실험 경연. 2014년 7월 17일 목요일
실험. 보이지 않는 것을 보라! (20점)

서론

많은 물질이 광학적 비등방성을 보이는데, 그 결과 굴절률이 빛의 진행 방향과 편광에 따라 달라진다. 광학적 비등방성은 등방성 매질에서도 기계적 응력이 있거나, 고르지 않게 가열되거나, 외부 전기장이 걸리면 생길 수 있다. 빛이 복굴절 없이 진행하는 방향을 결정의 광축이라고 한다.

광학적 비등방성을 연구하는 전통적인 실험 광학 배치(그림 1 참조)를 생각하자. 이 실험 문제에서는 이 배치를 사용한다.

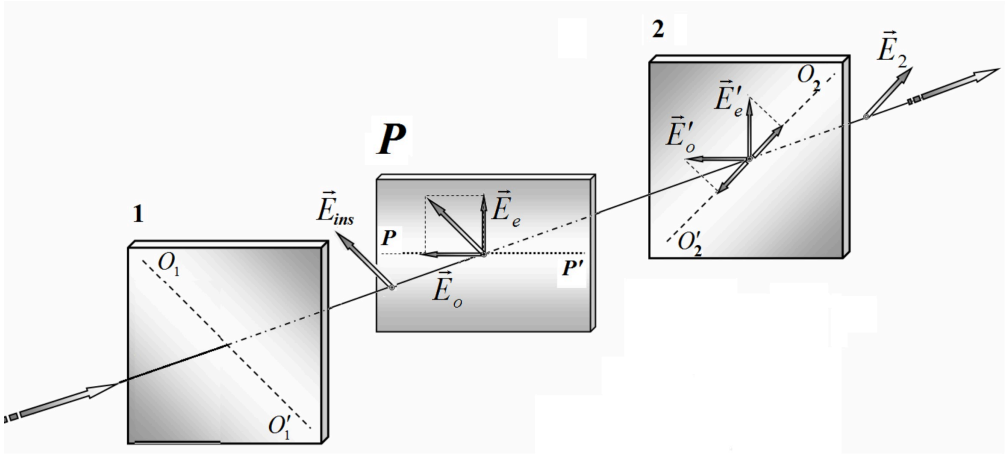


그림 1. 광학적 비등방성을 연구하는 실험의 광학 배치.

빛살이 편광판 1에 입사한다고 하자. 편광판 1의 투과면은 편광판 자신의 면과 직선 $O_1O'_1$을 따라 만난다. 편광판 1을 지난 빛살은 선편광되며, 그 전기장 세기 벡터 $\vec{E}_0$는 정확히 편광판 1의 투과면 안에서 진동한다. 그다음 빛살은 비등방성 판 P에 입사하는데, 이 판은 그 광축 PP'이 판의 면 안에 놓이고 편광판 1의 투과면과 45°를 이루도록 놓여 있다. 그러면 판 P 안에서 두 종류의 빛 파동이 생긴다. 판의 광축에 수직으로 편광된 정상파 $\vec{E}_o$와, 판의 광축을 따라 편광된 이상파 $\vec{E}_e$이다. 이 두 파동의 굴절률은 서로 다르며, 그 차를 $\Delta n = n_o - n_e$로 나타낸다. 그 결과 판을 빠져나올 때 두 파동 사이에 위상차 $\Delta\varphi = 2\pi h\Delta n/\lambda$($h$는 판의 두께, λ는 입사광의 진공 중 파장)가 생긴다. 따라서 나가는 빛살의 편광은 타원 편광으로 바뀐다. 그다음 빛살은 편광판 2에 입사하는데, 그 투과면 $O_2O'_2$은 편광판 1의 투과면에 수직이다.

간단히 유도하면 판 P와 편광판 2를 지난 빛살의 세기는 다음과 같이 정해진다.

$$I_2 = kI_0 \sin^2 \frac{\Delta\varphi}{2}, \tag{1}$$

여기서 I_0은 판에 입사하는 빛의 세기, k는 판 P와 편광판 2의 빛 투과 계수, $\Delta\varphi$는 판 P를 지난 뒤 정상파와 이상파 사이의 위상차이다.

이 실험에서는 요구하지 않는 한 오차를 계산하지 마시오!
장치 설명은 부록 A에 있다.

