

Задачи и домашние опыты

8.1. В п. 8.2 после формулы (20) намечен ход вычислений, показывающих, что смещение $\psi(t)$ представляет собой в неявном виде уравнение эллиптической траектории. Выполните эти вычисления.

8.2. Неполаризованный свет от ртутной разрядной трубки проходит через зеленый фильтр. Следующие за фильтром щели и линзы формируют параллельный пучок света, распространяющийся по направлению оси $+z$. Начало пучка будем отсчитывать от точки $z=0$. При $z=100$ расположен фотоумножитель, регистрирующий фотоны пучка. Его средняя скорость счета равна 64 отсчетам в минуту ($R=64$).

а) В точке $z=10$ поместим пластинку $1/4 \lambda$, быстрая ось которой параллельна \hat{x} . Чему теперь равно R ? (Небольшими потерями из-за отражения и т. п. пренебрегаем.)

б) В точке $z=20$ мы помещаем линейный поляризатор, ось которого направлена параллельно вектору $(\hat{x}+\hat{y})/\sqrt{2}$. Чему теперь равно R ? (З а м е ч а н и е. Помещая в пучок новый прибор, мы оставляем старые на месте. Координата z указывает последовательность размещения приборов в пучке, $z=0$ отвечает началу пучка.)

в) Поместим в $z=30$ пластинку $1/2 \lambda$. Чему равно R ?

г) Поместим в $z=40$ линейный поляризатор, ось которого параллельна \hat{x} . Чему равно R ?

д) Поместим в $z=50$ левый круговой поляризатор. Чему равна максимальная и минимальная скорость счета R ? (Она зависит от ориентации поляризатора в пучке.)

е) Пусть левый поляризатор в $z=50$ ориентирован для получения максимальной интенсивности. Поместим в $z=60$ пластинку $1/2 \lambda$, быстрая ось которой параллельна оси $(\hat{x}+\hat{y})/\sqrt{2}$, а в точку $z=70$ — линейный поляризатор, ось которого параллельна y . Чему равно R ?

8.3. Поляризованный по кругу свет, интенсивность которого I_0 (интенсивность равна потоку энергии через единицу площади в единицу времени; она пропорциональна при данной частоте света выходному току фотоумножителя), падает на поляриод. Покажите, что интенсивность на выходе поляриода равна $I_0/2$.

8.4. Линейно-поляризованный свет с направлением поляризации, составляющим угол θ с осью \hat{x} , падает на поляриод, ось которого параллельна \hat{x} . За первым поляриодом стоит второй, у которого ось параллельна поляризации падающего пучка света. Покажите, что интенсивность на выходе этой системы равна $I_0 \cos^4 \theta$, если интенсивность на входе I_0 .

8.5. Поляризованный по кругу свет, имеющий интенсивность I_0 , падает на стопку из трех поляриодов. Первый и последний поляриоды скрещены (т. е. их оси перпендикулярны), а ось среднего поляриода образует угол θ с осью первого. Покажите, что интенсивность на выходе равна $1/2 I_0 \cos^2 \theta \sin^2 \theta$.

8.6. Очень большое число $(N+1)$ поляриодов уложено в стопку. Ось каждого последующего поляриода составляет угол α с осью предыдущего, так что ось последнего поляриода образует с осью первого угол $\theta=N\alpha$. Пренебрегая потерями на отражение, найдите интенсивность на выходе, если на вход стопки падает линейно-поляризованный свет, направление поляризации которого параллельно оси первого поляриода. Полагая угол α очень малым, получите приближенное решение, ограничившись двумя первыми членами разложения в ряд Тейлора.

Ответ. $I=I_0\left(1-\frac{\theta^2}{2N}+\text{члены более высокого порядка}\right)$. Этот результат

означает, что даже при $\theta=90^\circ$ (первый и последний поляриоды скрещены) выходная интенсивность будет почти равна входной, если число поляриодов велико. С помощью такого устройства можно плавно поворачивать плоскость поляризации. Склеим наш поляриод клеем, показатель преломления которого равен показателю преломления самого поляриода. Этим мы уменьшим до минимума потери на отражение и получим нечто подобное гигантской молекуле сахара, которая вращает плоскость поляризации, не поглощая энергии.

Другой способ получения «оптической активности в макроскопическом масштабе» заключается в том, чтобы расположить тонкие листы фольги по спирали штопора, погрузив их для этого в пенопласт (хорошее приближение к жесткой, безмассовой среде, не имеющей свободных электронов). Такое устройство будет вращать плоскость поляризации микроволн, проходящих через него.

8.7. Имеем пучок света, линейно-поляризованный по оси \hat{x} , но нам нужен свет, плоскость поляризации которого составляет с этой осью угол 30° , т. е. свет, поляризованный по направлению

$$\hat{e} = \hat{x} \cos 30^\circ + \hat{y} \sin 30^\circ.$$

Как получить такой свет: а) ценой некоторой потери интенсивности; б) без потери интенсивности, не пользуясь поляроидом?

8.8. Чему равна интенсивность света на выходе устройства, состоящего из скрещенных поляроидов с пластинкой $\frac{1}{2}\lambda$ между ними, если на вход падает неполяризованный свет с интенсивностью I_0 и а) медленная оптическая ось пластинки параллельна оси одного из поляроидов, б) оптические оси пластинки образуют угол 45° с осями поляроидов?

