

**М. Ю. Дёмина, К. А. Крюков,
В. И. Лейман, Е. А. Яшкевич**

ФИЗИКА

ОПТИКА. ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНА МАЛЮСА

Учебно-методическое пособие

**Санкт-Петербург
2023**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна»
Высшая школа технологии и энергетики**

**М. Ю. Дёмина, К. А. Крюков,
В. И. Лейман, Е. А. Яшкевич**

ФИЗИКА

ОПТИКА. ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНА МАЛЮСА

Учебно-методическое пособие

Утверждено Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД

Санкт-Петербург
2023

УДК 53 (075)
ББК 22.3
Ф 503

Рецензенты:
директор НОЦ ФМНиЦТ, доцент
М. С. Панов;

кандидат физико-математических наук, доцент Высшей школы технологии и энергетики
Санкт-Петербургского государственного университета технологий и дизайна
М. Н. Кульбицкая

Дёмина, М. Ю.

Ф 503 Физика. Оптика. Изучение закона Малюса: учебно-методическое пособие / М. Ю. Дёмина, К. А. Крюков, В. И. Лейман, Е. А. Яшкевич. — СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2023. — 27 с.

Учебно-методическое пособие соответствует программам и учебным планам дисциплины «Физика» для студентов, обучающихся по направлениям подготовки: 01.00.00 «Математика и механика», 13.00.00 «Электро- и теплоэнергетика», 15.00.00 «Машиностроение», 18.00.00 «Химические технологии», 27.00.00 «Управление в технических системах» и 29.00.00 «Технологии легкой промышленности». Учебно-методическое пособие содержит теоретическую и практическую части. Теоретическая часть посвящена описанию явления поляризации света, видам поляризованного света, устройствам для изучения явления поляризации света, выводу закона Малюса. В практической части приведена принципиальная схема экспериментальной установки и порядок выполнения лабораторной работы.

Учебно-методическое пособие предназначено для бакалавров очной формы обучения.

УДК 53 (075)
ББК 22.3

© ВШТЭ СПбГУПТД, 2023
© Дёмина М.Ю., Крюков К.А.,
Лейман В.И., Яшкевич Е.А., 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	5
Электромагнитные волны.....	5
Естественный и поляризованный свет	6
Степень поляризации света	8
Двойное лучепреломление. Дихроизм	8
Призма Николя.....	12
Закон Малюса	12
Искусственная оптическая анизотропия.....	14
Вращение плоскости поляризации в веществе	16
Магнитное вращение плоскости поляризации.....	18
Поляризация света при отражении.....	19
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3-42	21
Описание экспериментальной установки	21
Порядок выполнения работы	21
Контрольные вопросы.....	24
ИСПОЛЬЗУЕМАЯ И РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА.....	25
ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА.....	25
ПРИЛОЖЕНИЕ. Образец отчета по лабораторной работе № 3-42	26

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум занимает особое место в процессе обучения физике по программе технического вуза. Содержание и форма физического практикума определяются как набором дидактических задач, возложенных на него, так и организационными возможностями кафедры и ее учебных лабораторий. На лабораторных занятиях осуществляется ознакомление с методами физического исследования, формируются навыки и умения в проведении физического эксперимента, обработки результатов измерений и их анализа.

Целью данного учебно-методического пособия является изучение и освоение основных физических идей, фундаментальных понятий, законов волновой оптики при описании явления поляризации света.

В теоретической части пособия рассмотрены:

- явление поляризации света;
- виды поляризованного света;
- способы получения поляризованного света;
- устройства для изучения явления поляризации света;
- вращение плоскости поляризации;
- искусственная оптическая анизотропия, а также

выполнен вывод закона Малюса.

В практической части пособия приведена принципиальная схема экспериментальной установки для проверки закона Малюса, методические указания и алгоритм выполнения лабораторной работы, образец отчета по данной работе.

Использование данного пособия позволит улучшить методическое обеспечение, а также образовательный уровень студентов по дисциплине «Физика».

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Электромагнитные волны

Возникнув в каком-либо месте пространства, переменное электрическое поле вызывает появление переменного магнитного поля в этой же области пространства и близлежащих областях. Последнее вызывает, в свою очередь, появление переменного электрического поля и т. д. Таким образом, возникнув в каком-либо месте, переменное электромагнитное поле передается от одной точки пространства к другой в вакууме со скоростью $c = 3 \cdot 10^8$ м/с (скорость света). Процесс распространения переменного электромагнитного поля в пространстве называется электромагнитной волной.

Длина волны λ и частота ν связаны соотношением:

$$\lambda = \frac{c}{\nu}. \quad (1)$$

Весь спектр электромагнитных волн делится условно на ряд областей (рис.1). Радиоволны, световое (видимое), рентгеновское и гамма излучения представляют собой электромагнитные волны с различной длиной волны λ .

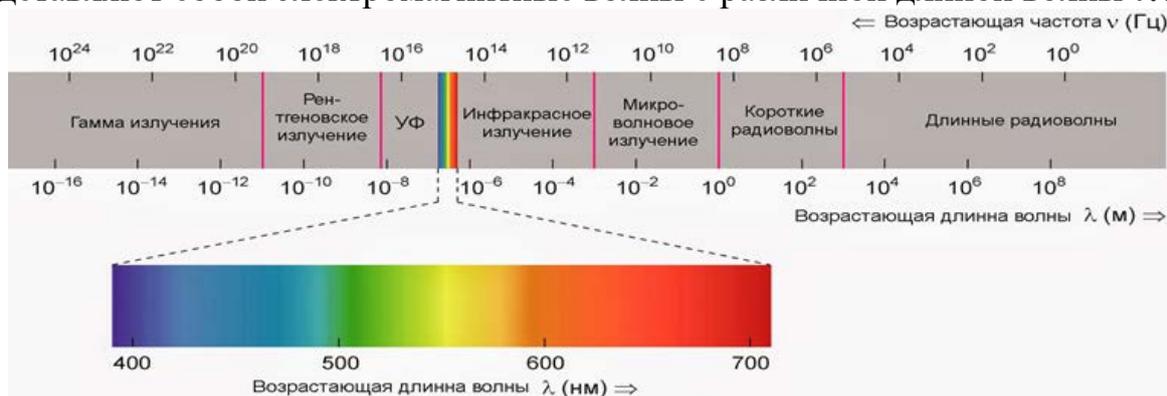


Рисунок 1 – Шкала электромагнитных волн

Диапазон радиоволн простирается от длинных ДВ ($\lambda \sim$ км) до ультракоротких УКВ и СВЧ волн ($\lambda \sim$ мм). Оптический диапазон (рис. 1) включает инфракрасные (ИК) волны, видимый свет ($400 < \lambda < 780$ нм) и ультрафиолетовые (УФ) волны. За оптическим диапазоном находятся рентгеновские и γ -лучи.