실험 경연. 2014년 7월 17일 목요일

파트 1. 정성적 관찰! (3.5점)

파트 1.1. 편광판 (0.8점)

1.1	편광판 1과 편광판 2의 투과면 방향(즉 두 대각선 중 어느 것인지)을 찾으시오. 답안지의 그림에 이 면들을 나타내시오. (0.8점)

파트 1.2. 자 (1.0점)

실험의 이 파트에서는 발광 다이오드(LED)를 광원으로 사용하시오.

LED를 받침대에 고정하고 전원 장치에 연결하시오. 두 편광판을 앞면(숫자 1과 2가 표시된 면)이 광원을 향하도록 설치하시오. 두 편광판이 교차되어 있는지, 즉 빛살이 두 편광판을 지나지 못하는지 확인하시오. 부록 B의 그림 1B처럼 흰 종이 한 장을 앞면에 대어 첫 번째 편광판을 가리시오.

플라스틱 자 1을 두 편광판 사이에 놓으시오. 자는 손으로 움직일 수 있다.

1.2.1	플라스틱 자 가운데에서 광축이 가질 수 있는 방향을 찾으시오. 답안지의 그림에 이 방향들을 나타내시오. (0.4점)
1.2.2	자 1을 따라, 그리고 두 자를 포갠 것을 따라 대략 얼마의 거리마다 파란빛의 위상차가 2π만큼 변하는지 구하시오. (0.6점)

파트 1.3. 띠 (0.8점)

1.3.1	띠의 광축이 가질 수 있는 방향을 찾으시오. 답안지의 그림에 정성적으로 나타내시오. (0.4점)

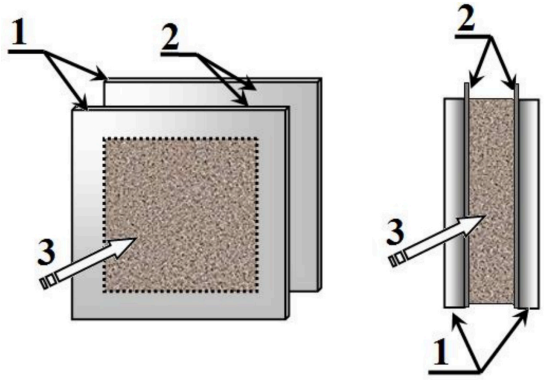
집게로 길고 휘어지는 플라스틱 띠를 화면에 고정하되, 띠의 가장자리가 화면의 가장자리와 일치하게 하시오. 띠는 휘어 있어야 한다(그림 3B 참조). 띠를 붙인 화면을 두 편광판 사이에 놓으시오. 화면을 옮기면서 띠의 색이 변하는 것을 관찰하시오. 화면 눈금으로 띠 위 점들의 x 좌표를 재되, 그림 3B처럼 화면 받침의 왼쪽 가장자리를 원점으로 하시오.

이후 좌표는 화면의 눈금으로 잰다. 지시선으로는 그림 3B에 화살표로 표시한 받침의 왼쪽 가장자리를 사용하시오!

1.3.2	띠에 보이는 두 어두운 띠의 가운데 점의 좌표, 왼쪽 x_L과 오른쪽 x_R를 측정하시오. (0.4점)

파트 1.4. 액정 셀 (0.9점)

액정(LC)은 결정성 고체와 비정질 액체의 중간에 있는 물질 상태이다. 액정 분자의 방향은 전기장을 걸어 쉽게 정렬하고 조절할 수 있다. 액정 셀은 두 주 굴절률을 가진 광학적 비등방성 현상을 보인다. 이 효과의 크기는 걸어 준 교류 전압에 따라 달라진다. 액정 셀(LCC)은 안쪽 면에 투명 전도층 2를 입힌 두 유리판 1로 이루어져 있다. 두 판 사이에는 액정 상태에 있는 용액 3의 얇은(약 10 μm) 층이 있다. 교류 전원에 연결하도록 판에 도선이 납땜되어 있다.



액정 셀(LCC)을 두 편광판 사이에 놓으시오. 셀을 전원 장치에 연결하시오. LCC에 걸리는 전압을 바꾸면서 셀을 지난 빛의 색이 변하는 것을 관찰하시오.

