

Поляризация света. Простейшие опыты

А.МИТРОФАНОВ

СЕЙЧАС ИЗВЕСТНО, ЧТО СВЕТ – ЭТО электромагнитные волны, причем волны поперечные: бегущая в пространстве со скоростью света c электромагнитная волна с частотой ν и длиной волны λ ($\lambda = c/\nu$) описывается взаимно перпендикулярными векторами напряженности электрического поля \vec{E} и магнитной индукции \vec{B} . Векторы \vec{E} и \vec{B} перпендикулярны направлению распространения (скорости \vec{c}) и изменяются во времени синхронно.

Здесь нас будет интересовать вопрос, как экспериментально установить, что свет это волны поперечные, а не продольные, т.е. проверить справедливость гипотезы, высказанной, видимо, впервые в 1757 году английским физиком Робертом Гуком (она была подтверждена в дальнейшем в работах Т.Юнга, О.Френеля, Дж.К.Максвелла и других ученых).

Рассмотрим сначала классический опыт, который при желании можно повторить самим. Предположим, что у нас есть стеклянная пластинка с гладкой плоской поверхностью PP' , т.е. зеркало (рис.1). Пусть узкий луч AB от какого-либо яркого источника, например от Солнца или фонаря, падает на зеркало и отражается от него (α – угол падения луча на зеркало, отсчитываемый от нормали к зеркалу и равный углу отражения). Далее, пусть отраженный луч BC падает на второе такое же стекло NN' , которое можно вра-

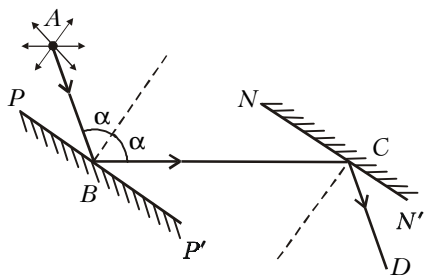


Рис.1. Схема опыта Малюса по отражению света от двух стеклянных поверхностей

щать вокруг оси BC . Оказывается, что при одном и том же угле падения луча на второе стекло интенсивность зеркально отраженного стеклом света зависит от положения плоскости падения луча (плоскости, содержащей луч и нормаль к поверхности стеклянной пластинки, проведенную из точки падения луча на поверхность): если плоскость PP' параллельна NN' , интенсивность отраженного света наибольшая, при развороте NN' на прямой угол интенсивность минимальная, а когда угол падения равен примерно 56° (для стекла), свет практически не отражается от второго стекла. Геометрия этого опыта такова, что поперечную анизотропию отражения можно объяснить, только предположив поперечность колебаний в световой волне. Для продольных волн разворот плоскости падения вокруг оси, совпадающей с направлением падающего луча, никак бы не сказался на интенсивности отраженного света.

Почему же изменяется интенсивность света, отраженного от второй пластинки? Естественный свет (у нас это солнечный луч или луч от фонаря) симметричен по отношению к направлению распространения, т.е. все направления для вектора \vec{E} в волне равноправны в плоскости, перпендикулярной направлению распространения. Говорят, что естественный свет не поляризован. Поперечная анизотропия световых волн, или по-другому *поляризация света*, появляется, например, при его отражении, как в рассматриваемом нами опыте. При угле падения около 56° отраженная часть света оказывается почти полностью поляризованной: электрический вектор \vec{E} в отраженной световой волне занимает определенное положение, а именно – он перпендикулярен плоскости падения светового луча на стеклянный образец. Плоскость, содержащую вектор \vec{E} и вектор направления распространения

волны, принято называть плоскостью поляризации, а такой свет – *линейно поляризованным* или *плоскополяризованным*.

Автором рассмотренного опыта был французский ученый Этьен Луи Малюс. Поляризацию света при отражении Малюс обнаружил впервые в 1808 году, когда наблюдал за отражением света от окна Люксембургского дворца в Париже с помощью двоякопреломляющего кристалла исландского известкового шпата (CaCO_3). Этот кристалл послужил Малюсу анализатором поляризации. При повороте кристалла вокруг направления луча, отраженного под большим углом от окна, Малюс заметил, что интенсивность двух получающихся изображений периодически изменяется. Следует сказать, что именно с обнаружения двойного лучепреломления (Э.Бартолин, 1669г.) ведут свое начало исследования, приведшие к открытию поляризации света (Х.Гюйгенс, 1690 г.).