Свет – это электромагнитное излучение, воспринимаемое человеческим глазом. В качестве коротковолновой границы спектрального диапазона, занимаемого светом, принят участок с длинами волн в вакууме 380–400 нм, а в качестве длинноволновой границы – участок 760–780 нм.

Световые волны (как и любые другие электромагнитные волны) поперечны. Поперечность световых волн выражается в том, что колеблющиеся в них векторы напряженности электрического поля \vec{E} (светового вектора) и напряженности магнитного поля \vec{H} перпендикулярны направлению распространения волны. Кроме того, \vec{E} и \vec{H} взаимно перпендикулярны (рис. 2).

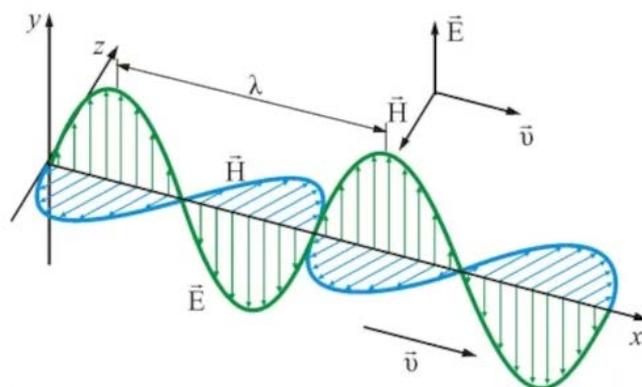


Рисунок 2 – Поперечность электромагнитной волны

Естественный и поляризованный свет

Если при распространении световой волны направление колебаний вектора напряженности электрического поля \vec{E} хаотически изменяется, т. е. любое его направление в плоскости, перпендикулярной к распространению волны, равновероятно (рис. 3), то такой свет называется *неполяризованным*, или *естественным*.

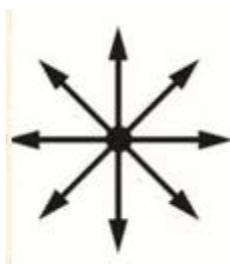


Рисунок 3 – Направления колебаний светового вектора в естественном свете

Равномерное распределение направлений колебаний векторов \vec{E} объясняется большим числом спонтанно испускающих свет атомов в источнике, а равенство амплитудных значений векторов \vec{E} – одинаковой в среднем интенсивностью излучения каждого атома.

Излучение обычных источников света (солнца, ламп накаливания, газоразрядных и светодиодных ламп) не поляризовано. Свет таких источников в каждый момент времени состоит из вкладов огромного числа независимо излучающих атомов с различной ориентацией светового вектора. При спонтанном излучении различные атомы источника испускают отдельные цуги волн независимо друг от друга в случайные моменты времени. Процесс излучения отдельного атома длится $\tau \approx 10^{-8}$ с. Фазы колебаний и направления колебаний светового вектора в излучении отдельных атомов не коррелированы друг с другом, поэтому в результирующей волне вектор \vec{E} беспорядочно изменяет свою ориентацию во времени, так что в среднем все направления колебаний оказываются равноправными.

Свет, в котором направления колебаний вектора \vec{E} упорядочены каким-либо образом, называется *поляризованным*. Если при распространении световой волны направление колебаний вектора напряженности электрического поля \vec{E} (а, следовательно, и вектора напряженности магнитного поля \vec{H}) фиксированы строго в одном направлении, то свет называется *линейно поляризованным* (или *плоско поляризованным*). В этом случае изменения вектора \vec{E} происходят всегда в одной и той же плоскости, называемой плоскостью поляризации. Пример линейно поляризованной волны приведен на рисунке 4.



Рисунок 4 – Направления колебаний светового вектора в линейно (плоско) поляризованном свете

Кроме линейной поляризации существуют и другие типы поляризации света:

- *частично поляризованный свет* характеризуется тем, что в нем имеется преимущественное направление колебаний вектора \vec{E} , поэтому частично поляризованный свет можно рассматривать как смесь линейно поляризованного и естественного света (рис. 5);



Рисунок 5 – Направления колебаний светового вектора в частично поляризованном свете

- *эллиптически поляризованный свет* – свет, в котором конец вектора \vec{E} описывает эллипс, лежащий в плоскости, перпендикулярной световому лучу (рис. 6);

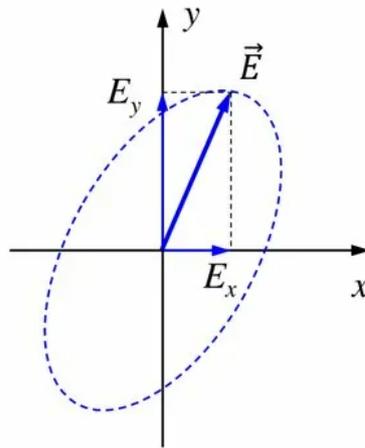


Рисунок 6 – Колебания светового вектора в эллиптически поляризованном свете

- *циркулярно поляризованный свет (круговая поляризация)* – свет, в котором конец вектора \vec{E} описывает со временем окружность, лежащую в плоскости, перпендикулярной направлению скорости волны.

Степень поляризации света

Степенью поляризации света называется величина, равная

$$P = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}, \quad (2)$$

где I_{max} и I_{min} – максимальная и минимальная интенсивности света, соответствующие двум взаимно перпендикулярным направлениям.

Для линейно поляризованного света $I_{min} = 0$ и $P = 1$;

для естественного света $I_{min} = I_{max}$ и $P = 0$;

для частично поляризованного света $I_{min} > 0$, $I_{max} > I_{min}$ и $0 < P < 1$.

Двойное лучепреломление. Дихроизм

Оптическое устройство, которое преобразует проходящий через него естественный свет в поляризованный, называется *поляризатором*. Действие поляризатора может быть основано на различных оптических явлениях: на отражении света при определенных условиях, на явлении двойного лучепреломления, дихроизма или рассеяния.

В XVII в. было замечено, что любое изображение, если его рассматривать через прозрачный кристалл исландского шпата, раздваивается (рис. 7).



Рисунок 7 – Раздвоение надписи, рассматриваемой через кристалл исландского шпата

Все прозрачные кристаллы (кроме кристаллов кубической системы, которые оптически изотропны) обладают способностью *двойного лучепреломления* (двулучепреломления), т. е. раздваивания каждого падающего на них светового пучка.

Если на толстый кристалл исландского шпата направить узкий пучок света, то из кристалла выйдут два пространственно разделенных луча, параллельных друг другу и падающему лучу (рис. 8).

