

Лабораторная работа

Исследование поляризации света с помощью 3D-очков

Введение

Из курса электромагнетизма известно, что решение уравнений Максвелла для бегущей плоской электромагнитной волны в вакууме (и в любой другой линейной изотропной среде) можно разложить на сумму двух решений с перпендикулярной друг другу линейной поляризацией электромагнитных волн, в каждой из которых напряжённости электрического и магнитного полей \mathbf{E} и \mathbf{H} и направление распространения волны \mathbf{S} представляют собой правую тройку векторов. Направлением поляризации линейно поляризованного света принято считать направление колебаний вектора \mathbf{E} , плоскостью поляризации называют плоскость (\mathbf{E}, \mathbf{S}) .

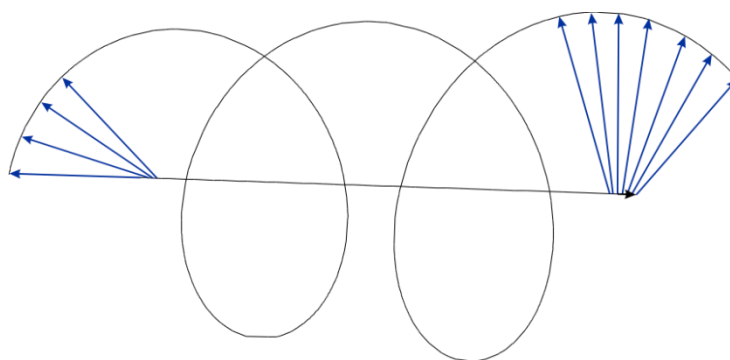


Рис. 1. Левая круговая поляризация света.

Поля $E_x(t)$ и $E_y(t)$ монохроматической электромагнитной волны имеют вид:

$$E_x(t) = E_{0x} \cos(\omega t + \varphi_1), \quad E_y(t) = E_{0y} \cos(\omega t + \varphi_2)$$

В зависимости от соотношения между амплитудами и начальными фазами этих векторов, волна будет иметь линейную, эллиптическую или круговую поляризацию. Для наблюдателя смотрящего навстречу распространению волны, в оптике принято правой и левой круговой/эллиптической поляризацией называть случаи, когда вектор поля \mathbf{E} вращается по и против часовой стрелки, соответственно. Математически это соответствует случаям $\sin(\varphi_2 - \varphi_1) > 0$ для правой (положительной) эллиптической поляризации и $\sin(\varphi_2 - \varphi_1) < 0$ для левой (отрицательной) эллиптической поляризации.

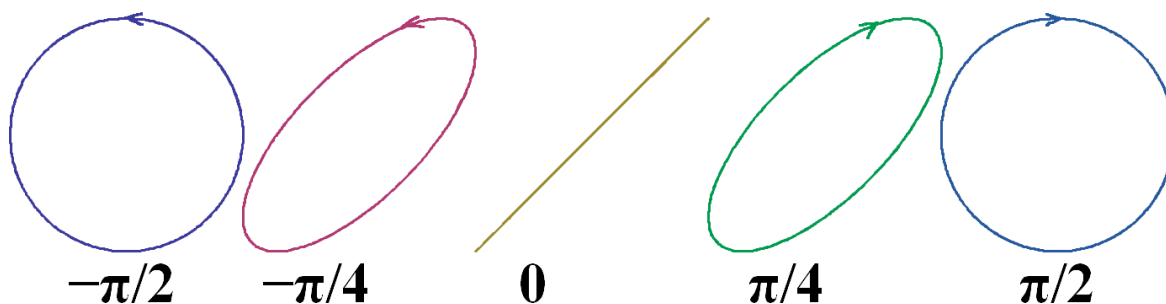


Рис. 2. Эллипсы поляризации при равных амплитудах E_{0x} и E_{0y} в зависимости от $\varphi_2 - \varphi_1$.

Естественный свет на очень малых масштабах времени также может представлять собой поляризованную волну. Однако, на характерных временах наблюдения вектор электрического поля хаотично меняет своё направление и амплитуду, не обладая никакой определённой поляризацией.