В 1812 году шотландский физик Дэвид Брюстер установил закон, связывающий угол полной поляризации при отражении ϕ_B (угол Брюстера) и коэффициент преломления материала n :

$$\text{tg } \phi_B = n.$$

Согласно этому закону, отраженный и преломленный лучи перпендикулярны друг другу (рис.2). При этом достигается почти полная поляризация для отраженного света, а направление вектора \vec{E} в отраженной световой волне, как сейчас известно, перпендикулярно плоскости падения.

Закон Брюстера непосредственно следует из простых, правда более поздних, модельных представлений, описывающих прохождение света через плоскую границу вещества. По этим представлениям, отраженная от прозрачной изотропной среды с коэффициентом преломления n световая волна есть результат излучения вынужденных колебаний электронов атомов среды, которые становятся источниками

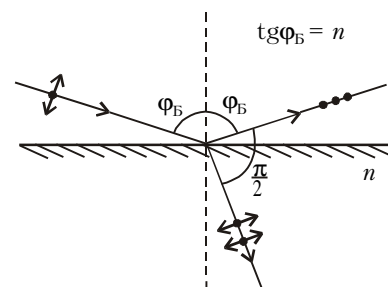


Рис.2. Отражение света под углом Брюстера

вторичных волн при падении света на образец. Направление колебаний электронов совпадает с направлением вектора \vec{E} в преломленной световой волне, т.е. оно перпендикулярно направлению распространения света в среде. Вынужденное колебательное движение электронов можно рассматривать как суперпозицию колебаний в плоскости падения и в перпендикулярном ей направлении – ведь исходная волна не поляризована. Так как ансамбль колеблющихся электронов, или электрических диполей, не излучает в направлении своего движения (подумайте, почему), то при падении света на плоский образец под углом Брюстера, когда $\text{tg } \varphi_B = n$, отраженный и преломленный лучи составляют прямой угол и отраженная волна возникает только из-за излучения электронов, колеблющихся перпендикулярно плоскости падения света. В результате вектор \vec{E} в отраженной волне тоже перпендикулярен плоскости падения. Если же на образец диэлектрика под углом φ_B падает изначально поляризованный свет и плоскость поляризации совпадает с плоскостью падения, то свет не отражается от образца.

Модельные представления и выводы теории очень полезны в физике. Но нельзя ли было выполнить прямой эксперимент, чтобы ответить на вопрос, как ориентирован вектор \vec{E} в поляризованной при отражении световой волне по отношению к плоскости падения света? Для ученых XIX века это было сделать непросто, так как длина световой волны λ очень мала. Споры и обсуждения продолжались больше 50 лет, пока не был поставлен прямой опыт (О.Винер, 1890 г.), в котором было доказано, что при отражении света от диэлектрика плоскость поляризации перпендикулярна плоскости падения.

Прежде чем перейти к самостоятельным экспериментам, сделаем еще одно замечание. Превратить естественный свет в линейно поляризованный или анализировать состояние поляризации пучка света можно по-разному, например с помощью двоякопреломляющего кристалла или отражателя, установленного под углом Брюстера, или в опытах по рассеянию излучения в среде. Но можно поступить проще: надо приобрести в магазине фототоваров один или лучше пару поляризационных фильтров марки ПФ – их называют еще поляроидами. Эти замечательные устройства были изобретены в конце 20-х годов в США и представляют собой тонкие растянутые и ориентиро-