1.4.1	LCC에 전압을 걸지 않았을 때와 최대 전압을 걸었을 때 LCC의 광축이 가질 수 있는 방향을 찾으시오. 답안지의 그림에 이 방향들을 나타내시오. Z축은 연직 방향이다. (0.6점)

1.4.2	액정 분자의 방향이 전압에 대해 갑자기 90° 바뀌는 셀 전압 U_{cr}를 측정하시오. 멀티미터가 교류 전압 모드인지 확인하시오. (0.3점)

파트 2. 측정하라! (16.5점)

LED를 전원 장치에서 분리하여 치우시오. 흰 종이도 치우시오.
이 파트에서는 레이저를 광원으로 사용하며, 반드시 레이저를 전원 장치에 연결하시오!

레이저, 편광판 1, 슬릿이 있는 화면, 광검출기(광다이오드)를 받침에 고정하시오. 레이저 빛살이 편광판과 화면의 슬릿을 지나 정확히 광다이오드에 떨어지도록 배치를 조정하시오. 빛살 폭 조절 나사 5c로 광검출기 위 빛점의 크기가 약 5–6 mm가 되게 하시오.

레이저는 선편광된 빛을 낸다. 레이저 방향 조절용 고리 5a로, 레이저 빛살이 첫 번째 편광판을 거의 다 지나고 타원 모양 빛점의 긴 축이 연직이 되게 하시오. 이후 레이저와 광검출기의 방향은 나사 5d와 15c로 고정해야 한다. 편광판 2를 설치하시오. 두 편광판이 교차되어 있는지 확인하시오. 그림 4B는 화면을 단 전체 장치를 보여 준다.

파트 2.1. 광다이오드 조사하기 (3.2점)

빛의 세기를 재는 데에는 광다이오드의 기전력을 쓰는데, 이는 입사광 세기 자체의 꽤 복잡한 함수이다. 그래서 빛의 세기를 재려고 그림 2의 회로를 쓴다. 멀티미터로 잰 직류 전압은 입사광 세기와 저항기의 저항에 따라 달라진다. **주된 목표는 저항기에 걸리는 전압이 광다이오드에 입사하는 빛의 세기에 비례하도록 하는 최적의 저항값을 고르는 것이다.**

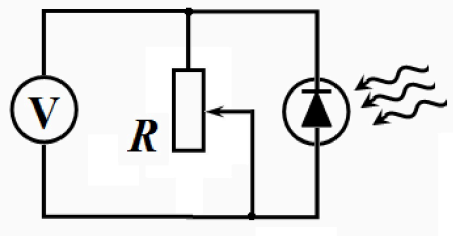


그림 2. 광다이오드 기전력을 재는 회로.

이 파트의 측정에서는 두 번째 편광판과 화면을 광학대에서 치우시오.
빛살의 세기를 줄이는 필터는 반드시 그림 5B처럼 집게로 편광판 뒷면에 고정해야 한다.
측정한 전압의 최댓값은 300 mV 이상이어야 한다.

멀티미터로 저항기의 저항과 저항기에 걸리는 전압을 잴 수 있다(물론 멀티미터의 측정 범위를 알맞게 맞추어야 한다). 주어진 스위치를 알맞은 곳에 넣어, 회로를 끊지 않고 스위치를 닫고 여는 것과 멀티미터 측정 범위 조정만으로 멀티미터 하나로 저항과 전압을 모두 잴 수 있게 하시오.

2.1.1	저항기에 걸리는 전압과 그 저항을 재기 위해 스위치를 넣은 회로를 그리시오. (0.2점)
2.1.2	입사광 세기의 두 값, 즉 최대(필터 수 $n = 0$)와 최소(필터 수 $n = 5$)에 대하여 저항기에 걸리는 전압을 저항의 함수로 측정하시오. 해당 그래프를 한 그림에 그리시오. 두 전압의 차가 최대가 되는 저항 범위를 밝히시오. (1.0점)
2.1.3	광다이오드에 입사하는 빛의 세기를 줄이는 필터의 수 $n = 0, 1, 2, 3, 4, 5$의 함수로 저항기에 걸리는 전압 U를 측정하시오. 측정은 저항을 대략 $R = 30\ \text{k}\Omega$, $R = 20\ \text{k}\Omega$, $R = 10\ \text{k}\Omega$인 세 값에 고정하고 해야 한다. 저항기에 걸리는 전압이 광다이오드에 기록된 입사광 세기에 선형으로 의존하는지 확인할 수 있도록 눈금을 골라 해당 그래프를 한 그림에 그리시오. 위의 세 저항값 가운데 앞으로 빛의 세기를 잴 최적의 값 R_{opt}를 고르시오. (1.0점)
2.1.4	얻은 자료를 써서 필터의 투과율 $\gamma = I_{tr}/I_{inc}$를 계산하고 그 오차를 어림하시오. 여기서 I_{tr}는 투과한 빛의 세기, I_{inc}는 입사한 빛의 세기이다. 필요하면 추가 측정을 해도 된다. (1.0점)