Весьма полезным для описания оптических систем оказывается математический факт, что любой эллиптически поляризованный свет можно представить как суперпозицию лево- и право циркулярно поляризованного света (круговая поляризация), либо на сумму линейных поляризаций по любым непараллельным друг другу осям. Доказательство этого факта представляется читателю в качестве упражнения, можно только отметить что эллиптически поляризованный свет представляется как сумма двух линейных компонент вдоль главных осей эллипса с разницей фаз $\pi/2$, каждая же из линейных компонент может быть представлена как суперпозиция двух круговых поляризаций, либо как сумма линейных поляризаций по любым двум осям.

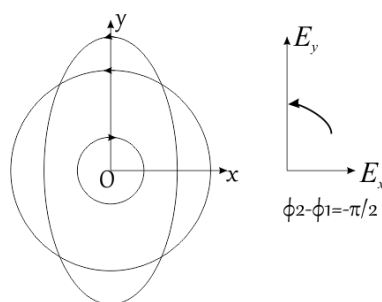


Рис. 3. Представление эллиптически поляризованного света как суперпозиции круговых или линейных поляризаций.

Довольно очевидным является закон Малюса. Интенсивность линейно поляризованного света после прохождения через идеальный поляризатор умножится на коэффициент $\cos^2\varphi$, где φ – угол между направлением поляризации света и разрешённым направлением поляризатора. Он следует из того, что начальную волну можно представить как сумму двух линейно-поляризованных волн по осям поляризатора с амплитудами $E_1 = E_0 \cos \varphi$, $E_2 = E_0 \sin \varphi$, из которых пройдёт только первая компонента, а значит отношение интенсивностей $I/I_0 = E_1^2/E_0^2 = \cos^2 \varphi$.

Как известно из курса оптики, свет отражённый от гладкой поверхности приобретает частичную поляризации. Если падение из среды 1 на границу раздела сред 1 и 2 происходит под углом Брюстера $\text{tg } \theta = n_2/n_1$, то отражённый свет полностью линейно поляризован, при этом отражается только компонента с линейной поляризацией параллельной плоскости зеркала. Это самый простой способ получить поляризованный свет, но обладающий рядом очевидных недостатков (очень небольшая часть света отражается, поляризуется только свет, приходящий под определённым углом, часто поверхность является частично матовой). Также прошедший через такую пластинку свет приобретёт частичную поляризацию. Объединив много пластинок в стопу Столетова, можно получить полностью поляризованный отражённый луч значительно большей интенсивности, и почти полностью поляризованный прошедший луч.

Другим способом получения поляризованного света является использование двулучепреломления в кристаллах. Анизотропия оптических свойств таких кристаллов

позволяет выделить главные направления, совпадающие с главными осями эллипсоида диэлектрической проницаемости, при поляризации света вдоль которых свет будет сохранять поляризацию, но показатель преломления будет различным (n_1 и n_2). При преломлении или отражении в таких кристаллах луч, падающий под углом к поверхности, разделится на два луча. На основе таких кристаллов создаются призмы, в обиходе называемые николями, состоящие из двух разнородных клинов. При прохождении через такую призму, один из лучей полностью отразится на границе между клинами, либо лучи разделятся настолько, что их можно будет использовать отдельно.

Двойкопреломляющие кристаллы могут обладать дихроизмом – отличающимися показателями затухания света для двух поляризаций. В этом случае кристалл правильной толщины будет пропускать только одну поляризацию, а вторая практически полностью затухнет. Это эффект используется для производства классической плёнки Поляроид, являющейся основой большинства недорогих поляризаторов.

Пластинка из двойкопреломляющего кристалла будет также вносить разность фаз между волнами разных поляризаций. Если эта разность фаз равна $\pi/2$, то это пластинка в четверть длины волны. Она интересна тем, что превращает линейно поляризованную волну с направлением поляризации под углом 45° к главному направлению пластинки в круговую поляризацию (левая или правая поляризация зависит от того, в какую сторону направлены эти 45°), если угол отличен от 45° , то из линейной поляризации можно получить произвольную эллиптическую, а круговая поляризация превратится в линейную с направлением поляризации $\pm 45^\circ$. Также используются пластинки в половину длины волны (для поворота направления поляризации) и в длину волны (для определения главного направления с большей скоростью распространения волны).