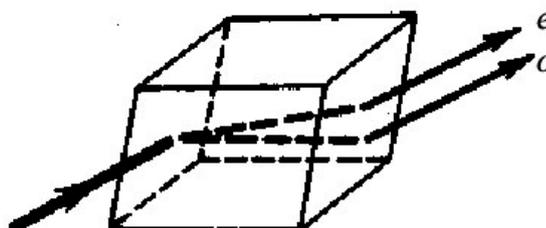


Рисунок 8 – Двойное лучепреломление при произвольном угле падения луча

Даже в том случае, когда первичный пучок падает на кристалл нормально (рис. 9), преломленный пучок разделяется на два, причем один из них является продолжением первичного, а второй отклоняется.

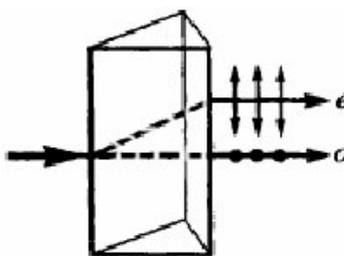


Рисунок 9 – Двойное лучепреломление при нормальном падении луча

Один из них, который подчиняется закономерностям геометрической оптики (в частности, закону Снеллиуса), назвали *обыкновенным* лучом o .

Второй луч нарушает закон преломления и называется *необыкновенным* e .

Оба луча, вышедшие из кристалла, поляризованы во взаимно перпендикулярных плоскостях, а угол между ними в кристалле зависит от ориентации падающего луча относительно кристалла.

Отклонение необыкновенного луча от направления, предопределенного ему законом Снеллиуса, означает, что его показатель преломления n_e отличается от показателя преломления n_o обыкновенного луча, а значит, и скорости их распространения в кристалле исландского шпата различны.

Это одно из проявлений анизотропии кристаллов – неодинаковость свойств по разным направлениям.

Кристаллы, обладающие двойным лучепреломлением, подразделяются на одноосные и двуосные. У одноосных кристаллов имеется направление, вдоль которого обыкновенный и необыкновенный лучи распространяются не разделяясь. Это направление называется оптической осью кристалла. Оптическая ось – это не прямая линия, проходящая через какую-то точку кристалла, а определенное направление в кристалле. Любая прямая, параллельная данному направлению, является оптической осью кристалла. У двуосных кристаллов таких направлений два.

Обыкновенный луч распространяется в кристалле во всех направлениях с одинаковой скоростью: $v_o = c/n_o$, а необыкновенный – с разными скоростями: $v_e = c/n_e$ (в зависимости от угла между вектором \vec{E} и оптической осью). Для луча, распространяющегося вдоль оптической оси: $n_o = n_e$, $v_o = v_e$, т. е. вдоль оптической оси существует только одна скорость распространения света. Различие в v_e и v_o для всех направлений, кроме направления оптической оси, и обуславливает явление двойного лучепреломления в одноосных кристаллах.

На рисунке 10 показано распространение обыкновенного и необыкновенного лучей в кристалле (главная плоскость совпадает с плоскостью чертежа, AA – направление оптической оси). Волновой поверхностью обыкновенного луча ($v_o = const$) является сфера, необыкновенного луча ($v_e \neq const$) – эллипсоид вращения. Наибольшее расхождение поверхностей обыкновенного и необыкновенного лучей наблюдается в направлении, перпендикулярном оптической оси. Если $v_e < v_o$ ($n_e > n_o$), то одноосный кристалл называется положительным (рис. 10, *а*). Если $v_e > v_o$ ($n_e < n_o$), то одноосный кристалл называется отрицательным (рис. 10, *б*).

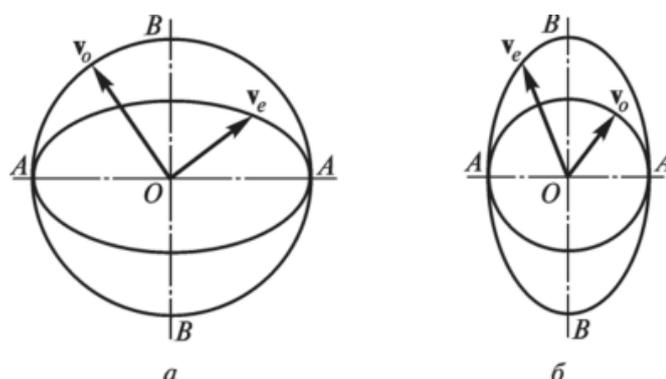


Рисунок 10 – Распространение обыкновенного (o) и необыкновенного (e) лучей в положительном и отрицательном кристалле

В большинстве кристаллов обыкновенный и необыкновенный лучи поглощаются примерно одинаково. Однако существуют кристаллы, в которых поглощение этих лучей оказывается неодинаковым. Различное поглощение света в зависимости от ориентации \vec{E} называется *дихроизмом*. При некоторой толщине дихроичного кристалла один из лучей может быть практически полностью поглощен. Луч, прошедший через кристалл, будет линейно поляризован. Примером дихроичного кристалла является турмалин, в котором из-за сильного селективного поглощения обыкновенного луча уже при толщине пластинки 1 мм из нее выходит только необыкновенный луч. Такое различие в поглощении, зависящее, кроме того, от длины волны, приводит к тому, что при освещении дихроичного кристалла белым светом кристалл по разным направлениям оказывается различно окрашенным.

Поляризаторы, действие которых основано на явлении дихроизма, называются поляроидами. При использовании отдельного дихроичного монокристалла требуется кристалл большего размера и хорошего качества, то есть без оптических дефектов. Поэтому обычно применяются поляроидные пленки, которые получают либо путем нанесения на пленку мелких ориентированных параллельно друг другу кристалликов дихроичного вещества (герпатита), либо сильным растяжением в одном направлении пленки поливинилового спирта, окрашенной раствором йода в йодистом калии. Поляроиды обладают рядом преимуществ перед другими поляризаторами: с помощью поляроидной пленки можно получить поляризованный световой пучок большого диаметра; малая толщина поляроида позволяет устанавливать его в любом месте оптической системы; поляроиды пропускают свет большого диапазона длин волн. Поляроиды применяются, например, для защиты от слепящего действия солнечных лучей и фар встречного автотранспорта.

Разные кристаллы создают различное по значению и направлению двойное лучепреломление, поэтому, пропуская через них поляризованный свет и измеряя его изменение после прохождения кристаллов, можно определить их оптические характеристики и производить минералогический анализ. Для этой цели используют поляризационные микроскопы.