8.9. Ответьте на вопрос задачи 8.8, если между поляроидами помещена пластинка $\frac{1}{4}\lambda$.

8.10. Опыт. Испытайте различные пластики (линейка, целлофан, лента скотча и т. п.) на двойное преломление, поворачивая их между скрещенными поляроидами. Допустим, что вам посчастливится найти среди этих веществ пластинку в $\frac{1}{4}\lambda$ или $\frac{1}{2}\lambda$. Как вы это узнаете? Попытайтесь создать с помощью растяжения двойное преломление в целлофане, употребляемом для обертки.

8.11. Опыт. *Пластинка $\frac{1}{4}\lambda$ из целлофана.* Достаньте ролик целлофана, употребляемого для обертки пищевых продуктов; 7—8 слоев такого целлофана образуют хорошую пластинку $\frac{1}{4}\lambda$. Ее можно «настроить» для различных цветов спектра, добавляя или удаляя по одному слою. Например, если 7 слоев являются хорошей пластинкой $\frac{1}{4}\lambda$ для $\lambda = 5600 \text{ \AA}$ (зеленый цвет), то добавление восьмого слоя произведет сдвиг к волне $\lambda = \frac{8}{7}(5600) = 6400 \text{ \AA}$ (красный цвет). Чтобы избежать морщин, слой можно приклеить к картонной рамке*).

8.12. Опыт. *Зависимость замедления, создаваемого пластинкой, от цвета.* Пластинка $\frac{1}{2}\lambda$ соответствует своему названию только для определенной длины волны. В вашем оптическом наборе пластинка $\frac{1}{2}\lambda$ предназначена для $\lambda = 5600 \text{ \AA}$. Возьмите яркий источник белого света (например, 150-ваттную осветительную лампу с прозрачным баллоном и нитью в виде спирали около 2,5 см длиной и диаметром около 1 мм). Смотрите на лампу через дифракционную решетку. Ориентируйте решетку так, чтобы цветные полосы были перпендикулярны нити лампы. Этим вы улучшите разрешение. Теперь возьмите два параллельных поляроида. Поместите между ними пластинку $\frac{1}{2}\lambda$, оптическая ось которой составляет угол 45° с параллельными осями поляроидов. Теперь тот цвет, для которого пластинка $\frac{1}{2}\lambda$ поворачивает плоскость поляризации на 90° , будет поглощен вторым поляроидом. Смотрите через собранную вами стопку на дифракционную решетку (держите все устройство близко к глазу). Замечаете ли вы черную полосу в том месте, где должен быть зеленый цвет? Эта часть спектра соответствует $\lambda = 5600 \text{ \AA}$! (З а м е ч а н и е. Чтобы настроиться на максимум черноты в полосе поглощения, слегка поверните последний поляроид.)

8.13. Опыт. *Пластинка $\frac{1}{2}\lambda$ из целлофана.* Сделайте пластинку $\frac{1}{2}\lambda$, описанную в опыте 8.11. В ней будет 12—15 слоев. Для «настройки» пластинки можно использовать метод, описанный в предыдущем опыте. Таким образом вы можете определить величину $(n_s - n_f) \Delta z$ для одного слоя.

*) Для опытов, описанных в этой главе, очень важно иметь пластинки $\frac{1}{4}\lambda$, $\frac{1}{2}\lambda$ и круговой поляризатор. Поэтому обращаем внимание читателя, что хорошие пластинки $\frac{1}{4}\lambda$ и $\frac{1}{2}\lambda$ легко изготовить, имея листок слюды, также обладающий свойством двойного лучепреломления. См., например, Р. В. П о л ь, Введение в оптику, Гостехиздат, 1947, стр. 189 и дальше. (Прим. ред.)

8.14. Опыт. Поляризация «пружинь». Возьмите один конец «пружинь», а другой возьмет ваш товарищ.

а) Пусть каждый из вас вращает «пружину» по часовой стрелке (со своей стороны). Этот опыт покажет вам, что линейная поляризация является суперпозицией круговых поляризаций противоположного направления.

б) Пусть один из вас создаст в «пружине» колебания, направленные под углом 45° к горизонту, а другой — колебания под углом 90° к первым колебаниям. Для облегчения этой задачи вы можете двигать руку по краю книги (угол в 45° взят для того, чтобы уменьшить асимметрию колебаний, вызываемую силой тяжести). Пусть один из вас громко считает: «1, 2, 3, 4, 1, 2, 3, 4, ...» — с периодом повторения, равным циклу колебаний или половине цикла, а другой вызывает колебания со сдвигом фаз, равным нулю или 180° или 90° .

в) Теперь закрепите один конец, а с другого пошлите состоящий из одного или двух оборотов волновой пакет поляризованных по кругу колебаний. Проверьте, что после отражения выполняется закон сохранения момента импульса. Покажите, что если момент импульса совпадает с направлением распространения, то форма «пружинь» подобна левому винту, и что отражение меняет спиральность.