이후 모든 측정은 고른 최적의 저항값에서 해야 한다!
이후 상대 단위의 빛의 세기는 mV 단위의 저항기 전압과 같다고 본다.

파트 2.2 플라스틱 자를 지나는 빛의 투과 (5.4점)

플라스틱 자를 두 편광판 사이에 놓으시오. 자는 손으로 움직일 수 있다. 그다음 슬릿이 있는 화면에 집게로 자를 고정하시오(그림 2B 참조). 자의 아래 가장자리는 화면에 그어진 선과 일치해야 하며, 자의 눈금은 위쪽에 있어야 한다. 주어진 두 자가 모두 복굴절 현상을 보이는지 확인하시오. 빛이 두 자를 모두 지나도록 한 자를 다른 자 위에 포갰을 때 나타나는 모습을 관찰하시오.

이 파트에서는 그림 4B의 광학 배치를 쓰시오. 자가 파트 1.2에서 설명한 위치로 화면에 고정되어 있는지 확인하시오.

2.2.1	투과한 빛의 세기(mV 단위)를 자 위 빛이 입사하는 점의 좌표 x의 함수로 0부터 10 cm까지의 범위에서 측정하시오. 측정은 주어진 각 자와 두 자를 포갠 것에 대해 해야 한다. 각 경우에 전압의 최댓값을 측정하시오. 해당 그래프를 한 그림에 그리시오. (2.0점)
2.2.2	두 자 각각에 대해 x가 0부터 7 cm까지인 범위에서 정상파와 이상파 사이의 위상 이동 $\Delta\varphi$의 값을 계산하시오. 해당 그래프 $\Delta\varphi(x)$를 그리시오. 계산에 쓴 공식을 적으시오. (1.2점) ***위상차는 식 (1)로부터 하나로 정할 수 없으며, 올바르게 정하려면 추가적인 물리적 가정을 해야 함에 주의하시오.***
2.2.3	각 자에 대해 $\Delta\varphi(x)$가 선형이라고 가정하고 $$\Delta\varphi_1 = a_1 x + b_1,$$ $$\Delta\varphi_2 = a_2 x + b_2,$$ 자 1과 자 2에 대한 위 계수들의 수치를 계산하시오. (1.0점)
2.2.4	파트 2.2.1–2.2.3에서 얻은 자료를 써서, 포갠 두 자를 지나는 빛의 세기의 이론값을 계산하시오. 계산에 쓴 공식을 적으시오. 이론적 의존 관계를 파트 2.2.1의 그림에 함께 그리시오. (1.2점)

파트 2.3 액정 셀 (4.5점)

LCC를 지나는 빛의 투과

그림 6B처럼 LCC를 두 편광판 사이에 놓으시오.

조사할 실험적 의존 관계는 매우 비단조적이며 꽤 갑자기 변하는 구간이 있다. 측정할 때 이 점을 고려하시오.
셀 전원의 교류 전압과 광검출기의 직류 전압을 재려면 해당 도선을 멀티미터에 바로 연결하시오.

2.3.1	투과한 빛의 세기를 LCC에 걸린 전압의 함수로 측정하시오. 해당 그래프를 그리시오. (2.0점)
2.3.2	전원 장치를 LCC에서 분리했을 때 정상파와 이상파 사이의 위상차 $\Delta\varphi_0$를 계산하시오. (1.5점)
2.3.3	LCC에 걸린 전압 강하의 충분히 넓은 범위에서, 정상파와 이상파 사이의 위상차는 걸어 준 전압에 다음과 같은 거듭제곱 법칙으로 의존한다. $$\Delta\varphi = CU^{\beta}.$$ 얻은 자료를 써서 위 공식이 적용되는 범위를 정할 수 있는 그래프를 그리고 지수 β를 계산하시오. 그 적용 범위를 밝히고 매개변수 β의 수치를 어림하시오. (1.0점)

파트 2.4. 흰 띠를 지나는 빛의 투과 (3.4점)

파트 1.3에서 설명한 대로 플라스틱 띠를 화면에 고정하시오.