Призма Николя

В устройствах, служащих для получения поляризованного света, применяются призмы и поляриды. Призмы делятся на два класса:

- 1) призмы, дающие только плоско поляризованный луч (поляризационные призмы);
- 2) призмы, дающие два поляризованных во взаимно перпендикулярных плоскостях луча (двойкопреломляющие призмы).

Поляризационные призмы построены по принципу полного отражения одного из лучей (например, обыкновенного) от границы раздела, в то время как другой луч с другим показателем преломления проходит через эту границу. Типичным представителем поляризационных призм является призма Николя, называемая часто николем.

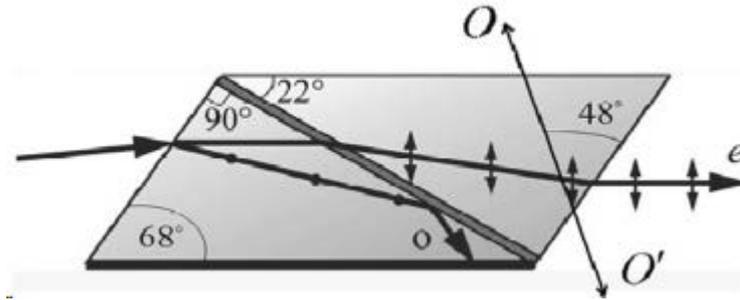


Рисунок 11 – Ход лучей в призме Николя

Призма Николя (рис. 11) представляет собой двойную призму из исландского шпата, склеенную вдоль пространственной диагонали канадским бальзамом с $n = 1,55$. Оптическая ось OO' призмы составляет с входной гранью угол 48° . На передней грани призмы естественный луч раздваивается на два луча: обыкновенный ($n_o = 1,66$) и необыкновенный ($n_e = 1,51$). При соответствующем подборе угла падения, равного или близкого предельного, обыкновенный луч испытывает полное отражение, а затем поглощается зачерненной поверхностью. Необыкновенный луч выходит из кристалла параллельно падающему лучу, незначительно сместившись относительно него.

Закон Малюса

Поляризатор свободно пропускает колебания вектора \vec{E} , параллельные плоскости, называемой плоскостью пропускания, и полностью задерживают перпендикулярные колебания вектора \vec{E} (рис. 12).

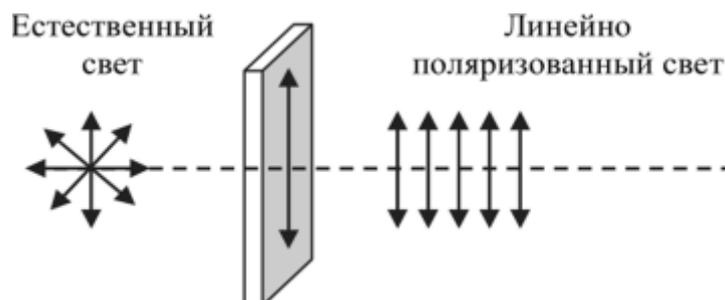


Рисунок 12 – Получение линейно поляризованного света

Всякое устройство, служащее для получения поляризованного света, называется поляризатором. Тот же прибор, применяемый для исследования поляризации света, называется *анализатором*. Таким образом, кристаллы турмалина и поляроиды могут служить и поляризаторами, и анализаторами.

Если на пути линейно поляризованного света, полученного с помощью поляризатора, поставить второй поляризатор (анализатор), то второй поляризатор, так же как и первый, будет пропускать свет, в котором вектор \vec{E} колеблется только в плоскости его пропускания.

Пусть колебания светового вектора поляризованной световой волны, полученной после прохождения поляризатора Π , совершаются с амплитудой E_0 в плоскости, составляющей угол φ с плоскостью пропускания анализатора A (рис. 13).

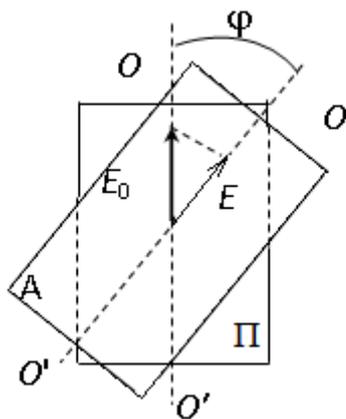


Рисунок 13 – Вывод закона Малюса

Амплитуду E_0 этих колебаний можно разложить на две взаимно перпендикулярные составляющие: E , совпадающую с плоскостью пропускания анализатора, и перпендикулярную ей, причем согласно рисунку 13.

$$E = E_0 \cos \varphi. \quad (3)$$

Первая составляющая амплитуды колебаний пройдет через анализатор, вторая будет задержана им. Так как интенсивность света I_0 после поляризатора пропорциональна квадрату амплитуды колебаний вектора напряженности электрического поля E_0^2 , следовательно, интенсивность света I , вышедшего из анализатора, пропорциональна E^2 и равна:

$$I = I_0 \cos^2 \varphi, \quad (4)$$

где I_0 – интенсивность поляризованного света, падающего на анализатор; φ – угол между плоскостью поляризации падающего света и плоскостью пропускания анализатора. Соотношение (4) называется законом Малюса.

Если плоскости пропускания поляризатора, формирующего линейно поляризованный свет, и анализатора параллельны, т. е. $\varphi = 0, \pi, 2\pi, 3\pi \dots$ и

$\cos \varphi = \pm 1$, то экран, помещенный за анализатором, будет максимально освещен.

Если $\varphi = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2} \dots$ и $\cos \varphi = 0$ (главные плоскости поляризатора и анализатора взаимно перпендикулярны, или скрещены), то экран будет темным.

Пусть на поляризатор падает естественный свет, интенсивность которого I_0 . Поскольку в естественном свете представлены все возможные ориентации

вектора \vec{E} , т.е. угол $0 \leq \varphi \leq 2\pi$, а среднее значение $\langle \cos^2 \varphi \rangle = \int_0^{2\pi} \cos^2 \varphi d\varphi = \frac{1}{2}$, то

согласно закону Малюса (4), средняя интенсивность светового потока, прошедшего через поляризатор, будет равна:

$$I_{\Pi} = I_0 \langle \cos^2 \varphi \rangle = \frac{1}{2} I_0. \quad (5)$$

Если поворачивать плоскость пропускания поляризатора (оставляя поляризатор в одной плоскости), то, как показывает формула (5), в случае падения на поляризатор естественного света интенсивность света, прошедшего через поляризатор, будет оставаться постоянной, равной половине интенсивности падающего естественного света. Поэтому, если интенсивность света, прошедшего через поляризатор, не изменяется при повороте плоскости пропускания, то это означает, что свет, падающий на поляризатор, – естественный. При этом свет, прошедший через поляризатор, будет линейно поляризованным.