8.15. Опыт. Прозрачная целлофановая лента в качестве пластинки $\frac{1}{2}\lambda$. Закрепите слой прозрачной целлофановой ленты на предметном стекле микроскопа (которое служит механической опорой). С помощью метода, описанного в опыте 8.12, проверьте, может ли этот слой быть пластинкой $\frac{1}{2}\lambda$. Оцените величину $(n_s - n_f) \Delta z$.

8.16. Опыт. Исследование поляризации с помощью прозрачной целлофановой ленты. Наложите один на другой 16 слоев прозрачной целлофановой ленты (скотча). В качестве подложки можно использовать предметное стекло. Пузырьки воздуха мешают смотреть через слои, и, если вам не удастся изгнать их разглаживанием, можно воспользоваться каким-нибудь прозрачным маслом. Положите на стол стекло, капните на него маслом. Отрежьте кусок скотча, длиннее стекла на несколько сантиметров. Положите скотч на стекло, добившись хорошего контакта, а выступающие края ленты скотча временно прикрепите к столу. Снова капните маслом в центр скотча. Положите второй слой пленки и т. д., чередуя слои масло—пленка. Поверх последнего слоя скотча положите второе стекло. Все это сооружение можно по краям закрепить лентой скотча. Итак, вы получили стопку, состоящую из 16 слоев скотча между двумя предметными стеклами. Она должна быть достаточно чистой и прозрачной, чтобы через нее можно было смотреть.

Теперь перейдем к самому опыту. К одной поверхности стопки прикрепите поляририд (так, чтобы его ось составляла 45° с осью ленты скотча) и дифракционную решетку. Смотрите через это устройство на широкий источник белого света, поместив на выходе устройства (между ним и глазом) второй поляририд, ось которого параллельна оси первого.

а) Обратите внимание на несколько черных полос! Они соответствуют линейно-поляризованному свету, который поглощается вторым поляриридом. Соседние черные полосы разделены по фазе на 2π (имеется в виду фаза линейно-поляризованных компонент по быстрой и медленной оси ленты).

«Яркие» области спектра между двумя соседними черными полосами имеют относительные фазы, изменяющиеся от 0 до 2π . В этих областях поляризация проходит через все состояния, схематически показанные на рис. 8.3, п. 8.2.

б) Поверните второй, анализирующий, поляририд на 90° . Черные области станут яркими, и наоборот! Почему?

в) Замените анализирующий поляририд круговым поляризатором, используя его как анализатор, т. е. обратив его выход к источнику света. (Положите круговой поляризатор на блестящую монету. Если монета будет казаться темно-синей, то входная сторона смотрит на вас.)

г) Расположите поляририд и круговой поляризатор рядом, так чтобы поле зрения было разделено между ними. Они должны быть параллельны первому поляризатору, ось которого составляет угол в 45° с осью ленты скотча. Смещайте все устройство таким образом, чтобы смотреть сначала через круговой, затем через линейный поляризатор. Вы замечаете, что полосы смещаются на четверть

расстояния между ними (т. е. происходит сдвиг по фазе на $\pi/2$). Теперь поверните линейный поляризатор и повторите опыт. Направление смещения полос при переходе от кругового поляризатора к полярионду изменится. Это показывает, что поляризация меняется (например) от линейной «вверх направо» к правой круговой, затем к линейной «вверх влево», к левой круговой, к линейной «вверх вправо» при изменении сдвига фаз от 0 до 2π . Нарисуйте график зависимости поляризации от цвета (длины волны), обозначив линейную поляризацию стрелкой, а круговую — круговой стрелкой.

8.17. Опыт. *Прозрачная целлофановая лента — поляроидный фильтр.* (Этот опыт требует четырех поляроидных пленок.) Кроме задерживающей пластинки из 16 слоев скотча, описанной в опыте 8.16, сделайте аналогичные стопки из 8 и 4 слоев. Для краткости обозначим эти стопки 16СП (16-слойная пластинка), 8СП и 4СП, а поляриод обозначим буквой П, и пусть П (45°) означает, что ось поляриода составляет 45° с осью пластинки. Дифракционную решетку будем обозначать ДР. Проведем следующие опыты.

а) Выстроим ряд ДР; П (45°); 16СП; П (45°). Посмотрите через этот ряд приборов на линейный источник белого света (это опыт 8.16). Теперь повторите опыт, заменив стопку 16СП на стопку 8СП.

б) Добавьте 8СП и еще один П к выходу ряда а), чтобы получить ряд ДР; П (45°); 16СП; П (45°); 8СП; П (45°). Посмотрите на источник.

в) Теперь поставьте 4СП; П (45°) на выход б) и снова посмотрите на источник. Заметьте, что с помощью системы последовательных фильтров вы устранили все боковые полосы и создали фильтр, пропускающий определенную полосу (чтобы сделать картину более ясной, вы можете воспользоваться цветными фильтрами). Ширина полосы определяется пластинкой 16СП. Если вы захотите уменьшить полосу пропускания в два раза, вам придется взять 32СП. Пластинки, сделанные с помощью прозрачного минерального масла, все же позволяют смотреть через них без больших затруднений.