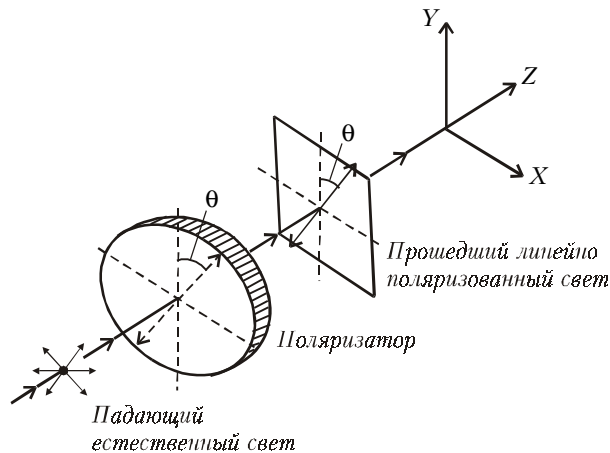


Рис. 3. Линейный поляризатор

ванные (на молекулярном уровне) пленки полимеров с добавками поглощающего, так что одна из ортогональных поляризаций полностью поглощается в пленке (дихроичный поляризатор). Первый поляризатор сделал Эдвин Ленд, будучи студентом Гарвардского колледжа, автору изобретения было тогда всего 19 лет.

Для удобства пленка поляроида помещена в оправу, с возможным вращением ее вокруг оси, и закрыта с двух сторон стеклами. На оправе есть две диагональные точки-метки ориентации поляроида, которые помогут однозначно определить плоскость поляризации светового луча в ваших опытах. На рисунке 3 показано, как устанавливаются в пучке света поляризаторы и как они действуют в качестве линейного поляризатора (или анализатора) поляризованного пучка.

Теперь – опыты. Предлагаем сделать четыре несложных опыта, которые помогут глубже познакомиться с поляризацией света.

Опыт 1. Стопа Столетова из полимерных пленок

Если вы купили в магазине кусок сыра, упакованный в тонкую прозрачную полимерную пленку, например из поли-

пропилена, не торопитесь выбрасывать пленку: полипропилен – отличный материал для изготовления простого поляризационного прибора, который называют в наших учебниках стопой Столетова. (Обычно стопа Столетова состоит из набора – порядка 10 штук – параллельных тонких и однородных стеклянных пластинок, установленных с малым воздушным зазором между соседними пластинками.) Вырежьте из пленки полоску и сложите ее несколько раз пополам так, чтобы получился восьми- или шестнадцатислойный полимерный многослойник. Закрепите его на стеклянной пластинке или в оправке, чтобы он был плоским и обязательно без складок.

В ваших руках поляризатор, работающий на просвет и на отражение – чтобы убедиться в этом, установите стопу на пути светового пучка, развернув ее плоскость по отношению к пучку на угол Брюстера $\varphi_B \approx \pi/3$ (для полипропилена $n \approx 1,5$). С помощью пленочного поляроида проверьте, что свет, прошедший через стопу, сильно поляризован. А куда направлен вектор \vec{E} в такой световой волне? Сравните, соответствуют ли результаты ваших измерений рисунку 4, на котором поясняется принцип действия стопы-поляризатора

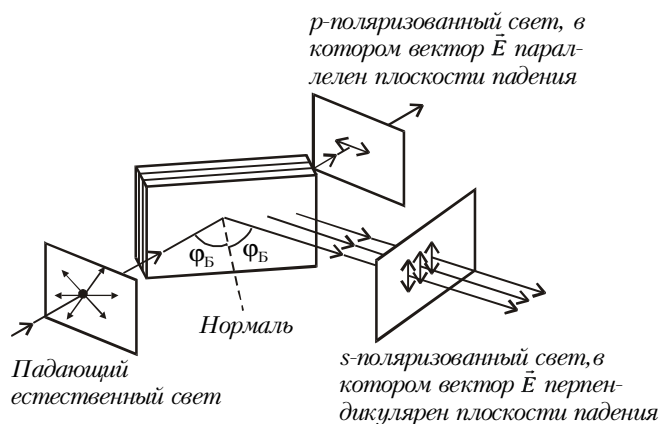


Рис.4. Разделение естественного света на два пучка линейно поляризованного света с помощью пластинок из прозрачного диэлектрика

ра. (Попробуйте провести опыт с целлофановой или лавсановой пленкой – вы получите интересный результат!)