2.4.1	광학계를 지난 빛의 세기를, 띠의 가운데로부터 $\pm 20\ \text{mm}$ 범위에서 빛이 띠에 들어가는 점의 좌표 x의 함수로 측정하시오. 해당 그래프를 그리시오. (1.2점)
2.4.2	휘지 않은 띠를 지나는 정상파와 이상파 사이의 위상 이동 $\Delta\varphi_0$를 계산하시오. $\Delta\varphi_0$는 10π와 12π 사이에 있다고 알려져 있다. (1.2점)

띠의 가운데 근처에서 띠의 모양은 반지름 R인 원호로 근사할 수 있다. 띠의 가운데로부터의 거리 z($z \ll R$)에 대한 위상 이동 $\Delta\varphi$의 이론적 의존 관계는 다음과 같다.

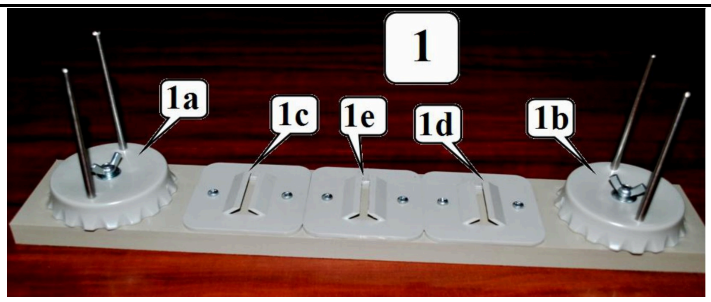
$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_0 \left(1 + \frac{z^2}{2n^2R^2}\right),$$

여기서 $n = 1.4$는 띠 물질의 굴절률이다.

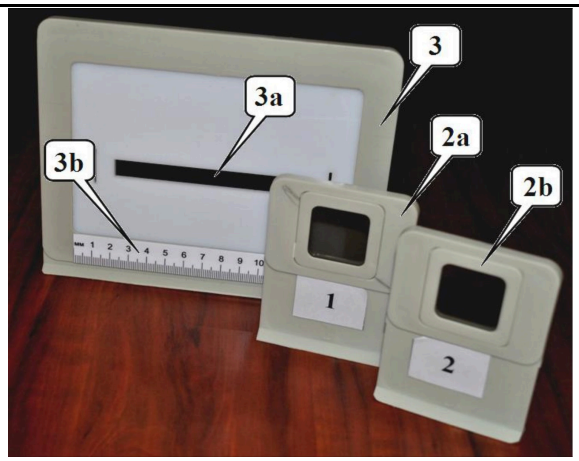
2.4.3	앞 파트들에서 얻은 자료를 써서 띠의 가운데 근처에서 띠의 곡률 반지름 R를 계산하시오. 띠 물질의 굴절률은 $n = 1.4$이다. (1.0점)

실험 경연. 2014년 7월 17일 목요일
부록 A. 실험 장치

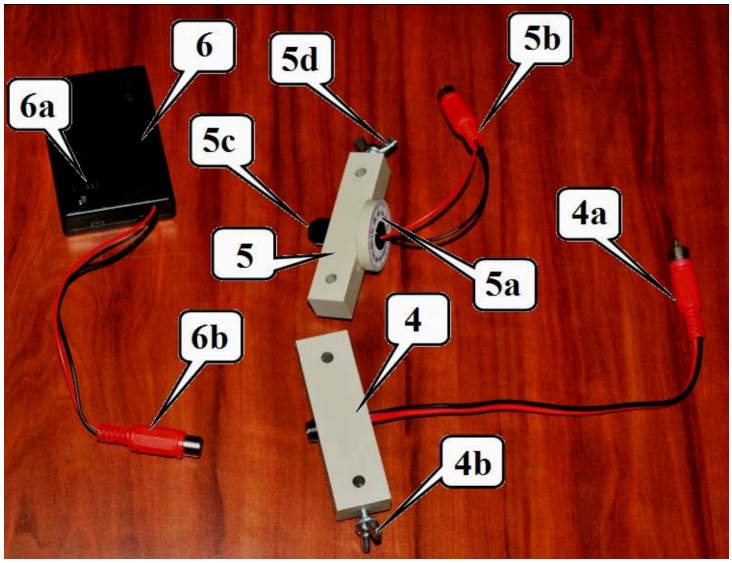
받침이 달린 광학대 1:
1a – 나사가 달린 광원 받침;
1b – 나사가 달린 광검출기 받침;
1c, 1d – 편광판 받침대;
1e – 화면과 액정 셀(LCC) 받침대.



