt omorienteras 90° . Se till att multimetern är ställd på att mäta växelspanning. (0,3 poäng)

Del 2. Mätningar! (16,5 poäng)

Koppla bort lysdioden från strömkällan och koppla in lasern. Ta också bort det vita papperet.

Montera lasern, polarisator 1, skärmen med spalten och fotodioden i respektive hållare. Justera lasern så att strålen passerar polarisatorn, spalten i skärmen och belyser fotodioden. Använd skruv 5c för att justera strålvidden så att fotodioden träffas av en ljusfläck på ca 5-6 mm.

Ljuset från lasern är linjärt polariserat. Vrid ringen 5a tills storaxeln på den ellipsformade ljusfläcken vid polarisator 1 är vertikal, och med nästan maximal ljusintensitet. Fixera sedan laser och fotodiod med skruvarna 5d and 15c. Montera därpå polarisator 2 och se till att polarisatorerna är korsade. Fig. 4B visar denna uppställning.

Del 2.1. Undersökning av fotodiod (3,2 poäng)

För att mäta ljusintensitet kan den elektromotoriska spänning som en fotodiod ger utnyttjas. Responsen är dessvärre olinjär och därför används uppkopplingen i fig.2. Likspänningen som mäts av en multimeter beror på det inkommande ljusets intensitet och resistorns resistans. Syftet är att hitta ett optimalt värde på resistansen, så att spänningen över resistorn blir proportionell mot intensiteten hos det mot fotodioden infallande ljuset.

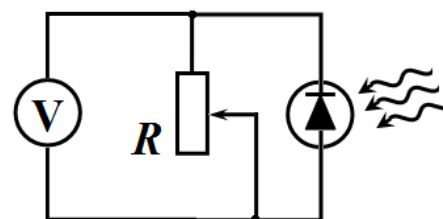


Fig. 2. Uppkoppling av krets för att mäta spänningen från fotodioden.

Ta nu bort skärmen och polarisator 2 från uppställningen. Filtren, som ju minskar ljusintensiteten, ska fixeras på polarisatorernas baksidor, vilket visas i fig. 5B.

Det maximala värdet på de uppmätta spänningarna måste vara minst 300 mV.

Med multimetern kan dels resistansen hos resistorn, dels spänningen över den, mätas (givet att lämpliga mätområden väljs). Koppla in strömbrytaren i kretsen, så att mätningarna av resistanser och spänningar kan genomföras utan att koppla isär kretsen, dvs. Genom att ställa strömbrytaren i olika lägen och byta mätområde.

2.1.1	Redovisa med kopplingsschema hur du kopplat in strömbrytaren för att uppfylla kravet ovan. (0,2 poäng)
2.1.2	Mät spänningen över resistorn som funktion av dess resistans, dels för maximalt ljus (antal filter = 0), dels för minimalt ljus (antal filter = 5). Rita respektive graf i samma diagram. Specificera och markera i diagrammet inom vilket resistansområde skillnaden mellan dessa spänningar är maximal. (1,0 poäng)
2.1.3	Mät spänningen U över resistorn som funktion av antalet filter, $n = 0,1,2,3,4,5$, som används för att minska ljusintensiteten som infaller mot fotodioden. Mätningarna ska göras för tre olika resistanser, med approximativa värden $R = 30 \text{ k}\Omega$, $R = 20 \text{ k}\Omega$ och $R = 10 \text{ k}\Omega$. Rita motsvarande grafer i samma diagram. Välj skalor så att det är möjligt att avgöra om spänningen över resistorn beror linjärt på intensiteten hos det infallande ljuset som registreras av fotodioden. Välj den av resistanserna ovan, R_{opt} , som är bäst lämpad att användas vid de fortsatta mätningarna av ljusintensiteten. (1,0 poäng)

2.1.4	Beräkna, med hjälp av dessa data, transmittansen $\gamma = I_{tr}/I_{inc}$ hos ett av filtren, och beräkna felet i detta värde. I_{tr} är intensiteten hos det transmitterade ljuset och I_{inc} är intensiteten hos det infallande ljuset. Du kan vid behov göra ytterligare mätningar. (1,0 poäng)
-------	--

Alla efterföljande mätningar måste göras vid den valda optimala resistansen!