Опыт 2. Поляризация света при прохождении через узкий зазор

Пожалуй, это самый простой опыт, позволяющий убедиться в поперечности световой волны. Поляризатором в опыте служит обычный микрометр – измерительный прибор, который есть в каждой механической мастерской. (При некотором навыке микрометр вполне может быть заменен на более грубое устройство – штангенциркуль.) Подвижной шпindel микрометра представляет собой винт с шагом резьбы 0,5 мм. Полный оборот измерительного барабана микрометра – 50 делений, что соответствует перемещению винта на 500 мкм при цене деления 10 мкм.

Опыт состоит в наблюдении яркого источника света через узкий зазор между контактными поверхностями (щечками) микрометра, который нужно установить равным 15–20 мкм. Чтобы было удобнее проводить наблюдения, желательно убрать лишний свет: перед источником света можно поставить широкий темный экран с небольшим отверстием для вывода пучка и выключить в комнате посторонние источники света.

Возьмите в одну руку микрометр, а в другую поляриоид и наблюдайте узенькую полоску света, прошедшего через зазор микрометра (рис.5). Вы обнаружите, что этот свет поляризован, причем плоскость поляризации параллельна щели, как бы вы не крутили микрометр вокруг направления распространения света.

Как объяснить эффект возникновения поляризации у прошедшего через зазор (глубокую щель) света? Считается, что в отличие от диэлектрика ме-

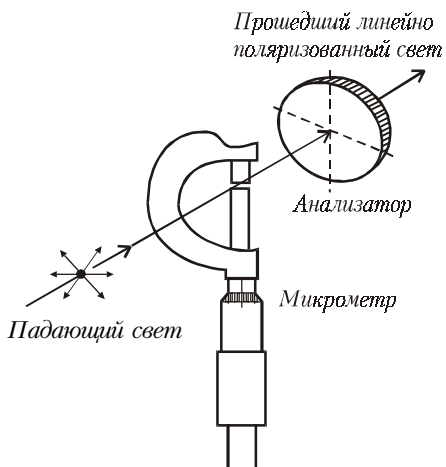


Рис. 5. Поляризация света с помощью микрометра

талл плохо поляризует падающий свет: луч с любой поляризацией хорошо отражается от металлической гладкой поверхности. Заметим однако, что и для металлов и для диэлектриков волны с s -поляризацией всегда лучше отражаются от поверхности, чем волны с p -поляризацией (см. рис.4), в том числе и при скользящих углах падения. Таким образом, появление поляризации в прошедшем через зазор пучке света с ориентацией вектора \vec{E} вдоль зазора можно объяснить разными потерями при многократных отражениях волн с s и p -поляризацией. (Подумайте, какую роль играет дифракция света в этом опыте.)

Поразительно, что этот достаточно тонкий оптический эффект наблюдался впервые и был подробно изучен еще в 1861 году французским оптиком-экспериментатором Арманом Физо. Он наблюдал, как проходит свет через очень узкий зазор между двумя полированными и посеребренными параллельными стеклянными пластинками и как зависит поляризация прошедшего света от величины зазора. Практически мы повторили часть опытов Физо, но ему удалось увидеть гораздо больше. Уменьшив зазор (и контролируя его размер) до величины порядка длины световой волны, Физо обнаружил, что такие предельно малые зазоры также способны поляризовать естественный свет, однако направление электрического вектора в этом случае оказывается перпендикулярным щели. Заметим, не вдаваясь в подробности, что сейчас на этом принципе работают поляризаторы инфракрасного излучения, представляющие собой систему близких проводящих параллельных тонких проводочков или металлических полосок.

Часть опытов Физо можно сравнительно легко повторить и даже получить количественную информацию, если воспользоваться лазером – интенсивным источником линейно поляризованного света. Подойдет простейший демонстрационный гелий-неоновый лазер ($\lambda = 633$ нм) или модная в последнее время миниатюрная лазерная указка, излучающая линейно поляризованный красный свет мощностью около 1 мВт с диаметром пучка приблизительно 1 мм. Интенсивность милливаттного лазерного луча оказывается достаточной, чтобы вызвать фототок детектора, расположенного вблизи щечек микрометра, порядка 1 мкА при зазоре между щечками в 10 мкм.