2a, 2b – 받침대에 단 편광판. 앞면에 숫자 1과 2가 있다.
편광판은 앞면이 광원을 향하도록 설치해야 한다!
편광판의 투과면은 수평과 45°를 이룬다.
3 – 슬릿(3a)과 눈금(3b)이 있는 화면

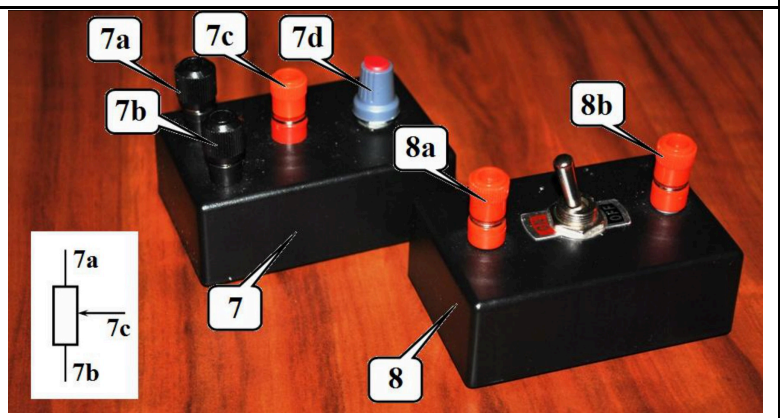


광원:
4 – 발광 다이오드(LED):
4a – 전원 도선;
4b – 고정 나사;
5 – 레이저:
5a – 레이저를 돌리는 눈금 달린 고리(눈금은 쓰지 않음);
5b – 전원 도선;
5c – 앞면의 빛살 폭 조절 나사;
5d – 고정 나사;
6 – 광원용 전원 장치:
6a – 스위치;
6b – 광원용 도선.
측정할 때에만 광원을 켜 두시오!
레이저 빛살을 자신이나 다른 사람의 눈에 겨누지 마시오. 매우 위험합니다!

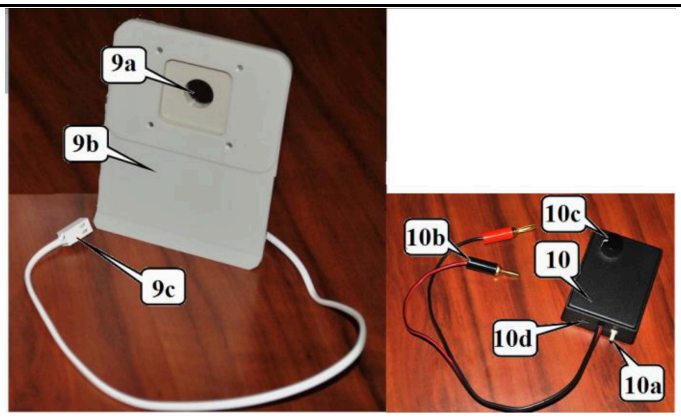


7 – 가변 저항기:
7a, 7b, 7c – 회로에 연결하는 단자
7d – 저항을 바꾸는 손잡이.

8 – 스위치:
8a, 8b – 회로에 연결하는 단자;