Если естественный свет падает на несовершенный поляризатор (поляризатор, который частично задерживает колебания вектора \vec{E} , перпендикулярные к его плоскости пропускания), то на выходе из такого поляризатора получается *частично поляризованный* свет, т. е. свет, в котором колебания одного направления преобладают над колебаниями других направлений. Частично поляризованный свет можно рассматривать как смесь естественного и линейно поляризованного света.

Если пропускать частично поляризованный свет через поляризатор, то при вращении поляризатора вокруг направления луча интенсивность прошедшего света будет меняться в пределах от I_{min} до I_{max} , причем переход от одного из этих значений к другому будет совершаться при повороте на угол,

равный $\frac{\pi}{2}$. За один полный поворот поляризатора на 360° интенсивность проходящего света два раза будет достигать своего максимального и два раза минимального значений.

Искусственная оптическая анизотропия

Двойное лучепреломление имеет место в естественных анизотропных средах. Существуют, однако, различные способы получения искусственной оптической анизотропии, т. е. сообщение оптической анизотропии естественно изотропным веществам.

Оптически изотропные вещества становятся оптически анизотропными под действием:

- одностороннего сжатия или растяжения (кристаллы кубической системы);
- электрического поля (эффект Керра; жидкости, аморфные тела, газы);
- магнитного поля (эффект Коттона-Мутона; жидкости, стекла, коллоиды).

В перечисленных случаях вещество приобретает свойства одноосного кристалла, оптическая ось которого совпадает с направлением деформации, электрического или магнитного полей соответственно указанным выше воздействиям.

Мерой возникающей оптической анизотропии служит разность показателей преломления n_o и n_e в направлении, перпендикулярном оптической оси:

$$n_o - n_e = k_1 \sigma, \quad (6)$$

(в случае деформации);

$$n_o - n_e = k_2 E^2, \quad (7)$$

(в случае электрического поля);

$$n_o - n_e = k_3 H^2, \quad (8)$$

(в случае магнитного поля), где k_1 , k_2 , k_3 , – постоянные характеризующие вещество, σ – нормальное напряжение, E и H – соответственно напряженность электрического и магнитного поля.

Двойное лучепреломление может возникать в прозрачных телах под влиянием внешних воздействий, вызывающих механические деформации тел. Поместим стеклянную пластинку Q между скрещенными поляризаторами P и P' (рис. 14). Если стекло не деформировано, то такая система свет не пропускает. Если пластинку сжать, то свет начинает проходить. Наблюдаемая в прошедших лучах картина оказывается испещренной цветными полосами. По расположению полос можно судить о распределении напряжений внутри пластины, так как каждая такая полоса соответствует одинаково деформированным местам пластинки. При этом благодаря явлению двойного лучепреломления будут видны поверхности равного напряжения. Если из твердого прозрачного материала изготовить модель части несущей конструкции (балки, колонны, перекрытия и т. п.), то можно увидеть, как распределяются напряжения внутри нее при различных нагрузках.

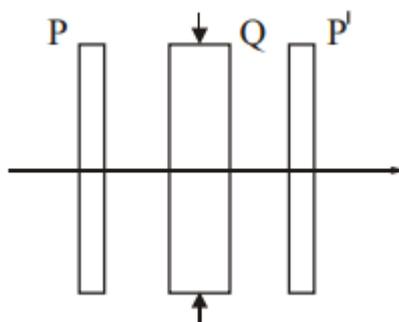


Рисунок 14 – Оптическая анизотропия при механическом воздействии

На рисунке 15 представлена установка для наблюдения эффекта Керра в жидкостях. Эффект Керра – оптическая анизотропия вещества под действием электрического поля – объясняется различной поляризуемостью молекул жидкости по разным направлениям. Это явление практически безынерционно, т. е. переход вещества из изотропного состояния в анизотропное при включении поля составляет приблизительно 10^{-10} с. Поэтому ячейка Керра может служить идеальным световым затвором и применяется в быстропротекающих процессах, в оптической локации, в оптической телефонии и т. д.

Ячейка Керра – кювета с жидкостью, в которую введены пластины конденсатора, помещается между скрещенными поляризатором P и анализатором A .

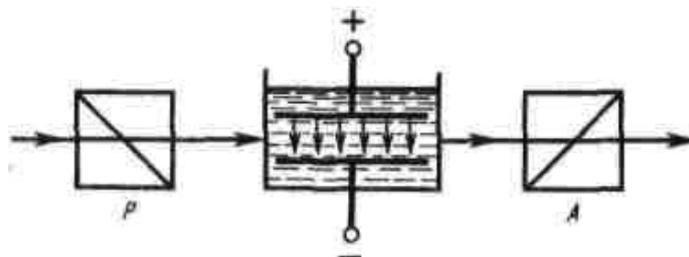


Рисунок 15 – Ячейка Керра

При отсутствии электрического поля свет через систему не проходит. При наложении электрического поля жидкость становится двоякопреломляющей; при изменении разности потенциалов между электродами меняется степень анизотропии вещества, а, следовательно, и интенсивность света, прошедшего через анализатор. На пути l между обыкновенным и необыкновенным лучами возникает оптическая разность хода:

$$\Delta = l(n_o - n_e) = k_2 l E^2 \quad (9)$$

или соответственно разность фаз:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta = 2\pi B l E^2, \quad (10)$$

где $B = k_2/\lambda$ – постоянная Керра.

Вращение плоскости поляризации в веществе

При прохождении поляризованного света через некоторые вещества происходит поворот плоскости поляризации световой волны. Это явление называется вращением плоскости поляризации. Вещества, которые способны поворачивать плоскость поляризации падающих на них световых волн, называются оптически активными веществами. Оптически активными могут быть как жидкости, так и кристаллы. Например, растворы сахара, глюкозы, скипидар, киноварь, кварц и т. д.

Вращение плоскости поляризации можно наблюдать на следующем опыте (рис. 16). Если между скрещенными поляризатором P и анализатором A , дающими темное поле зрения, поместить оптически активное вещество, то поле зрения анализатора просветлеет. При повороте анализатора на некоторый угол

φ можно вновь получить темное поле зрения. Угол φ и есть угол, на который оптически активное вещество поворачивает плоскость поляризации света, прошедшего через поляризатор.



Рисунок 16 – Вращение плоскости поляризации

Опыт показывает, что угол поворота плоскости поляризации для оптически активных кристаллов

$$\varphi = \alpha d, \quad (11)$$

где d – путь, пройденный лучом в кристалле;

α – постоянная вращения кристалла, зависящая от длины волны.