Det antas i det följande att ljusintensiteten i relativa enheter är lika med spänningen över resistorn i mV.

Del 2.2 Ljustransmission genom plastlinjaler (5,4 poäng)

Placera linjalen mellan polarisatorerna. Du kan flytta linjalen för hand. Sätt sedan fast den med klädnyporna på skärmen med spalten (se fig. 2B). Den undre kanten på linjalen ska sammanfalla med linjen på skärmen, och dess skala ska ligga uppåt. Kontrollera att båda linjalerna uppvisar anisotropi. Observera den bild som uppstår när linjalerna är ihoplagda.

I denna del ska du använda uppställningen som beskrevs i del 1.2, fast med lasern som ljuskälla, som visas i figur 4B. Se till att linjalerna fästs vid skärmen i den position som beskrivs i del 1.2.

2.2.1	Mät det transmitterade ljusets intensitet (i mV) som funktion av koordinaten x för punkten där ljuset träffar linjalen, i intervallet 0 till 10 cm. Utför mätningarna för varje linjal för sig samt för de båda linjalerna ihoplagda. I vart och ett av fallen, mät det maximala värdet av spänningen. Rita motsvarande grafer i ett och samma diagram. (2,0 poäng)
2.2.2	För var och en av de två linjalerna, beräkna fasförskjutningen $\Delta\varphi$ mellan de ordinära och extraordinära vågorna som funktion av x , när x varierar från 0 till 7 cm. Rita motsvarande grafer $\Delta\varphi(x)$. Ange formeln du har använt för beräkningarna. (1,2 poäng) <i>Notera att fasskillnaden inte kan bestämmas entydigt från ekvation (1); ytterligare överväganden krävs för att bestämma den entydigt.</i>
2.2.3	Antag att $\Delta\varphi(x)$ är linjär för varje linjal enligt $\Delta\varphi_1 = a_1x + b_1,$ $\Delta\varphi_2 = a_2x + b_2.$ Bestäm de numeriska värdena på koefficienterna ovan, för linjalerna 1 och 2. (1,0 poäng)
2.2.4	Använd data från 2.2.1-2.2.3 för att beräkna de teoretiska värdena på intensiteten (mätt i mV) hos ljus som passerat genom de båda linjalerna ihoplagda. Ange formeln som du har använt i dina beräkningar. För in de teoretiska värdena i samma figur som i fråga 2.2.1. (1,2 poäng)

Del 2.3 Vätskekristallcellen (4,5 poäng)

Ljustransmission genom LCC:n

Placera vätskekristallcellen (liquid crystal cell, LCC) mellan polarisatorerna, som visas i figur 6B.

De uppmätta storheterna kan variera kraftigt i vissa intervall. Tänk på detta när du gör mätningar.

För att mäta växelspänningen (AC) från spänningskällan till vätskekristallcellen (LCC), och likspänningen (DC) från ljusdetektorn, anslut lämpliga sladdar direkt till multimetern.

2.3.1	Mät intensiteten hos det transmitterade ljuset som funktion av spänningen över LCC:n. Rita motsvarande graf. (2,0 poäng)
2.3.2	Bestäm fasskillnaden mellan de ordinära och extraordinära vågorna $\Delta\varphi_0$ när strömförsörjningen inte är ansluten till LCC:n. (1,5 poäng)

2.3.3	I ett ganska brett intervall av värden på spänningen över LCC:n, beror fasskillnaden mellan de ordinära och extraordinära vågorna på spänningen enligt potensformeln $\Delta\varphi = CU^\beta.$ Använd erhållna data för att rita en graf, och bestäm utifrån denna giltighetsområdet för formeln ovan samt det numeriska värdet på exponenten β. (1,0 poäng)
-------	---

Del 2.4 Ljustransmission genom en böjd plastremsa. (3,4 poäng)

Fäst plastremsan på skärmen, enligt beskrivningen i del 1.3.