Оборудование

Для работы потребуются две пары обычных 3D-очков для технологии RealD 3D, используемой в абсолютном большинстве кинотеатров, зеркало, гладкий стеклянный предмет, матовый предмет, поверхность воды, целлофановая плёнка, телефон, LCD экран (подойдёт большинство экранов ноутбуков, планшетов, телевизоров и других мониторов), транспортёр, для бонусных заданий – сахар, прозрачный стеклянный сосуд (желательно, с плоскими гранями), линейка, лимонная, уксусная или любая другая кислота.

Задание

1. Наденьте 3D-очки. Посмотритесь в зеркало. По очереди закройте левый и правый глаза, переверните 3D-очки дужками наружу и повторите опыт.
2. Сложите две пары 3D-очков вместе в разных ориентациях и покрутите друг относительно друга. Две пары очков можно ориентировать несколькими способами друг относительно друга, чтобы погасить даже естественный свет. При ориентации внутренними частями навстречу друг другу перпендикулярно, получается абсолютно чёрный цвет, однако если сложить их внешними частями, то небольшая часть света пройдёт, приобретя некоторый оттенок, зависящий от угла поворота очков друг относительно друга.
3. Посмотрите через 3D очки на LCD-экран (на котором показывается какое-то изображение, удобно работать с белым) в обеих их ориентациях (дужками внутрь и

- наружу). Покрутите их. Если ни в одной из ориентаций вы не увидели полного затемнения экрана, значит вам нужно поискать экран подешевле.
4. Опишите и объясните наблюдаемые явления. Для начала попробуйте придумать сами оптическую схему очков. В Интернете несложно найти подробное описание технологии, которое поможет вам проверить свои выводы.
 5. Используя одну пару очков и LCD экран, как источник линейно поляризованного света, проверьте экспериментально выполнение закона Малюса. Для измерения интенсивности прошедшего света можете использовать камеру телефона (сами придумайте, как её откалибровать, либо для простоты положите интенсивность пропорциональной яркости пикселей на фото).

Альтернативный способ измерения интенсивности светового потока состоит в использовании встроенного в телефон датчика освещенности. Считать с него показания можно при помощи приложения «Люксметр» (андроид) или аналогичного. Датчик расположен на той же стороне, что и экран. Чтобы его локализовать нужно закрывать различные части экрана при включенном приложении и установить, какую область экрана надо закрыть, чтоб показания ушли в ноль. Можно, конечно, постараться скачать подробное описание модели именно Вашего телефона.

6. Определите направление поляризации света после прохождения через очки. Для этого вам нужно будет использовать знание того факта, что естественный свет, отразившись под углом Брюстера от гладкого предмета, становится полностью поляризованным в направлении, параллельном поверхности предмета (или перпендикулярном плоскости падения). Также, измерив этот угол, определите коэффициенты преломления стекла и воды. Проведите наблюдения света, отражённого от произвольного матового предмета и оцените его поляризацию.
7. Как вы увидели в п. 2, две пары очков можно ориентировать несколькими способами друг относительно друга, чтобы погасить даже естественный свет. Попробуйте внести кусочек целлофана или другого пластика, а также, если у вас есть, обычные очки с пластиковыми линзами между двумя парами так сориентированных 3D-очков. Найдите интересные эффекты и объясните их.
8. * Дополнительное задание 1.
Некоторые вещества, обладающие хиральностью молекул, будут поворачивать плоскость поляризации прошедшего через них линейно поляризованного света. Простейшим примером такого вещества является сахар, удобнее всего с ним работать в форме раствора. Предлагается измерить поворот плоскости поляризации раствором сахара и проверить его линейную зависимость от концентрации сахара в растворе. Для этого нужно пропускать поляризованный свет через раствор известной толщины и поворачивая линейный фильтр очков навстречу раствору находить угол минимальной интенсивности света, т.е. когда плоскость поляризации

будет перпендикулярна направлению фильтра. Измерив этот угол и сравнив его с углом для чистой воды, вы найдёте искомый угол поворота.

