

**Исмагилов Ильдар Ринатович**

*учащийся, Государственное бюджетное негосударственное образовательное  
учреждение Аничков лицей, г. Санкт-Петербург*

**Анухин Павел Михайлович**

*учитель физики, Государственное бюджетное негосударственное образовательное  
учреждение Аничков лицей, г. Санкт-Петербург*

## **ЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЕ В МЕХАНИЧЕСКИ ДЕФОРМИРОВАННОМ ПОЛИЭТИЛЕНЕ**

**Аннотация.** В статье рассматривается анизотропия полиэтилена заводского производства и оценка оптического фазового сдвига для исходного и деформированных образцов. Установлены зависимости освещенности от взаимного расположения пленки и анализатора. Эти зависимости показали достаточную точность, исходя из них оценены фазовые сдвиги колебаний обыкновенного и необыкновенного лучей при прохождении через полиэтиленовую пленку разной степени механической деформации. Выведена формула для оценки степени эллиптичности поляризации света, прошедшего через среду полиэтилена, и успешно применена к нескольким образцам.

**Ключевые слова:** полиэтилен, двойное лучепреломление, анизотропия, поляризация света, фазовый сдвиг.

**Abstract:** The article examines the anisotropy of factory-produced polyethylene and assesses the optical phase shift for the original and deformed samples. Dependencies between the illumination and the relative position of the film and the analyzer have been established. These dependencies demonstrated sufficient accuracy; based on them, the phase shifts of the oscillations of the ordinary and extraordinary rays passing through polyethylene film with varying degrees of mechanical deformation were estimated. A formula for assessing the degree of ellipticity of light polarization passing through the polyethylene medium has been derived and successfully applied to several samples.

**Keywords:** polyethylene, birefringence, anisotropy, light polarization, phase shift.

**Введение.** Эффект двойного лучепреломления является важной и активно используемой частью оптики и широко используется в поляризационных приборах, электронике, например жидкокристаллических дисплеях, строительстве и машиностроении для анализа напряжений [1, 2, 3]. Характер двойного лучепреломления может значительно отличаться между разными состояниями одного и того же вещества, в частности, при разном механическом воздействии [4, 5]. Одним из распространенным и доступным укрывным материалом для парников в России является полиэтиленовая пленка. Двойное лучепреломление, вызванное сильным натяжением пленки, может приводить к локальному искажению светового потока, создавая зоны перегрева на листьях растений [6, 7]. Поэтому исследования лучепреломления необходимы в промышленном мониторинге на производстве полиэтиленовых пленок [6]. В этой связи выявление эффекта двойного лучепреломления света в полиэтилене при его различных механических деформациях, актуально.

**Объект и методика исследований.** Объектом исследования была полиэтиленовая пленка. Сама пленка является вырезкой из неармированной пленки для парника – ПВД без добавок для защиты от ультрафиолета толщиной 100 мкм, продающегося под торговой маркой «PlenkaMaster». Изучали три образца пленки разной степени деформации. Первый образец – без деформации, второй и третий – разной степени деформации. Для получения деформированных пленок полиэтилена проводили вытяжку ее собственной силой к его концам, прикрепленным к прямым стержням перпендикулярно направлению растяжения. Первый деформированный образец был получен растяжением вдоль направления заводской вытяжки, длина была увеличена с 2 см до 6 см (на 200%), ширина изменилась неоднородно, в центре с 3 см до 1,8 см, по краям с 3 см до 1,5 см. Второй деформированный образец также был получен вышеуказанным путем. В

результате его длина изменилась с 2 см до 10 см (на 400%), а ширина изменилась с 3 см до 1,2 см.

Исследования оптических свойств полиэтилена проводили на созданной нами установке. Установка представляет собой кодоскоп, над которым по центру стеклянной пластины на небольшом расстоянии от нее, перпендикулярно поверхности, закреплен цифровой датчик освещённости (рисунок 1). Таким образом датчик света находится на одном перпендикуляре к поверхности с лампой кодоскопа. На стеклянную пластину размещали линейный поляризатор, поверх него образец полиэтилена, поверх всего еще один линейный поляризатор, при этом разместив его таким образом, чтобы оси поляризации этих поляризаторов были скрещены. Поворачивали полиэтилен между поляризаторами, сохраняя шаг в  $5^\circ$  и измеряя показания датчика при каждом расположении пленки. Данный метод был использован в исследовании всех трех образцов,

В качестве средства измерения угла между осями поляризации исследуемых материалов использовали транспортир, так как его точность приемлемая в данных условиях. Датчик света подключён к компьютеру и выводит результаты замера на монитор. Использовали линейные поляризаторы, полученные из дисплеев компьютерных мониторов. Они используются в высокотехнологичных устройствах и их качество более чем устраивает точности проведения исследований.