Фильтры рассмотренного типа были предложены Лайо в 1932 г. Астрономы, работающие с такими фильтрами, используют кварцевые задерживающие пластинки вместо слоев скотча. В типичных случаях они имеют полосу шириной 1 \AA , центрированную, например, на линии бальмеровской серии водорода (длина волны $\lambda_{H_\alpha} = 6563 \text{ \AA}$). Такие фильтры применяют для фотографирования Солнца. Полная интенсивность света, прошедшего через фильтр, пропорциональна произведению интенсивностей для фильтров 16СП, 8СП и 4СП (последовательность не играет роли). Это показано на рисунке.

В о п р о с. Объясните, почему полная интенсивность проходящего света равна произведению интенсивностей кривых пропускания индивидуальных фильтров. Почему (например) нельзя сложить три амплитуды от трех фильтров (когда присутствует один из них), затем возвести сумму в квадрат и усреднить по времени?

8.18. Опыт. *Круговой поляризатор.*

а) Наложите круговой поляризатор на алюминиевую фольгу, или на обыкновенное зеркало, или на полированное лезвие ножа. Поверните поляризатор, чтобы поверхность фольги казалась «черной» или темно-синей. Переверните поляризатор и посмотрите снова. (Произведите те же операции с поляриодом.) Перевер-

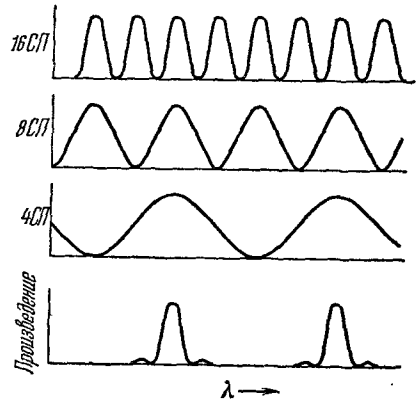


Рис. к задаче 8.17. Фильтр.

Кривая 16СП дает интенсивность прошедшего света для последовательности фильтров П (45°); 16СП; П (45°). Если вместо фильтра 16СП поставить фильтры 8СП или 4СП, мы получим кривые 8СП и 4СП соответственно. При полном наборе фильтров кривая пропускания является произведением трех кривых, что показано на рисунке.

ните его в «черное» положение. Сдвиньте поляризатор в сторону так, чтобы свет падал на металл, минуя круговой поляризатор. Смотрите на «тень» (или «изображение») поляризатора, возникающую при медленном его сдвиге и возвращении. Объясните то, что вы видите.

б) Сделайте на поверхности фольги V-образную царапину. Пусть бóльшая часть света приходит с определенного направления (лампа, окно). Положите круговой поляризатор на фольгу так, чтобы он частично лежал на царапине и частично на чистой поверхности фольги. Заметьте, что теперь царапина кажется яркой, тогда как остальная часть фольги по-прежнему выглядит темной. Объясните это! (У к а з а н и е. Когда вы смотрите на правую руку в зеркало, она выглядит как левая. Как она будет выглядеть в «двойном» зеркале, образованном двумя зеркалами, поставленными под прямым углом друг к другу?)

в) Теперь возьмите фольгу и скомкайте ее, чтобы создать «грубую» поверхность. Положите на нее круговой поляризатор и смотрите с близкого расстояния. Объясните то, что вы видите. Объясните следующие утверждения:

1. «Свет деполаризован в большом масштабе и полностью поляризован в малом».

2. «Это в какой-то степени аналогично деполаризации света в большом масштабе времени и полной его поляризации в достаточно малой шкале времени».

г) Положите круговой поляризатор на кусок обычной белой бумаги. Можете ли вы в этом случае отличить круговой поляризатор от поляроида? Объясните.

д) Снова положите круговой поляризатор на поверхность металла. Между поверхностью и поляризатором поместите пластинку $\frac{1}{2} \lambda$. Сперва предскажите, что вы ожидаете увидеть, а затем посмотрите. Повторите опыт с пластинкой $\frac{1}{4} \lambda$. (З а м е ч а н и е. Каждому цвету отвечает, как известно, своя задержка. Вы можете увеличить эффект с помощью зеленого фильтра. В этом нет необходимости, если вы помните, что выражение «черный» является в данном случае приближенным.)

8.19. *Момент импульса света.* Правополяризованный свет падает на поглощающую пластинку, которая подвешена на вертикальной нити. Свет падает снизу вверх на нижнюю поверхность пластинки.

а) Пусть длина волны света равно 5500 \AA , средняя мощность пучка 1 вт и пластинка полностью поглощает падающий свет. Какой момент силы действует на пластину (дайте ответ в *дин·см*)? Вспомните, что момент силы равен скорости изменения момента импульса и что пластинка поглощает момент импульса падающего на нее излучения.

б) Предположим, что вместо поглощающей пластинки на нити подвешено обычное посеребренное зеркало, так что свет отражается обратно под углом 180° . Чему равен закручивающий момент в этом случае?

в) Предположим, что на нити подвешена прозрачная пластинка $\frac{1}{2} \lambda$. Свет проходит через нее (ничего не задевая). Чему равен крутящий момент? (Пренебрежем отражениями от поверхности.)

г) Верхняя поверхность пластинки из в) посеребрена, так что свет проходит через пластинку, отражается от зеркальной поверхности и возвращается обратно через пластинку. Чему равен крутящий момент?