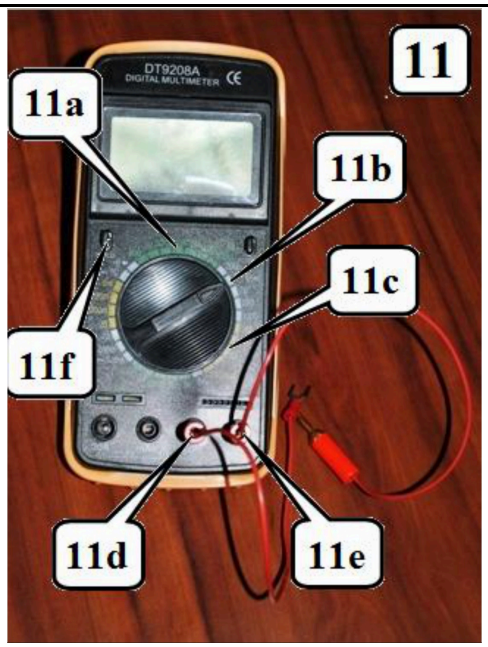


9a – 받침(9b)에 단 액정 셀(LCC) 9a, 9c – 전원에 연결하는 도선;
10 – LCC용 전원 장치:
10a – LCC용 커넥터;
10b – 출력 전압을 재는 도선;
10c – 출력 전압 조절 손잡이;
10d – 전원 켜기/끄기.
측정할 때에만 전원을 켜 두시오!

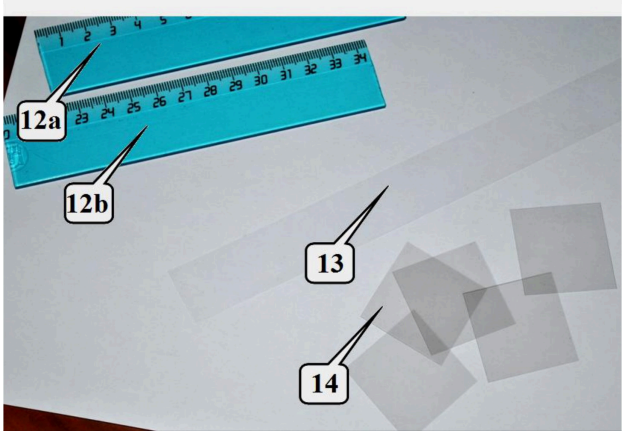


11 – 멀티미터;
HOLD 버튼을 누르지 마시오
11a – 저항 측정 범위(200 kΩ);
11b – 직류 전압 측정 범위(2 V);
11c – 교류 전압 측정 범위(20 V);
11d, 11e – 측정 도선 커넥터;
11f – 전원 켜기/끄기.
멀티미터 화면이 "절전" 모드이면 전원 버튼을 두 번 누르시오!

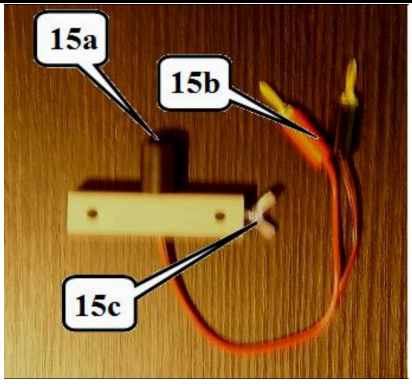
멀티미터로 저항을 잴 때에는 그 소자를 전원 장치에서 분리해야 합니다!



조사할 광학 소자
12 – 플라스틱 자:
12a – 1번(눈금 0–14 cm)
12b – 2번(눈금 20–34 cm)
13 – 휘어지는 띠;
14 – 똑같은 필터 한 묶음;
필터와 띠는 별도의 봉투에 들어 있습니다!
플라스틱 자와 띠는 복굴절을 보이며, 그 광축은 자와 띠 자신의 면 안에 놓여 있다.



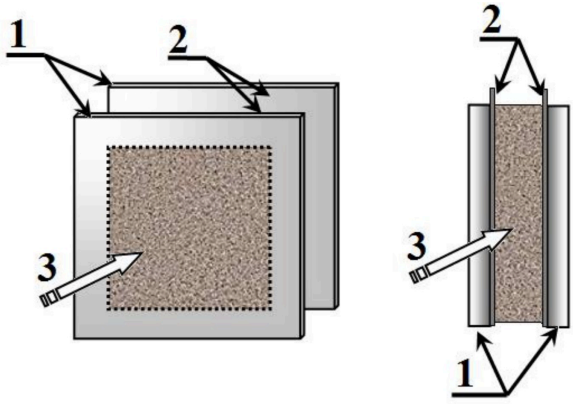
15 광검출기(광다이오드)
15a – 입사 창;
15b – 출력 전압을 재는 도선;
15c – 고정 나사.



연결 도선, 집게, 종이 냅킨, 종이 한 장.