2.4.1	Mät intensiteten av ljuset som transmitteras genom det optiska systemet, som funktion av koordinaten x för punkten där ljuset träffar remsan (i intervallet ± 20 mm från mitten). Rita motsvarande graf. (1,2 poäng)
2.4.2	Beräkna ur dessa data fasförskjutningen, $\Delta\varphi_0$, mellan de ordinära och extraordinära vågorna som passerar genom en oböjd plastremsa. Det är känt att $\Delta\varphi_0$ ligger i intervallet 10π till 12π . (1,2 poäng)

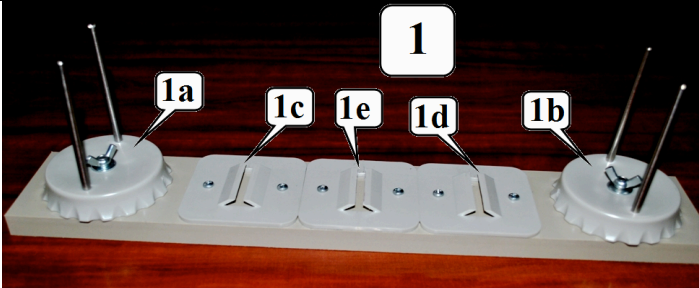
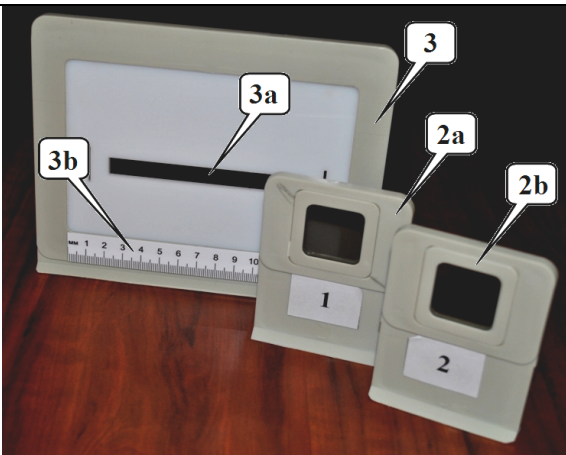
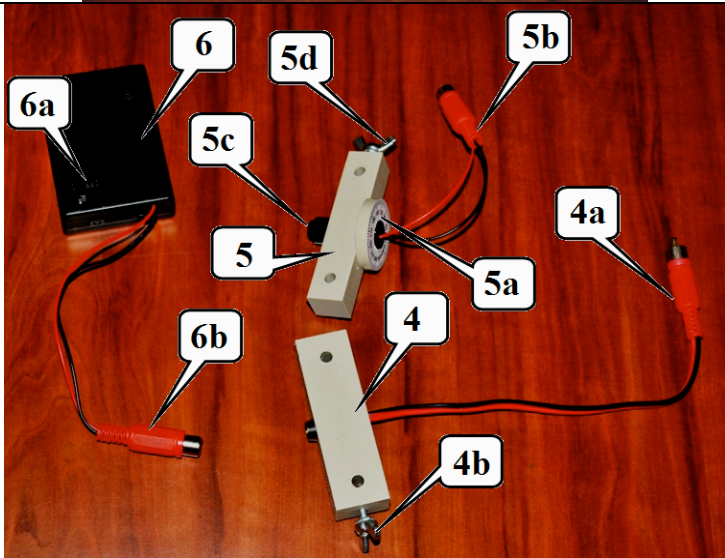
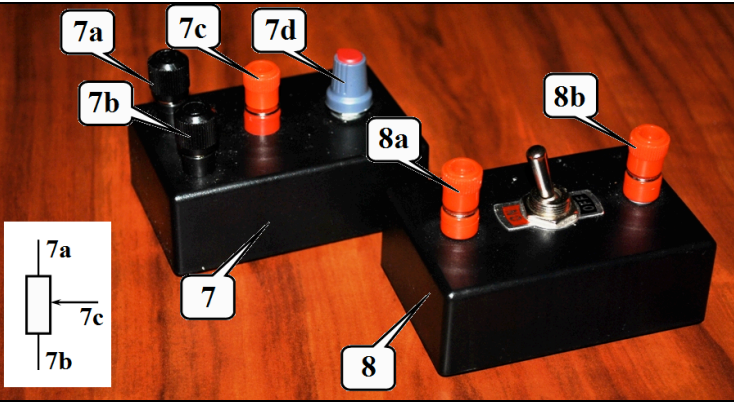
Nära remsans centrum kan dess form approximeras med en cirkelbåge med radien R . Fasförskjutningen $\Delta\varphi_0$ kan då teoretiskt visas bero på avståndet z från remsans mitt, för $z \ll R$, enligt:

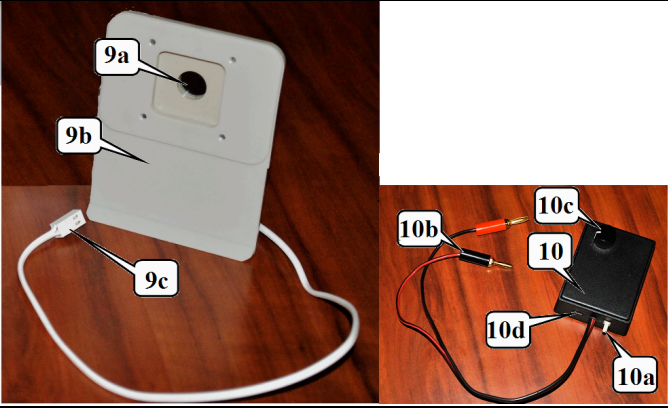
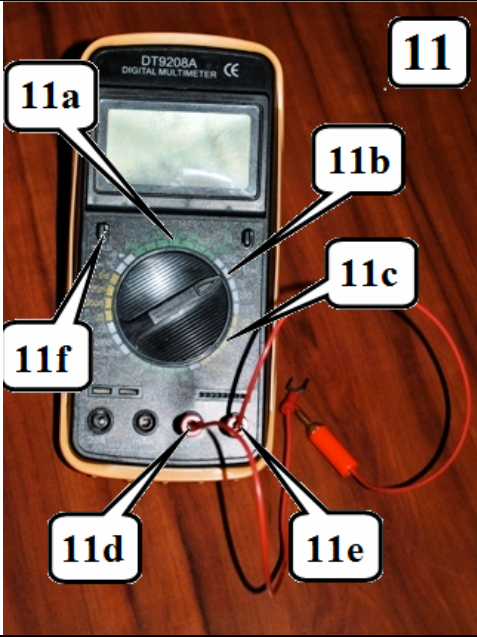
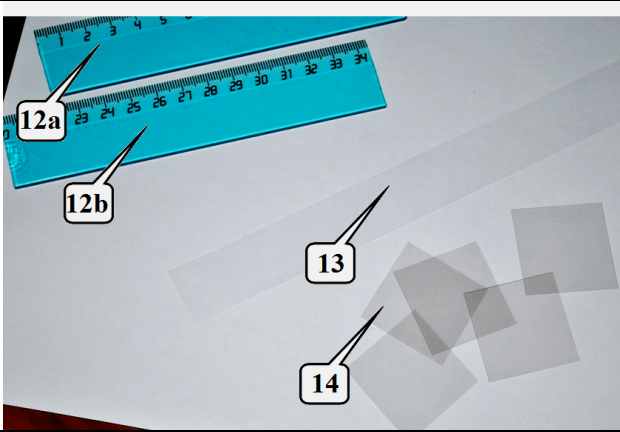
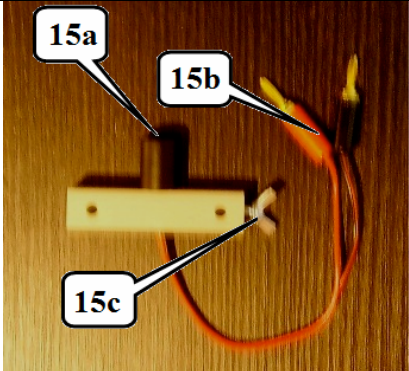
$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_0 \left(1 + \frac{z^2}{2n^2R^2} \right)$$

Materialet i plastremsan har brytningsindex $n = 1,4$.