д) На нити подвешена прозрачная пластинка $\frac{1}{2} \lambda$. Над ней закреплена (т. е. не связана с пластинкой) пластинка $\frac{1}{4} \lambda$, верхняя поверхность которой посеребрена. От этой поверхности свет отражается обратно. Чему равен крутящий момент, действующий на первую пластинку $\frac{1}{2} \lambda$?

е) Как получить наибольший крутящий момент?

ж) Пусть период свободных крутильных колебаний подвешенной на нити пластинки равен 10 мин . Придумайте опыт, который позволил бы «усилить» действие крутящего момента и измерить вращение пластинки. (Укажите идею, оставляя в стороне подробности.) Прочтите описание соответствующего опыта*).

8.20. *Опыт. Поляризация при рассеянии.*

а) Введите несколько капель молака в стеклянный кувшин с водой. Пропустите через жидкость пучок света от карманного фонаря. Смотрите на свет, рас-

*) R. A. B e t h, Phys. Rev. 50, 115 (1936).

сеянный «молекулами молока». Исследуйте поляризацию рассеянного света с помощью поляроида. Сделайте это для рассеяния на 90° (угол между направлениями пучка и рассеянного света равен 90°), для рассеяния на малые углы (около 0°) и на большие углы (около 180°). (З а м е ч а н и е. Вам следует каким-то образом отметить направление оси пропускания поляроида. Это направление можно найти, наблюдая за светом, зеркально отраженным от стекла, деревянного или пластмассового пола, окрашенной поверхности при угле падения около 45° . Такой угол достаточно близок к углу Брюстера.)

б) Создайте линейную поляризацию света от вашего осветителя. Коллимируйте свет с помощью картонного экрана так, чтобы сечение пучка было меньше площади поляроида, и смотрите на рассеянный свет с различных направлений в плоскости, перпендикулярной пучку (или, наблюдая под углом в 90° , вращайте поляроид).

в) Изучите рис. 8.6. Определите степень поляризации с помощью следующего выражения:

$$P = \frac{I(\hat{x}) - I(\hat{y})}{I(\hat{x}) + I(\hat{y})},$$

где $I(\hat{x})$ — интенсивность рассеянного света, поляризованного по \hat{x} , а $I(\hat{y})$ — интенсивность рассеянного света, поляризованного по \hat{y} . Покажите, что величина P следующим образом зависит от угла рассеяния θ (см. рис. 8.6):

$$P = \frac{1 - \cos^2 \theta}{1 + \cos^2 \theta}.$$

Заметим, что $P=0$ при рассеянии на 0° или 180° и $P=1$ при рассеянии на 90° .

г) Добавьте немного молока. Пучок приобретает белую окраску. Наблюдайте за поляризацией под углом 90° , где она максимальна. Добавьте молока. Объясните результат. Можно ли ожидать, что свет, отраженный от белых облаков, будет поляризован? Проверьте ваше утверждение на опыте.

8.21. Опыт. *Поляризация света радуги.* Поляризован ли этот свет? Вместо радуги проще исследовать искусственную радугу, созданную рассеянием света на брызгах струи фонтана или струи из садового шланга.

8.22. *Лунный и земной свет.* Когда Луна кажется «наполовину полной», ее освещенная часть рассеивает солнечный свет к нашему глазу под углом, приблизительно равным 90° . Мы знаем, что при таком угле рассеяния свет голубого неба поляризован почти полностью. Можно ли думать, что свет Луны будет почти линейно поляризован? Проверьте ваше предсказание на опыте. Теперь подумайте, как «наполовину полная» Земля будет выглядеть с Луны. Будет ли поляризован земной свет?

О т в е т. Иногда, это зависит от времени и погоды. Почему?

8.23. Пучок линейно-поляризованного света падает на пластинку $\frac{1}{2}\lambda$, которая вращается вокруг оси пучка со скоростью ω . Покажите, что свет на выходе линейно поляризован и что направление поляризации вращается с частотой 2ω .

8.24. Опыт. Смотрите на осветительную лампу через поляроид. Поляризован ли свет лампы? Теперь поместите между лампой и поляроидом кусок целлофана (или пластинку $\frac{1}{4}\lambda$ или $\frac{1}{2}\lambda$). Поляризован ли свет теперь? Отразите свет лампы, например, от поверхности ножа. Поляризован ли отраженный свет?

8.25. Опыт. *Измерение показателя преломления по углу Брюстера.* Для опыта нам нужна лампа (ее можно закрыть картонной рамкой со щелью, чтобы уменьшить размеры источника), кусок стекла, стол, картонный ящик или что-нибудь в этом роде, чтобы вы могли фиксировать положение глаз, и поляроид. Положите кусок стекла на стол и найдите в нем отражение лампы. (Вы увидите два отражения — одно от верхней, другое от нижней поверхности стекла. Второе отражение можно убрать, выкрасив нижнюю поверхность черной краской или просто наклеив на нее ленточку матового скотча, которую нужно хорошо разгладить для удаления пузырьков воздуха.) Передвигая стекло по поверхности стола, меняйте угол падения света до тех пор, пока поляроид не покажет вам, что отраженный свет полностью поляризован. Измерьте угол падения света и получите показатель преломления по формуле Брюстера $\tan \theta_B = n$. В этом грубом опыте

угол измеряется с точностью в несколько градусов, но все же вам, возможно, удастся обнаружить различие в угле Брюстера для стекла и спокойной поверхности воды.