Для оптически активных жидкостей угол поворота плоскости поляризации определяется соотношением:

$$\varphi = [\alpha]Cl, \quad (12)$$

где l – толщина слоя жидкости;

C – массовая концентрация оптически активного вещества в растворе, $\text{кг}/\text{м}^3$;

$[\alpha]$ – удельная постоянная раствора, зависящая от природы вещества, температуры и длины волны; численно равная углу поворота плоскости поляризации света слоем оптически активного вещества единичной толщины (единичной концентрации – для растворов).

Различают правое вращение, или положительное, и левое, или отрицательное. При правом вращении плоскость поляризации поворачивается по часовой стрелке для луча, падающего в глаз наблюдателя, при левом – в противоположном направлении.

Если между двумя скрещенными поляризаторами поместить оптически активное вещество (кристалл кварца, прозрачную кювету с раствором сахара и т. п.), то поле зрения просветляется. Чтобы снова получить темноту, нужно повернуть один из поляризаторов на угол φ , который определяется формулами (11) и (12). В случае раствора, зная удельную постоянную вращения $[\alpha]$ данного вещества и длину l , можно, измерив угол поворота φ , найти концентрацию раствора. Такой способ определения концентрации растворов применяют в производстве различных веществ.

Феноменологическое (макроскопическое) объяснение естественной оптической активности было дано Френелем в 1823 г. Он показал, что естественная оптическая активность является особым типом двойного лучепреломления. В оптически активных средах скорость распространения света различна для лучей, поляризованных по правому и левому кругу. Вследствие этого показатели преломления этих лучей также имеют различные

значения. Линейно поляризованный свет можно представить как суперпозицию двух волн с одинаковыми частотами и амплитудами, одна из которых обладает правой, а другая левой циркулярной поляризацией.

В случае кристаллов главной причиной оптической активности считается асимметрия внешней формы. Примером могут служить кристаллы кварца, которые могут существовать в двух модификациях, которые зеркально симметричны. Одна из них является право вращающей, другая – лево вращающей. Для аморфных тел оптическая активность связана со строением сложных молекул активной среды. Пространственная структура таких молекул не имеет ни центра симметрии, ни плоскости симметрии. Наиболее простая модель таких молекул – это отрезок спирали.

Молекулы оптически активных веществ, например сахара, имеют одинаковое направление закручивания винта (одинаковую спиральность). Спиральность винта не зависит от того, с какой стороны на него смотреть. Поэтому раствор, в котором молекулы сахара ориентированы случайно, имеет спиральность, которая совпадает со спиральностью одной молекулы. Из-за этого скорость распространения света в растворе сахара различна для лучей с правой и левой круговой поляризацией. Интересно, что молекулы всех важнейших биологических веществ (аминокислоты, нуклеиновые кислоты, белки, углеводы) также не имеют зеркальных антиподов, в отличие от молекулярных структур неживой природы. Причина этого до сих пор не выяснена. Очевидно, что это свойство имеет фундаментальное значение, потому что по каким-то причинам «выгодно» для жизни. Естественная оптическая активность является одним из наиболее эффективных методов изучения биологических объектов.

Магнитное вращение плоскости поляризации

Фарадей (1861 г.) обнаружил вращение плоскости поляризации в оптически неактивных телах, возникающее под действием магнитного поля. Магнитооптический эффект Фарадея состоит в том, что плоско поляризованное (линейно поляризованное) монохроматическое излучение, прошедшее через изотропную намагниченную среду вдоль направления намагничивания, претерпевает поворот плоскости поляризации на угол φ . Для слабых магнетиков (диамагнетиков и парамагнетиков) величина угла поворота прямо пропорциональна пути l , пройденному светом в этой среде и напряженности магнитного поля H , и определяется по формуле:

$$\varphi = \rho l H, \quad (13)$$

где ρ – константа, характерная для данного вещества и носящая название постоянная Верде, которая зависит от химической природы среды, температуры и длины волны света.

Опыт Фарадея можно провести по схеме, представленной на рисунке 17.

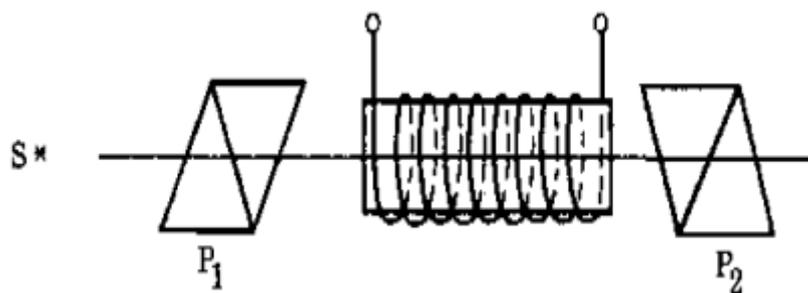


Рисунок 17 – Принципиальная схема оптической части установки Фарадея

Между скрещенными поляризаторами P_1 и P_2 помещают оптически неактивное вещество внутри катушки с большим количеством витков. При отсутствии магнитного поля свет не проходит через систему. При включении электрического тока, внутри катушки возникает магнитное поле и на экране наблюдается светлое пятно (свет проходит через скрещенные поляризаторы). При повороте анализатора (поляризатор P_2) на угол φ (угол поворота плоскости поляризации света в намагниченном веществе) свет уже не проходит через эту систему.

Феноменологически явление Фарадея, так же как и явление естественной оптической активности, можно объяснить двойным лучепреломлением циркулярно поляризованных волн. В данном случае возникает искусственная оптическая активность, то есть активность, возникающая из-за какого-либо внешнего воздействия на вещество. Магнитное поле может так воздействовать на вещество, что оно становится оптически активным, то есть будет вращать плоскость поляризации света, проходящего через такое вещество.

Поляризация света при отражении

Световые лучи, проходя через границу раздела двух сред с разными показателями преломления n_1 и n_2 , испытывают отражение и преломление. Отраженный и преломленный лучи всегда оказываются частично поляризованными. В отраженном свете колебания происходят преимущественно перпендикулярно плоскости падения луча, в преломленном – в плоскости падения (рис. 18).

Брюстер Д. экспериментально установил, что отраженный луч будет полностью поляризован, если отраженный и преломленный лучи перпендикулярны друг другу (рис. 18). Соответствующий угол падения называют углом Брюстера и обозначают i_B .

При угле падения естественного света на границу раздела диэлектриков i_B (угол Брюстера), определяемом соотношением:

$$\operatorname{tg} i_B = n_{21}, \quad (14)$$

отраженный луч максимально поляризован в плоскости, перпендикулярной плоскости падения, где n_{21} – относительный показатель преломления, равный

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (15)$$

Преломленный луч поляризуется максимально, но не полностью.