9. ** Дополнительное задание 2.

Сахароза, растворённая в воде разлагается на фруктозу и глюкозу (процесс инверсии сахара), причём скорость реакции увеличивается на порядки в присутствии ионов H^+ : сахар + вода = глюкоза + фруктоза. Так как концентрация воды является практически постоянной и процесс инверсии сахара практически необратим, можно описать его реакцией первого порядка с помощью дифференциального уравнения $dn/dt = -k \cdot n$, где n – концентрация сахара, а k – константа реакции, зависящая от температуры и концентрации H^+ . Решением уравнения будет $n = n_0 \cdot \exp(-t/k)$. Так как у продуктов реакции суммарная оптическая активность имеет другой знак, то поворот плоскости поляризации раствором поменяет знак, и зависимость его от времени будет представлять собой характерную сигмоидальную кривую. По этой кривой предлагается определить коэффициент скорости реакции для какой-то концентрации кислоты в растворе (предлагается использовать концентрацию ионов H^+ 1-8 Моль/л).

10. ** Дополнительное задание 3.

В наши непростые времена весьма полезно пить чай с лимоном. Попробуйте пронаблюдать процесс инверсии сахара в горячем чае при добавлении лимона. Вместо чая удобно будет использовать горячую воду.

11. ** Дополнительное задание 4.

В скрещенных поляризаторах можно снять красивые видео, на которых будут видны напряжения в веществе при его анизотропном сжатии, либо, например, процесс растворения сахара в воде. Можете попробовать снять своё такое видео.

Примечание: красивые фотографии в отчёте, иллюстрирующие ход работы, будут приветствоваться. Также не забывайте про графики и оценки погрешности результатов.

Контрольные вопросы

1. Почему 3D-очки, ориентированные внешними сторонами навстречу друг другу, пропускают часть света, изменив его цвет? Если повернуть их так, чтобы свет шёл не совсем нормально, цвет света также изменится. Объясните наблюдаемые эффекты.
2. Почему в технологии RealD 3D приходится использовать дорогие серебряные экраны?
3. Каковы преимущества и недостатки технологии 3D, используемой IMAX, где в качестве очков выступают линейные поляризаторы. Почему в поляризационных фильтрах для фотокамер используются такие же двухслойные системы вместо линейных фильтров?
4. Какие эффекты при фотографировании можно получить с помощью поляризационного фильтра?
5. Как с помощью ваших 3D-очков проверить, является ли свет источника поляризованным, и какой именно поляризацией обладает (полной или частичной)?
6. Почему направление линейной поляризации света в современных поляриметрах определяется при положении фильтра, при котором интенсивность прошедшего света достигнет некоторой средней величины, а не минимума или максимума?
7. Покажите, что для угла Брюстера отражённый и преломлённый лучи взаимно перпендикулярны.
8. Какой будет поляризация естественного света после прохождения через пластинку в четверть длины волны?
9. Как с помощью размеченной пластинки в длину волны найти главное направление пластинки в четверть длины волны, которому соответствует более быстрая волна?
10. Можно ли превратить луч естественного света в поляризованный луч с потерей менее половины интенсивности?

11. Почему свет от вечернего неба поляризован?

Список литературы

1. Сивухин Д. В. Оптика//Общий курс физики //М.: Физматлит. – 2006. – Т. 4. – 792 С.
2. Практикум по физической химии / под ред. С.В. Горбачева// – М.: Высшая школа, 1974. – 496 С. (С. 354).
3. Лабораторный практикум по общей физике. Т. 2: Оптика / под ред. А. В. Максимычева// М.: МФТИ. – 2014. – 445 С.
4. https://youtu.be/4A_6ghkQc9g Поляризация света. Леннаучфильм. – 1981.