8.26. Опыт. Фазовые соотношения при зеркальном отражении света от стекла. Попытаемся проверить соотношения, показанные на рис. 8.8. Кроме предметов, использованных в опыте 8.25, нам нужен еще один поляроид, который мы поместим между источником света и лежащим на столе стеклом. Ось пропускания этого поляроида должна составлять угол 45° с горизонталью. (С о в е т. Удобно сделать так: воткните угол поляроида в пластилин или просто замазку, положив ее на предметное стекло микроскопа, поверхность которого и будет отражающей поверхностью.) Будем смотреть на поверхность стекла так, чтобы видеть источник света через первый поляроид. Предположим, что ось пропускания поляроида направлена от «направо вверх» к «налево вниз». Будем менять угол падения света (передвигом по столу стеклу с поляроидом или лампу) и для каждого угла произведем с помощью второго поляроида анализ поляризации отраженного света. Вы обнаружите, что, когда угол падения близок к нулю (почти нормальное падение), отраженный свет поляризован в направлении от «налево вверх» к «направо вниз». По мере перемещения стекла и приближения угла падения к углу Брюстера поляризация остается линейной, но ее направление поворачивается к горизонтальному. Оно становится горизонтальным при угле Брюстера и продолжает свой поворот при переходе от угла Брюстера к скользящему падению, приобретая направление от «вниз налево» к «вверх направо». Таким образом, при переходе от нормального к скользящему падению направление поляризации поворачивается на 90° , как предсказывает рис. 8.8. (При нормальном падении условия отражения обеих компонент, вследствие симметрии, почти совпадают, и поэтому направление поляризации соответствует 45° . При скользящем падении обе компоненты отражаются почти полностью и опять находятся в равных условиях. Поэтому поляризация снова отвечает углу в 45° .) Интересно отметить, что поляризация при всех углах падения остается линейной. Это значит, что между компонентами поля, лежащими в плоскости падения и перпендикулярными к ней, нет других сдвигов фаз, кроме 0° и 180° . Таким образом, при отражении падающей волны импеданс оказывается чисто активным. Этого и следует ожидать при отражении от прозрачной поверхности.

8.27. Опыт. Изменение фазы при отражении от металла. Этот опыт похож на опыт 8.26, но вместо стекла нужно взять металл с ровной блестящей поверхностью, например пластинку безопасной бритвы, или кухонный широкий нож, или любой хромированный или посеребренный предмет. Вам нужны два поляроида и пластинка $\frac{1}{4}\lambda$. Вначале проверьте, что свет, поляризованный параллельно или перпендикулярно плоскости падения, сохраняет свою поляризацию после отражения. (Действие поверхности в этом случае аналогично действию задерживающей пластинки на свет, поляризованный параллельно или перпендикулярно ее осям: пластинка никак не влияет на поляризацию.) Повернем поляроид так, чтобы падающий свет оказался поляризованным под углом 45° к плоскости падения. Установите такой угол падения, при котором источник света находился бы на расстоянии 30 см от стола, а металлическая поверхность — на расстоянии примерно метра от источника. Теперь анализируйте отраженный свет с помощью поляроида и пластинки $\frac{1}{4}\lambda$ (или с помощью кругового поляризатора, используемого как анализатор). Вы обнаружите эллиптическую поляризацию. Меняя угол падения, можно найти место, где отраженный свет имеет почти круговую поляризацию. Если теперь немного повернуть поляризующий поляроид (на $5-10^\circ$), приблизив его ось пропускания к вертикали, чтобы несколько увеличить параллельную компоненту, вы сможете получить отраженный пучок, полностью поляризованный по кругу. (Небольшой поворот необходим для компенсации того, что параллельная компонента отражается не столь же полно, как перпендикулярная компонента.)

Повернув поляризующий поляроид из положения оси пропускания «вверх направо» в положение «вверх налево», вы измените спиральность отраженного света.

Теперь дадим качественное объяснение нашим наблюдениям. Металл является реактивной средой. Обе поляризационные компоненты падающего света отра-

жаются почти полностью. При этом возникает сдвиг фаз, соответствующий времени, нужному, чтобы поля проникли в реактивную среду на глубину порядка длины экспоненциального ослабления и вышли обратно. Этот сдвиг фаз различен для параллельной и перпендикулярной компонент поляризации. Причина различия в следующем. У перпендикулярной компоненты электрическое поле параллельно поверхности металла; электроны свободно движутся под действием поля параллельно поверхности таким образом, чтобы ослабить падающее излучение. Возникающее время запаздывания и сдвиг фаз связаны с инерцией электронов. Поэтому у перпендикулярной компоненты возникает определенная задержка фазы. Теперь рассмотрим параллельную компоненту. При почти нормальном падении поле этой компоненты почти параллельно поверхности и ведет себя поэтому подобно полю перпендикулярной компоненты, в частности, у обеих компонент будет одна и та же задержка фазы. В результате отражения, кроме задержки фазы, связанной с проникновением в металл, у обеих компонент изменится знак амплитуды. Таким образом, после отражения поляризация «вверх направо» (если смотреть на лампу по линии глаз—металл—поляроид—лампа) становится поляризацией «вниз налево». Теперь предположим, что падающий пучок больше не близок к нормали. Тогда электрическое поле в параллельной компоненте больше не параллельно поверхности. Мы можем разложить его на составляющие, параллельные поверхности и перпендикулярные к ней. Поведение параллельной составляющей и испытываемое ею запаздывание фазы мы уже рассмотрели. Компонента, перпендикулярная поверхности, ведет себя совершенно иначе: заряды не могут перемещаться перпендикулярно поверхности. На ней возникает поверхностный заряд, и движение зарядов быстро прекращается. В этом случае, когда движение зарядов ничтожно, не возникает временной задержки, характерной для движения электронов параллельно поверхности. Таким образом, эта часть параллельной компоненты отражается с пренебрежимо малой временной задержкой.