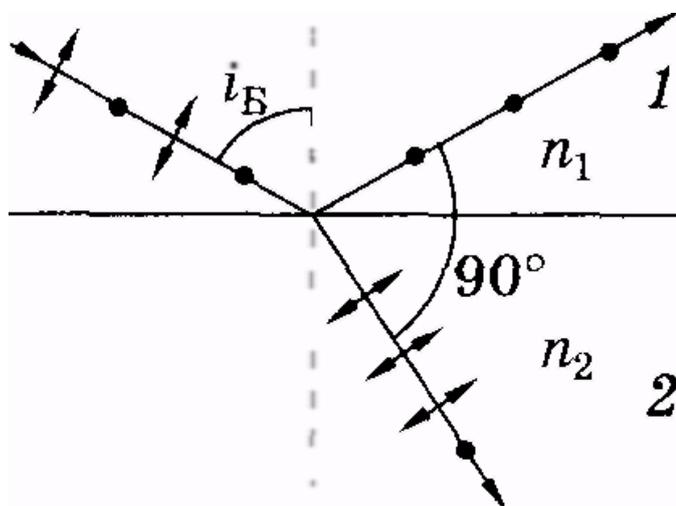


Рисунок 18 – Закон Брюстера: максимальная поляризация отраженного света на границе двух диэлектриков

Докажем, что если свет падает на границу раздела под углом i_B , то отраженный и преломленный лучи взаимно перпендикулярны.

Так как согласно закону Брюстера и закону преломления света

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} i_B &= \frac{\sin i_B}{\cos i_B} = n_{21} \\ n_{21} &= \frac{\sin i_B}{\sin i_2} \end{aligned} \right\}, \quad (16)$$

но одновременно равенства (12) могут выполняться, если

$$\cos i_B = \sin i_2,$$

откуда следует

$$i_B + i_2 = \pi/2. \quad (17)$$

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3-42

Цель работы: Изучение свойств поляризованного света и закона Малюса.

Задачи работы:

1. Экспериментальная проверка закона Малюса.
2. Определение степени поляризации света.

Приборы и оборудование

Источник естественного света, поляризатор, анализатор, фотоэлемент, микроамперметр.

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка приведена на рисунке 19. При выполнении работы используется источник естественного света (1). Диафрагма (2) позволяет регулировать ширину светового пучка. Естественный свет, проходя через поляризатор (3), становится поляризованным. Анализатор (4) имеет шкалу углов и может поворачиваться вокруг оптической оси, меняя направление своей плоскости пропускания света. После прохождения анализатора свет регистрируется фотоприемником (6), который соединен с микроамперметром (7). Для уменьшения освещенности фотоэлемента (6) от внешних источников установлен экран (5) в виде полой металлической трубки.

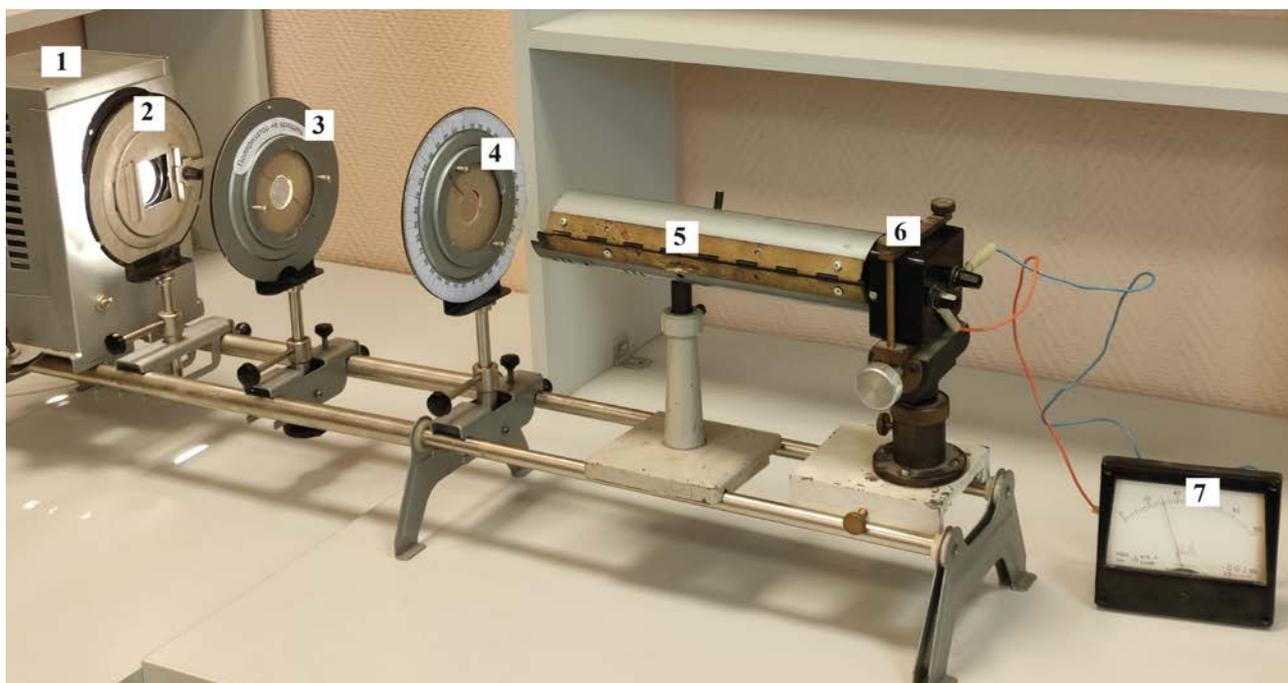


Рисунок 19 – Схема экспериментальной установки

Порядок выполнения работы

1. Добейтесь того, чтобы используемые в работе приборы (1), (2), (3), (4), (6) стояли на одной прямой вдоль плоскости стола и их центры совпадали по высоте. Установите источник света (1) таким образом, чтобы свет от источника проходил через центр анализатора (4) и попадал на всю центральную часть фотоэлемента (6), то есть проходил вдоль оптической оси.

2. Не включая источник излучения (1), измерьте с помощью микроамперметра интенсивность фонового освещения фотоэлемента I_{ϕ} , которое создается другими источниками (дневной свет, лампы освещения). Запишите в отчет значение I_{ϕ} .
3. Включите источник света (лампу). Наблюдая за показаниями микроамперметра, медленно поворачивайте анализатор (4) (рис. 19) в ту и другую сторону так, чтобы показание микроамперметра было максимальным. Это означает, что свет, вышедший из поляризатора, полностью пропускается анализатором, то есть плоскости поляризации поляризатора и анализатора совпадают. Определите по шкале углов на анализаторе значение α_1 и запишите в первую строку таблицы. Если поворот плоскости анализатора относительно нулевого значения произведен по ходу часовой стрелки, угол считать отрицательным, если против – положительным.
4. Определите для установленного α_1 значение силы фототока I . Полученный результат занесите в таблицу.
5. Не меняя положения поляризатора (3), поверните анализатор (4) на 10° . Измерьте силу фототока. Результат запишите в таблицу.
6. Поворачивая анализатор каждый раз на 10° вплоть до значения угла 90° , измерьте соответствующие значения силы фототока. Полученные данные запишите в таблицу.