액정 셀은 안쪽 면에 투명 전도층 2를 입힌 두 유리 판 1로 이루어져 있다. 두 판 사이에는 액정 상태에 있는 용액 3의 얇은(약 10 μm) 층이 있다. 교류 전원에 연결하도록 판에 도선이 납땜되어 있다. 전압이 없을 때 액정의 긴 분자들은 판에 나란하게 놓인다. 분자가 놓인 방향은 결정의 광축과 일치한다.

광학 소자에서 빛이 지나가는 부분은 되도록 만지지 마시오! 필요하면 종이 냅킨으로 닦으시오!



부록 B. 실험 장치 사진



그림 1B 자의 복굴절 관찰 장치



그림 2B 화면에 단 자

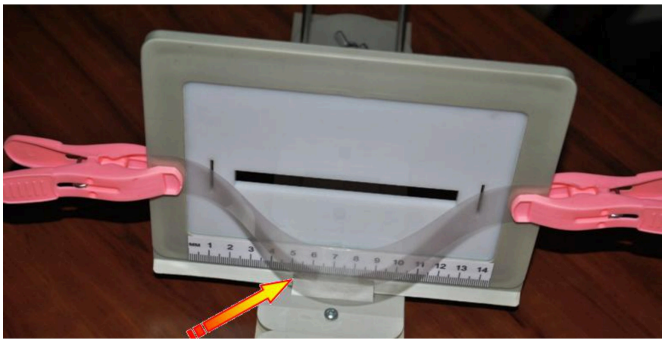


그림 3B 휘어지는 플라스틱 띠를 화면에 고정하기.

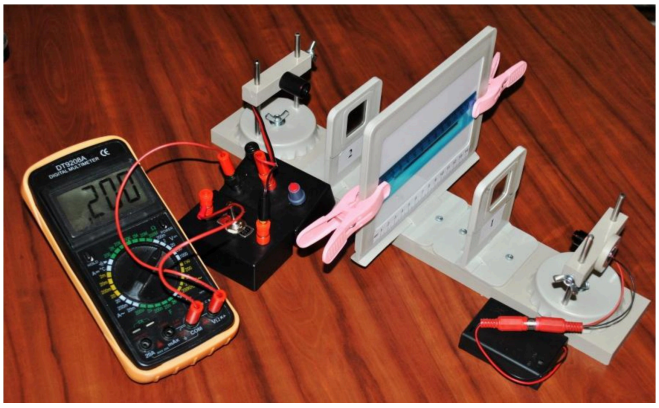


그림 4B 플라스틱 자를 지나는 빛의 투과율을 재는 장치

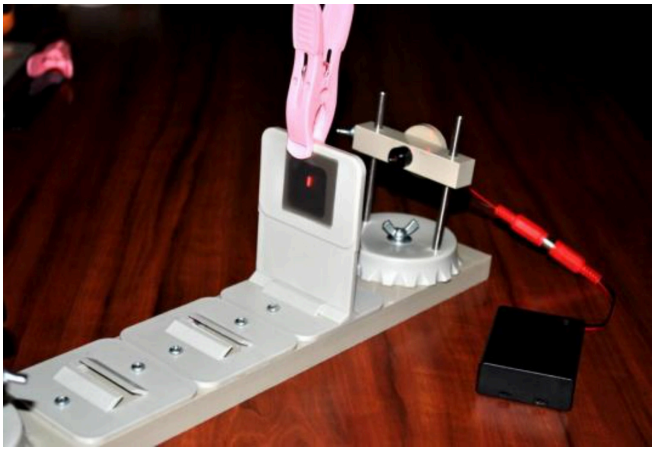


그림 5B 편광판에 단 필터

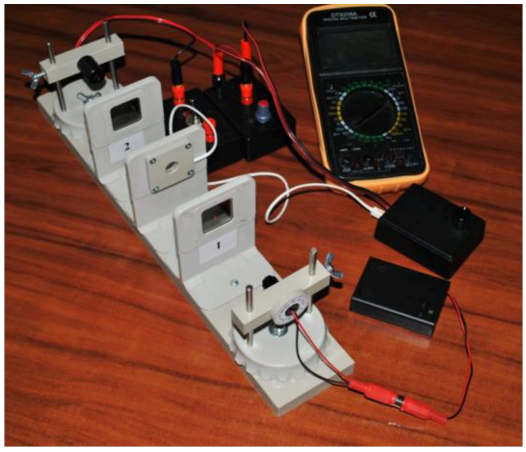


그림 6B LCC의 특성을 재는 장치