Чтобы сделать это объяснение полным, мы должны были бы вычислить запаздывание фазы каждой компоненты и посмотреть, как оно зависит от угла падения. Эта задача не легка.

8.28. Оптическая активность. Допустим, что направление линейной поляризации для красного света на длине пути $L = 5$ см водного раствора сахара поворачивается на 45° . Отразим этот свет от зеркала и пошлем его через активный раствор обратно, так что полная длина пути будет 10 см. (Если вы будете делать этот опыт, постарайтесь, чтобы угол отражения не был равен в точности 180° . Посмотрите на изображение источника света через «реальный» раствор и через «изображение» раствора.)

В о п р о с. После двух прохождений света направление линейной поляризации будет образовывать с первоначальным направлением угол 0° или 90° . Что наблюдается на опыте?

8.29. Опыт. Нахождение быстрой оси пластинки $\frac{1}{4}$ λ . Зная, что ваш круговой поляризатор дает свет с левой спиральностью (по оптической терминологии), найдите быструю ось пластинки $\frac{1}{4}$ λ . (Отметьте положение этой оси.)

8.30. Опыт. Эффективный «коэффициент жесткости» для молекул оберточного целлофана. Растяните кусок целлофана и поместите его за поляроидом так, чтобы ось растяжения составляла угол 45° с осью поляроида. Не тяните слишком сильно, иначе вы вызовете сдвиг фаз больший, чем $\pi/2$. Теперь определите спиральность эллиптически-поляризованного света. Для этого нужен круговой поляризатор и пластинка $\frac{1}{2}$ λ . Зная спиральность, вы можете сказать, является ли ось растяжения быстрой или медленной осью. Предположим, что действие растяжения заключается в том, что молекулы «выстраиваются» своей «длинной стороной» вдоль оси растяжения. Вы можете узнать, больший или меньший показатель преломления отвечает направлению вдоль «длинной стороны» молекул. Больший показатель преломления означает большую диэлектрическую постоянную, что в свою очередь означает большую молекулярную поляризуемость, т. е. малый эффективный «коэффициент жесткости» (если только частота света меньше эффективной частоты свободных колебаний электрона в молекуле. Это условие выполняется для видимого света и стекла. Мы можем предположить, что оно выполняется и в этом случае). Таким образом, если ось растяжения окажется, например,

медленной осью, это значит, что эффективный «коэффициент жесткости» для колебаний вдоль молекулы меньше, чем для колебаний в перпендикулярном направлении. Каков экспериментальный результат?

8.31. Опыт. Исландский шпат (кристалл прозрачного кальцита). Возьмите большой хороший кристалл (толщиной около 2 см) исландского шпата. Поставьте на листе бумаги карандашом точку, положите кристалл на бумагу и смотрите через него. Вы увидите две точки. Рассмотрите их через поляриод. Вы обнаружите, что оба луча полностью поляризованы. Вращайте кристалл вокруг вертикальной оси. Одна точка будет поворачиваться, другая останется неподвижной. Вектор E в необыкновенном луче (т. е. в том, который поворачивается) направлен по оптической оси от кристалла. Теперь, глядя обоими глазами, постарайтесь определить, какая из двух точек кажется расположенной ближе. С помощью соответствующего чертежа (или воспользовавшись стеклянной пластинкой или слоем воды в аквариуме) убедитесь в том, что предмет кажется ближе, если смотреть на него через вещество с показателем преломления $n > 1$. Какая точка кажется ближе: «обыкновенная» или «необыкновенная»? Что можно сказать о соответствующих показателях преломления? Согласуется ли ваш экспериментальный результат с данными табл. 8.1, п. 8.4? Используя карандаш в качестве метки в пространстве, покажите, что при нормальном падении «обыкновенная» точка не испытывает бокового смещения.

Обыкновенный луч падает нормально к поверхности, движется в кристалле и выходит из него нормально к поверхности. Необыкновенный луч даже при нормальном падении не остается нормальным к поверхности! С помощью соображений, основанных на обращении времени, покажите, что необыкновенный луч, выходящий из реальной точки и падающий нормально на поверхность кристалла, должен выйти из кристалла тоже по нормали, хотя внутри кристалла он движется по наклонной. (Верхняя и нижняя поверхности кристалла остаются параллельными при любой ориентации кристалла на листе бумаги.) Как будет отклоняться необыкновенный луч: будет ли он приближаться к оптической оси или удаляться от нее? (Подумайте о показателях преломления.)