Таблица

№	α (градусы)	φ (градусы)	$\cos^2 \varphi$	I , мкА	$I - I_{\phi}$, мкА
1		0			
2		10			
3		20			
4		30			
5		40			
6		50			
7		60			
8		70			
9		80			
11		100			
12		110			
13		120			
14		130			
15		140			
16		150			
17		160			
18		170			
19		180			

7. Вычислите значения угла φ по формуле $\varphi = \alpha \pm \alpha_1$. Первое значение φ должно быть близким к 0° .
8. Постройте график зависимости силы фототока $I - I_\varphi$ от угла φ .
9. Постройте график силы фототока $I - I_\varphi$ в полярных координатах.
10. Вычислите значения $\cos^2 \varphi$. Результаты запишите в таблицу.
11. Постройте график зависимости силы фототока $I - I_\varphi$ от $\cos^2 \varphi$ в пределах углов от 0° до 90° . Согласно закону Малюса, на графике должна получиться прямая линия. Сделайте вывод.
12. По формуле (2) рассчитайте степень поляризации света P . В качестве максимальной I_{max} и минимальной I_{min} интенсивностей света возьмите максимальное и минимальное значения из последней колонки таблицы, которые найдены с учетом фоновой освещенности. Сравните полученную величину со значением P для линейно поляризованного света. Сделайте вывод.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое свет? Укажите диапазон видимого излучения.
2. В чем заключается свойство поперечности электромагнитных волн? Как направлены векторы напряженности электрического и магнитного полей в световой волне по отношению к вектору фазовой скорости? (Сделать рисунок).
3. Какой свет называется естественным (неполяризованным)? Поляризованным? Линейно поляризованным? Поясните, приведите иллюстрацию.
4. Для чего используются поляризаторы и анализаторы?
5. В чем состоит явление двойного лучепреломления?
6. Расскажите о явлении дихроизма. Как называются поляризаторы, действие которых основано на явлении дихроизма?
7. Что собой представляет поляроид? Какими преимуществами обладают поляроиды по сравнению другими поляризаторами?
8. Выведите закон Малюса.
9. Как должны быть расположены плоскости поляризатора и анализатора, чтобы проходящий через них свет на экране, помещенном за анализатором, создавал максимальную и минимальную освещенности?
10. Как рассчитывается интенсивность света после прохождения поляризатора, если на поляризатор падал естественный свет?
11. Как найти степень поляризации света? Приведите формулу и поясните ее.
12. В каком случае степень поляризации равна нулю и единице? В каком случае она принимает промежуточное между нулем и единицей значение?
13. Какой вид должна иметь зависимость интенсивности прошедшего через анализатор света от $\cos^2 \varphi$?
14. Что называется искусственной оптической анизотропией? Какими способами создается искусственная оптическая анизотропия?
15. Какие вещества называются оптически активными? От чего зависит угол поворота плоскости поляризации кристаллов, растворов?
16. Расскажите о поляризации света при отражении от поверхности диэлектрика.
17. Расскажите о порядке выполнения работы. Как определить совпадение плоскостей поляризации поляризатора и анализатора?
18. Каким образом в данной работе определяется интенсивность света?

ИСПОЛЬЗУЕМАЯ И РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев, И. В. Курс общей физики. Волны. Оптика. В 5 кн. Кн. 4 / И. В. Савельев. – Москва: АСТ., Астрель, 2006. – 256 с. – Текст: непосредственный.
2. Иродов, И. Е. Волновые процессы / И. Е. Иродов. – Москва: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2020. – 266 с. – Текст: непосредственный.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Сивухин, Д. В. Общий курс физики. Т. 3. / Д. В. Сивухин. – Москва: Физматлит, 2004. – 792 с. – Текст: непосредственный.
2. Ландсберг, Г. С. Оптика: учебное пособие для студ. физических спец. вузов / Ландсберг. – Москва: Физматлит, 2003. – 848 с. – Текст: непосредственный.
3. Трофимова, Т. И. Курс физики / Т. И. Трофимова. – Москва: Издательский центр «Академия», 2020. – 560 с. – Текст: непосредственный.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Образец отчета по лабораторной работе № 3-42. Изучение закона Малюса

1. **Цель работы:**

2. **Экспериментальная установка:**

3. **Приборы и оборудование:**

1 – источник света

2 – диафрагма

3 – поляризатор

4 – анализатор

5 – экран для уменьшения освещенности фотоэлемента от внешних источников

6 – фотоприемник

7 – микроамперметр.

4. **Расчетные формулы:**

Степень поляризации

5. **Результаты измерений и вычислений:**

Интенсивность фонового освещения фотоэлемента $I_{\phi} =$

Таблица 1

№	α (градусы)	φ (градусы)	$\cos^2 \varphi$	I , мкА	$I - I_{\phi}$, мкА
1		0			
2		10			
3		20			
4		30			
5		40			
6		50			
7		60			
8		70			
9		80			
10		90			
11		100			
12		110			
13		120			
14		130			
15		140			
16		150			
17		160			
18		170			
19		180			

Степень поляризации излучения осветителя $P =$

6. **Графики:** 1) график зависимости $(I - I_\phi)$ от φ ; 2) график зависимости $(I - I_\phi)$ от $\cos^2 \varphi$; 3) график силы фототока $(I - I_\phi)$ в полярных координатах.

7. **Вывод:**

Учебное издание

**Дёмина Маргарита Юрьевна
Крюков Кирилл Александрович
Лейман Валерий Иванович
Яшкевич Екатерина Александровна**

**ФИЗИКА
ОПТИКА. ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНА МАЛЮСА**

Учебно-методическое пособие

Редактор и корректор М. Д. Баранова
Техн. редактор Д. А. Романова

Учебное электронное издание сетевого распространения

Системные требования:
электронное устройство с программным обеспечением
для воспроизведения файлов формата PDF

Режим доступа: http://publish.sutd.ru/tp_get_file.php?id=202016, по паролю.
- Загл. с экрана.

Дата подписания к использованию 29.12.2023 г. Рег. № 5249/23

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД
198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4.