2.4.3	Använd data från föregående delar för att beräkna plastremsans krökningsradie R nära dess mitt. (1,0 poäng)
-------	---

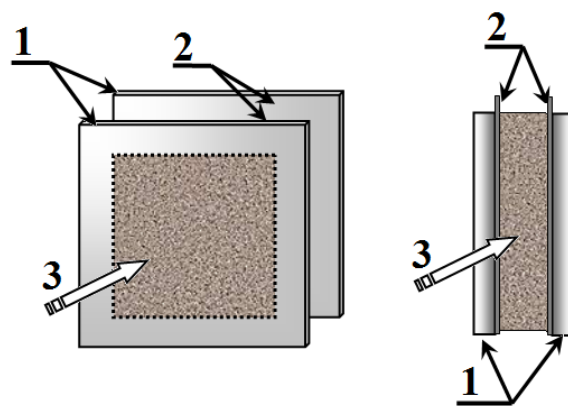
Appendix A. Experimentell utrustning

Optisk bänk 1 med hållare: 1a – hållare för ljuskälla, med skruv; 1b – hållare för ljusdetektor, med skruv; 1c, 1d – spår för polarisatorer; 1e – spår för skärm och vätskekristallcell (liquid crystal cell, LCC).	
2a, 2b – polarisatorer i hållare, numrerade 1 och 2 på framsidan. Polarisatorerna ska alltid sättas på plats med framsidan riktad mot ljuskällan! Polarisatorernas polarisationsriktning bildar vinkeln 45° med horisontalplanet. 3 – skärm med spalt (3a) och mätskala (3b)	
Ljuskällor: 4 – LED-lampa (light emitting diode): 4a – anslutning till strömkälla; 4b – skruv för fastsättning; 5 – laser: 5a – ring för att vrida lasern, med mätskala; 5b – anslutning till strömkälla; 5c – ”skruv” för att justera strålbredden; 5d – skruv för fastsättning; 6 – strömkälla för ljuskällor: 6a – av/på-knapp; 6b – anslutning till ljuskälla. Låt ljuskällorna vara igång endast när du gör mätningar! Rikta inte laserstrålen mot ögonen; det kan vara farligt!	
7 – variabel resistor: 7a, 7b, 7c – anslutningskontakter 7d – reglage för att justera resistansen. 8 – strömbrytare: 8a, 8b – anslutningskontakter;	

9a – vätskekristallcell (liquid crystal cell, LCC) i hållare (9b), 9c – anslutning till spänningskälla; 10 – spänningskälla för LCC:n: 10a – anslutning till LCC:n; 10b – kontakter för mätning av utspänning (output voltage); 10c – reglage för att justera utspänningen; 10d – av/på-knapp. <i>Låt spänningsförsörjningen vara på endast när du gör mätningar!</i>	
11 – multimeter; 11a – mätområde för resistans (200 kOhm); 11b – mätområde för likspänning (2V); 11c – mätområde för växelspänning (20V); 11d, 11e – kontakter för mätsladdar (test leads); 11f – av/på-knapp. <i>Om multimetern hamnar i viloläge – tryck två gånger på av/på-knappen!</i> <i>När multimetern används för att mäta resistans får ingen yttre strömkälla vara ansluten!</i>	
Optiska föremål att undersöka 12 – plastlinjaler: 12a – Nr. 1 (graderad från 0 till 14 cm) 12b – Nr. 2 (graderad från 20 till 34 cm) 13 – böjbar plastremsa; 14 – några filter; <i>Filtren och remsan ligger i ett särskilt kuvert!</i> Plastlinjalerna och plastremsan är anisotropa. Deras optiska axlar ligger i deras egna plan.	
15 Ljusdetektor (fotodiod) 15a – fönster för ljusinsläpp; 15b – kontakter för att mäta utspänningen; 15c – skruv för fastsättning.	
Sladdar, klämmor, pappersservett, en bit papper.	

Vätskekristallcellen består av två glasplattor (1) vars insidor är täckta med ett transparent och ledande lager (2). Mellan plattorna finns ett tunt lager (ungefär 10 mikrometer) av en vätskekristallösning (3). Kontakter är fastlödda på plattorna för anslutning till strömkälla (växelström). Om ingen elektrisk spänning är pålagd, är de långa molekylerna i vätskekristallen riktade parallellt med plattorna. Molekylriktningen sammanfaller med optiska axeln för vätskekristallen.

Försök att inte vidröra de delar av glasplattorna där ljuset passerar! Om nödvändigt, torka rent dem med en pappersservett!