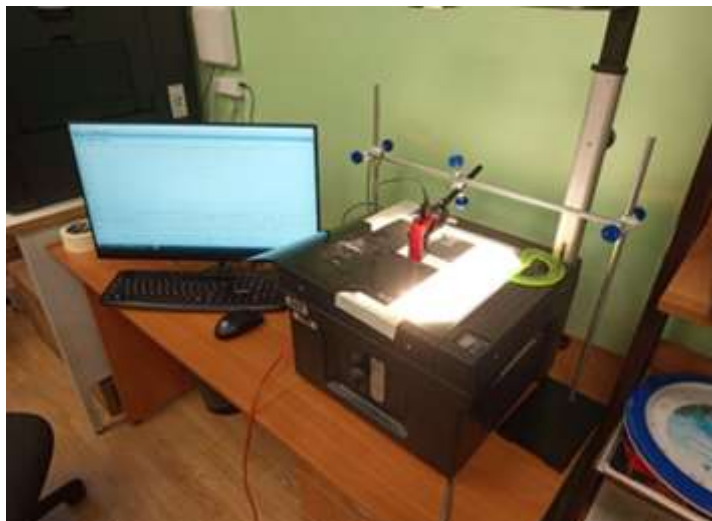


Рисунок 1. Установка для исследования двойного лучепреломления в полиэтилене

**Результаты исследования.** Исследования показали, что освещенность зависит от угла преломления луча (рисунок 2). Это означает, что полиэтилен не является изотропным и не поляризует линейно, следовательно, он обладает свойствами анизотропности и имеет эллиптическую поляризацию.

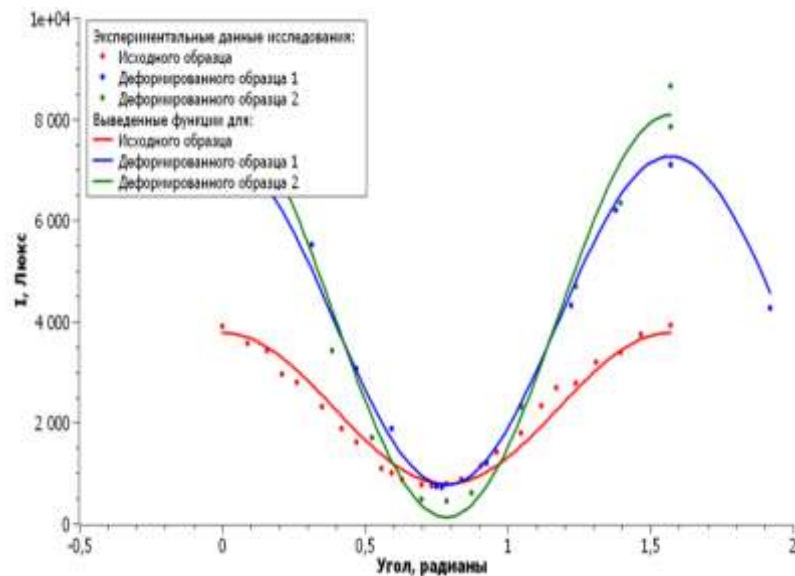


Рисунок 2. Зависимость освещенности от угла преломления луча

Рассмотрим, как менялась поляризация света по ходу прохождения полиэтиленовой пленки разной степени механической деформации. На рисунке 3, представлена схема изменения векторов напряженности света в разных моментах пути, а именно при прохождении поляризатора ( $E_0$ ), полиэтилена ( $E_{\perp}$  и  $E_{\parallel}$ ) и анализатора (проекции двух предыдущих векторов на ось поляризации). При измерениях за  $\alpha$  брался угол между направлением вытяжки полиэтилена (прямая  $AE$ ) и горизонтальной пунктирной прямой ( $AH$ ). Направления линейной поляризации находятся под углом  $45^\circ$  к горизонтальной прямой ( $BF$  и  $AD$ ). Изначально проекция напряженности света на ось поляризатора равна:

$$E_1 = E_0 \cdot \cos(\omega t),$$

где  $E_1$  - проекция вектора напряженности;

$E_0$  - амплитуда вектора напряженности;

$\omega$  - фазовая частота;

$t$  - время.

После прохождения пленки вектор напряженности будет раскладываться на вектора по двум осям: оси вытяжки полиэтилена и перпендикулярной ей оси в плоскости. Но поскольку коэффициенты преломления для обычного и необыкновенного лучей отличаются, за время прохождения пленки появится набег фазы. Тогда:

$$E_{\parallel} = E_0 \cdot \cos(45^\circ - \alpha) \cdot \cos(\omega t),$$

$$E_{\perp} = E_0 \cdot \cos(45^\circ + \alpha) \cdot \cos(\omega t + \varphi),$$

где  $\varphi$  - сдвиг фаз между лучами.

После прохождения анализатора светом его проекция вектора напряженности на ось анализатора будет равна сумме проекций векторов напряженности после прохождения полиэтилена на ось анализатора. Таким образом:

$$E_2 = E_{\perp} \cdot \cos(45^\circ - \alpha) - E_{\parallel} \cdot \cos(45^\circ + \alpha),$$

где  $E_2$  - проекция вектора напряженности на ось анализатора после прохождения самого анализатора.