Замените металл на «черный» диэлектрик с гладкими границами в зазоре микрометра – для этой цели удобно

воспользоваться кусочками засвеченной фотопленки, приклеив их к щечкам микрометра гладкой стороной наружу. Убедитесь, что при малом зазоре между пленками, равном 15–20 мкм, такое устройство тоже поляризует свет, почти как металлическая щель, хотя и с меньшим коэффициентом пропускания. Если увеличить зазор микрометра в 2–3 раза, эффект поляризации становится еле заметным или пропадает совсем. Для зазоров, меньших 10 мкм, интенсивность прошедшего света столь мала, что это затрудняет визуальные наблюдения.

Опыт 3. Растянутая полиэтиленовая пленка между скрещенными поляроидами

Для опыта возьмите полиэтиленовую пленку толщиной около 100 мкм – из такой пленки обычно делают большие упаковочные мешки или покрытия парников. Пленка эта прозрачная, гладкая, мягкая на ощупь (по сравнению с лавсаном или целлофаном) и не такая упругая. В скрещенных поляроидах полиэтиленовая пленка при определенных ориентациях выглядит темной, хотя в поле зрения заметны светлые полосы, свидетельствующие о некоторой неоднородности пленки, связанной с технологией ее изготовления. Наблюдается также и небольшое двойное лучепреломление – видимо, из-за некоторой преимущественной ориентации линейных полимерных цепей полиэтилена.

Растяните пальцами небольшой участок пленки и поместите ее опять между поляроидами. Вас ожидает маленькое открытие: растянутый участок пленки будет окрашен яркими интерференционными цветами в виде полос, чем-то напоминающих цветное крыло бабочки. Посмотрите, как изменяется картина «бабочки» при вращении поляроидов. Наблюдаемое явление лежит в основе чувствительного метода обнаружения двойного лучепреломления вещества. Этот метод был открыт Араго в 1811 году и получил название хроматической поляризации.

А теперь нагрейте растянутый участок полиэтиленовой пленки над газовой конфоркой до размягчения пленки (но не до плавления!) – при наблюдении через поляриоиды цветные полосы пропадут!

Опыт 4. Наблюдение пластмассовых тел через поляриоид

Этот опыт предлагается для самых ленивых экспериментаторов. Вам потребуется только один поляриоид – роль

второго будет выполнять сам объект исследования. И растягивать образец вам не нужно: напряжение и связанная с ним оптическая анизотропия появились в образце изначально, при его изготовлении.

Объектом исследования может служить любая прозрачная пластмассовая деталь со стенками или линейка. Возьмите, например, коробку от аудиокассеты, поместите ее на темном фоне (подставке) и осветите лампой примерно под углом Брюстера – через поляроид вы будете наблюдать красивые цветные узоры. Эти узоры обычно сгущаются вблизи углов и кромок, швов и отверстий (см., например, фотографии

на 4-й странице обложки этого и предыдущего номеров журнала).

Оказывается, такого рода оптические наблюдения позволяют выявить напряжения в деталях машин и конструкций на прозрачных моделях сложной формы, подвергнутых механическим деформациям. Возникновение оптической анизотропии в прозрачных телах под нагрузкой называется фотоупругостью.

Задачи и упражнения

1. Для чего в фотографии используют поляризационные светофильтры-поляроиды?
2. Почему световым вектором называют вектор \vec{E} , а не \vec{B} ?

3. Почему рулон тонкой гладкой полимерной пленки выглядит блестящим (как будто это рулон фольги или металлизированной пленки)?

4. Линейно поляризованный лазерный луч падает на лист белой бумаги. Почему при наблюдении через поляроид световое пятно на бумаге выглядит как неполяризованный источник света, хотя известно, что при рассеянии даже естественного света возможна частичная линейная поляризация пучка?

5. Подумайте, каким может быть принцип устройства поляризатора для рентгеновских лучей.