Физическое объяснение отклонения необыкновенного луча заключается в следующем. Разложим вектор E падающего необыкновенного луча на две компоненты: параллельную и перпендикулярную оптической оси. Показатели преломления вдоль этих направлений различны, следовательно, различны и поляризуемости. Таким образом, различны и амплитуды вынужденных колебаний электронов, т. е. их излучение различно. При суперпозиции полей излучения этих двух компонент движения электронов возникает волна, распространяющаяся в «косом» направлении. Теперь вы должны найти направление наклона луча. Совпадает ли результат с опытом?

8.32. Навигация викингов. На больших широтах (например, за Полярным кругом) невозможно пользоваться магнитным компасом. Солнце также трудно использовать для ориентировки, потому что даже в полдень оно может быть за линией горизонта. Иногда на самолетах пользуются «сумеречным компасом», который определяет положение Солнца ниже линии горизонта по изменению направления поляризации голубого неба. Компас содержит кусок поляроида. Некоторые естественные кристаллы, например турмалин или кордирит, обладают свойствами поляроида. Если рассматривать линейно-поляризованный свет через такой кристалл, то он будет казаться прозрачным при совпадении плоскости поляризации с его осью пропускания и темным при повороте кристалла на 90° . Такие вещества называют «дихроичными».

В IX веке викинги вели свои суда в море, не имея ни компаса, ни поляроида. Ночью они пользовались звездами, а днем Солнцем, если оно не было закрыто облаками. Но, если верить древним скандинавским сагам, штурманы викингов могли установить положение Солнца, закрытого облаками, с помощью таинственного «солнечного камня». По-видимому, тайна камня раскрыта датским археологом Рамскоу и десятилетним мальчиком, которому был известен «сумеречный компас» (отец его, Йорге Йенсен, был штурманом скандинавской авиакомпании). Рамскоу писал в археологическом журнале: «...возможно, это был прибор, позволяющий обнаружить положение Солнца в облачную погоду». Мальчик подумал, что таким прибором является «сумеречный компас». Его отец сообщил об этой идее

Рамскоу. Последний исследовал различные дихроичные кристаллы, находимые в Скандинавии. Лучшим из них оказался кордерит. Такой кристалл позволяет установить с точностью $\pm 2,5^\circ$ угловое положение Солнца и следить за ним, пока оно не опустится на $\sim 7^\circ$ ниже линии горизонта.

В о п р о с. В журнале «Тайм» от 14 июля 1967 г., стр. 158, написано, что древние саги утверждают, что магический «солнечный камень» находил положение Солнца независимо от погоды. Верите ли вы в это?

8.33. Поляризационный «проекционный оператор». Поляроид, ось пропускающего которого направлена по \hat{x} , помещен в пучок света, содержащий все состояния поляризации, и пропускает только свет, имеющий линейную поляризацию по этой оси. Мы можем назвать такой поляроид «проекционным оператором». Он «проектирует на свой выход» \hat{x} -поляризацию без потерь (если пренебречь небольшими отражениями). Заметим, что наш «проекционный оператор» может действовать в прямом и в обратном направлениях, т. е. любая поверхность поляроида может служить входом. Рассмотрим теперь круговой поляризатор, состоящий из поляроида (вход) с приклеенной к нему пластинкой $1/4\lambda$, оптическая ось которой составляет 45° с осью поляроида. Предположим, что эта система дает на выходе свет с правой спиральностью. Но, если на нее падает свет такой спиральности, она поглощает половину интенсивности. Если перевернуть такой поляризатор, он будет пропускать свет с правой спиральностью и поглощать свет с левой спиральностью. Но когда свет с правой спиральностью падает со стороны пластинки $1/4\lambda$, то на выходной поверхности поляроида возникает линейно-поляризованный свет. Таким образом, такая система не является «проекционным оператором» для поляризации.

Возникает проблема: как создать «поляризационные операторы» круговой поляризации, один для света с правой, с другой для света с левой спиральностью. «Правый проекционный оператор» должен пропустить к своему выходу без потерь свет с правой спиральностью (пренебрегаем потерями на отражение) и поглотить свет с левой спиральностью.

В о п р о с. Будет ли такой оператор обратимым, т. е. можно ли использовать любую поверхность в качестве входа?

8.34. Опыт. Устранение бликов. Предположим, что вы хотите использовать вашу осветительную лампу, чтобы рассмотреть предмет, находящийся далеко за окном. Как избавиться от мешающих бликов, возникающих от света, зеркально отраженного от оконного стекла? Предположим, что вы смотрите через дождь ночью, используя ту же осветительную лампу. Помогут ли вам в этом случае те же ухищрения, которые помогли избавиться от оконных бликов? Предположим, что вместо видимого света вы используете микроволны длиной 10 см, а приемник работает на антенне передатчика (радар). Каковы должны быть фазовые соотношения в двух антеннах, ориентированных по осям x и y , чтобы избавиться от бликов, созданных каплями воды?

8.35. Опыт. Окраска в прозрачном пластике. Найдите кусок прозрачного пластика. Посмотрите на отражение неба в поверхности пластика при угле падения около 45° . Видите ли вы цвета? (Чтобы уменьшить фон, положите под пластик черную бумагу.) Для увеличения эффекта смотрите на пластик через поляроид. Объясните происхождение цветов.