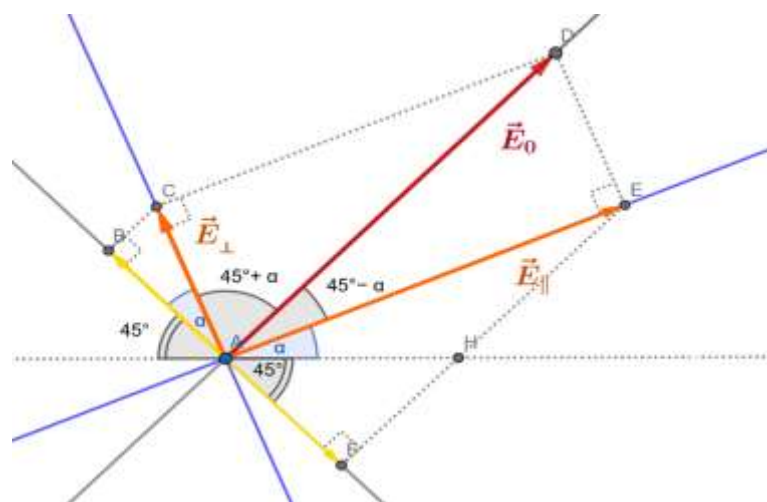


Рисунок 3. Поляризация света

$$E_2 = E_0 \cdot \cos(2\alpha) \cdot \sin(\frac{\varphi}{2}) \cdot \sin(\omega t + \frac{\varphi}{2}),$$

где  $\varphi$  — показывает фазу колебания, а  $E_0$  — амплитуду вектора  $E_2$ .

Используя формулу  $I = \frac{1}{2} c n \varepsilon E_0^2$  выразим I

$$I = k E_0^2,$$

где  $k = \frac{1}{2} c \varepsilon n$

Исходя из этой формулы, мы можем посчитать множитель и таким образом оценить фазовый сдвиг  $\sin^2(\frac{\varphi}{2})\varphi$

Подставляя в формулу данные, полученные в этом эксперименте, находим для исходного образца:

$$\sin\left(\frac{\varphi_1}{2}\right) = \sqrt{\frac{I_3}{I_2 \cdot \cos^2(2\alpha)}} = \sqrt{\frac{3900 - 350}{(20000 - 350) \cdot \cos^2(0^\circ)}} = 0,425$$

Аналогично с первым и вторым деформированными образцами:

$$\sin\left(\frac{\varphi_2}{2}\right) = \sqrt{\frac{I_4}{I_2 \cdot \cos^2(2\alpha)}} = \sqrt{\frac{7100 - 350}{(20000 - 350) \cdot \cos^2(0^\circ)}} = 0,586$$

$$\sin\left(\frac{\varphi_3}{2}\right) = \sqrt{\frac{I_5}{I_2 \cdot \cos^2(2\alpha)}} = \sqrt{\frac{8600 - 350}{(20000 - 350) \cdot \cos^2(0^\circ)}} = 0,648$$

Таким образом, фазовый сдвиг составил исходного недеформированной полиэтиленовой пленки 0,425, первой деформированной пленки – 0,586 и второй – 0,648.

**Заключение.** Геометрически были выведены зависимости освещенности от взаимного расположения пленки и анализатора. Эти зависимости показали достаточную точность, поэтому исходя из них были оценены фазовые сдвиги колебаний обыкновенного и необыкновенного лучей при прохождении через полиэтиленовую пленку разной степени механической деформации. Выведена формула для оценки степени эллиптичности поляризации света, прошедшего через среду полиэтилена, и успешно применена к нескольким образцам.

### Список литературы

1. Борн М., Вольф Э. Principles of Optics. Москва: Наука, 1973. 721 с.
2. Ландсберг Г.С. Оптика. Москва: Физматлит, 2010. 848 с. ISBN 978-5-9221-0314-5.
3. Алмазбеков К.А., Козырев А.Г. Перестраиваемые оптические фильтры на тонких пленках // Аллея науки. 2018. Т. 4, № 6(22). С. 592-596.
4. Изменение напряженно-деформированного состояния неплоских полос при упруго-пластическом растяжении / Е.А. Руденко, С.В. Закарлюка, Ю.И. Юрченко [и др.] // Моделирование и развитие процессов ОМД. 2018. № 4(27). С. 26-32.

5. Исследование распределения силы двойного лучепреломления ориентированной анизотропной пленки СВМПЭ в двух ортогональных направлениях / Г.В. Букин, К.Г. Букина, А.П. Борзенко [и др.] // Физика и техника высоких давлений. 2024. Т. 34, № 4. С. 110-116.
6. Шах В. Справочное руководство по испытаниям пластмасс и анализу причин их разрушения. Санкт-Петербург: Научные основы и технологии. 2009. 732 с.
7. Долгополов И.С., Сюй А.В. Поляризация света при отражении от анизотропной среды // Бюллетень научных сообщений. 2018. № 23. С. 37-43.