Appendix B. Foton av experimentuppställningen

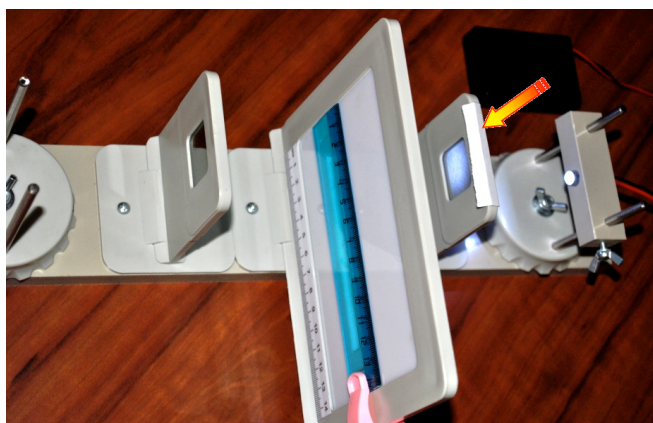


Fig. 1B Uppställning för observation av dubbelbrytning i plastlinjal.



Fig. 2B Plastlinjal monterad på skärmen.



Fig. 3B Fastsättning av den böjbara plastremsan på skärmen.

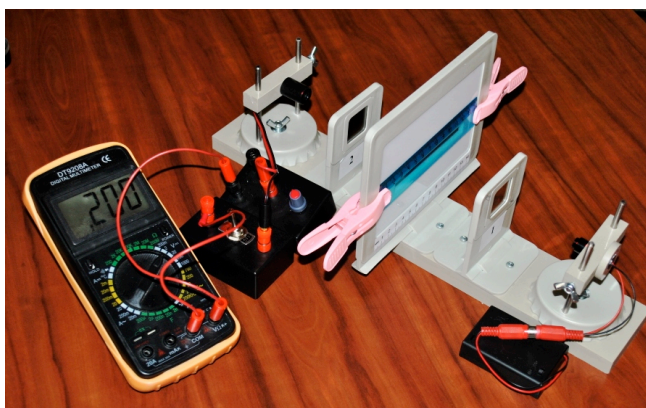


Fig. 4B Uppställning för mätning av ljustransmittansen genom plastlinjal.

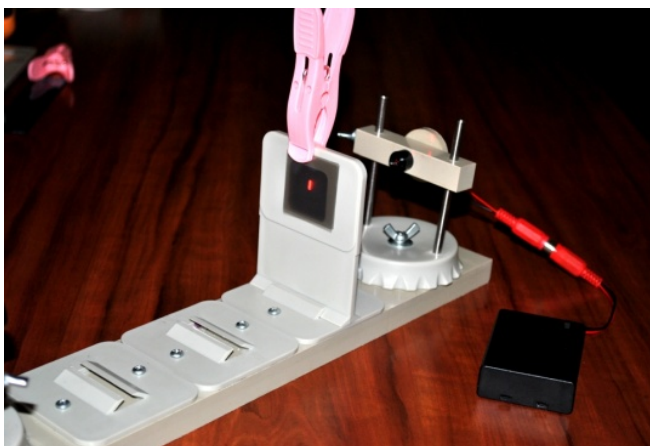


Fig. 5B Filter fastsatta på polarisator

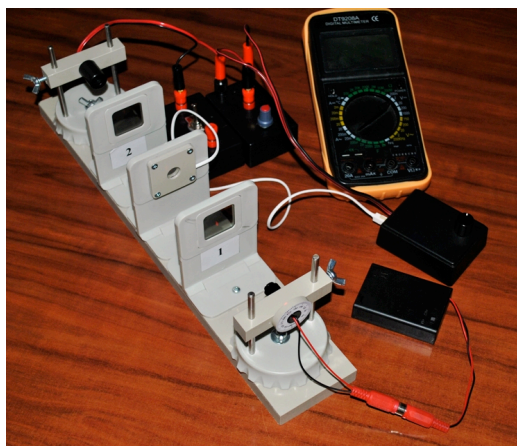


Figure 6B Uppställning för mätning av vätskekristallcellens (LCC) karakteristik.