

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра физики

ИЗУЧЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ СВЕТА

Руководство к лабораторной работе для студентов
всех специальностей

2019

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра физики

УТВЕРЖДАЮ
Зав. каф. физики,
д-р техн. наук, проф.
_____ Е.М. Окс

ИЗУЧЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ СВЕТА

Руководство к лабораторной работе для студентов
всех специальностей

Рецензент:
к.ф.-м.н., доцент
_____ Ю.А. Бурачевский

Разработчики:
д.т.н., профессор
_____ А.С. Климов
ведущий инженер
_____ Н.П. Кондратьева

2019

ВВЕДЕНИЕ

Целью лабораторной работы является изучение поляризации света и проверка закона Малюса для линейно поляризованного света, полученного с помощью пленочного поляроида.

1 КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

В соответствии с электромагнитной теорией Максвелла световые волны, как свободные электромагнитные волны поперечные. Векторы напряженности электрического поля \mathbf{E} и магнитного \mathbf{H} , определяющие мгновенное состояние волны, остаются взаимно перпендикулярными в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны, образуя правовинтовую тройку со скоростью распространения \mathbf{v} (рис.1.1). Однако векторы \mathbf{E} и \mathbf{H} , оставаясь взаимно ортогональными в данной плоскости, могут быть произвольно ориентированы по отношению к скорости распространения волнового фронта. В свободной волне векторы \mathbf{E} и \mathbf{H} изменяются синфазно в пространстве и во времени, одновременно и в одних и тех же точках пространства достигая максимального или минимального значения.

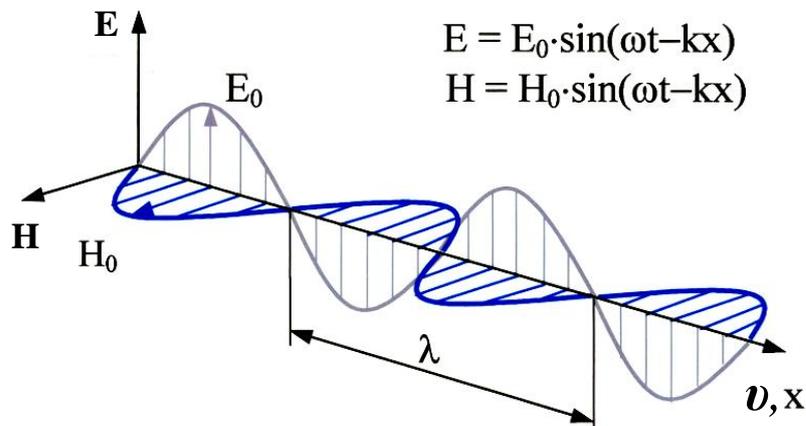


Рисунок 1.1 – Плоская электромагнитная волна

Воздействие электромагнитной волны на вещество сводится к воздействию электромагнитного поля световой волны на свободные и связанные электроны, которое описывается формулой Лоренца $\mathbf{F} = -e(\mathbf{E} + \mu\mu_0[\mathbf{v}, \mathbf{H}])$. Второе слагаемое, равное по модулю $|\mathbf{E}| \cdot |\mathbf{v}|/c$, в веществе мало ($\mathbf{v} \ll c$) и обычно не учитывается. Поэтому для большинства оптических явлений определяющую роль играет электрический вектор \mathbf{E} , который называют световым вектором и при

рассмотрении оптических явлений в основном оперируют именно этим вектором.

Если колебания вектора E совершаются в самых различных направлениях перпендикулярных лучу, то такой свет называют *неполяризованным*. Неполаризованный или *естественный* свет испускают лампы накаливания, Солнце и другие тепловые источники.

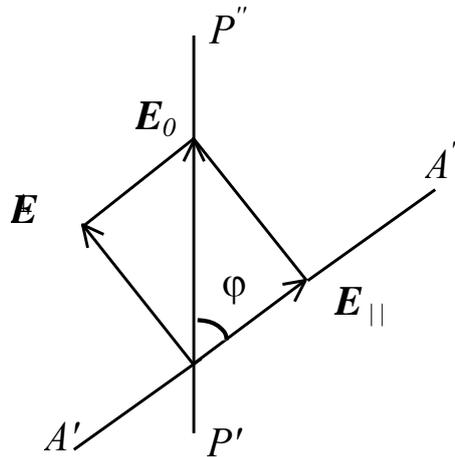
Если вектор E (соответственно, перпендикулярный ему вектор H) изменяется упорядоченно, то свет называют *поляризованным*: если в каждой фиксированной точке конец вектора E описывает круг или эллипс, то этот свет имеет *круговую* или *эллиптическую поляризацию*. Если колебания вектора E все время остаются в одной плоскости, содержащей векторы E и D , то это световая волна называется *линейно поляризованной* или *плоскополяризованной*. Плоскость, проходящая через векторы E и D , называется *плоскостью поляризации*, или *плоскостью колебаний* линейно поляризованной световой волны. В фиксированный момент времени, при линейной поляризации конец вектора напряженности с началом на луче при перемещении по лучу описывает синусоиду на плоскости, в которой лежат луч и вектор напряженности E (см. рис.1.1). В фиксированной точке пространства на луче, при линейной поляризации конец вектора E колеблется по гармоническому закону по линии колебаний. При круговой и эллиптической поляризации конец вектора E описывает соответственно окружность и эллипс с центром на луче в плоскости, перпендикулярной лучу. Круговая и эллиптическая поляризации бывают правой и левой в зависимости от направления движения конца вектора E вокруг луча (направленного на наблюдателя). *Частично поляризованным* светом называется свет, в котором одно из направлений колебаний оказывается преимущественным, но не единственным. Такой свет можно рассматривать как смесь естественного света и поляризованного. Частично поляризованный свет количественно характеризуется *степенью поляризации* P , которая для света, обладающего частичной линейной поляризацией, определяется как

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (1.1)$$

где I_{\max} и I_{\min} – максимальная и минимальная интенсивности света, соответствующие двум взаимно перпендикулярным компонентам вектора E . Для линейно поляризованного света $I_{\min} = 0$, $P = 1$, для естественного света $I_{\max} = I_{\min}$ и $P = 0$.

Поляризованный свет можно получить из естественного света с помощью специальных устройств, называемых поляризаторами. Поляризаторы пропускают колебания, параллельные главной плоскости поляризатора, и задерживают колебания, перпендикулярные этой плоскости. Действие поляризаторов основано на поляризации света при его отражении и преломлении на границе раздела двух диэлектрических сред, а также на явлениях дихроизма (избирательное поглощение света разных поляризаций и направлений) и двойного лучепреломления (позволяющего получить линейно поляризованный свет с $P = 1$). При прохождении света через анизотропные кристаллы, обладающие сильно выраженным дихроизмом (турмалин, герапатит), или через дихроичные пленки из длинных органических молекул (поглощающие свет в направлении длинной оси), поглощение света зависит от направления распространения света и от ориентации электрического вектора световой волны, а также от длины волны. В зависимости от ориентации вектора E относительно направления оптической оси кристалла из него выходит линейно поляризованный в одной из плоскостях луч. В кристалле турмалина на пути около 1 мм практически полностью поглощается обыкновенный луч, а в герапатите один из лучей поглощается полностью уже при толщине 0.1 мм. Эти кристаллы используются для изготовления поляроидов, которые применяются в качестве поляризаторов. Источником линейно поляризованного излучения являются некоторые лазеры. Если поляризованный свет интенсивностью I_0 направить на другой поляризатор, то последний будет играть роль анализатора, применяемого для исследования характера и степени поляризации света. Интенсивность света, прошедшего через систему поляризатора и анализатора, будет зависеть от их взаимной ориентации. Интенсивность I линейно поляризованного света, прошедшего через анализатор, определяется по закону Малюса.

Пусть на анализатор падает линейно поляризованная световая волна с амплитудой напряженности электрического поля E_0 , и плоскость поляризации $P'P''$ этой волны образует с главной плоскостью разрешенных колебаний анализатора $A'A''$ угол φ (рис.1.2). Амплитуду E_0 можно разложить на две взаимно перпендикулярные составляющие E_{\perp} и E_{\parallel} . Колебания E_{\parallel} совершаются параллельно главной плоскости анализатора $A'A''$ и пропускаются анализатором. Колебания E_{\perp} , перпендикулярные главной плоскости $A'A''$, не проходят через анализатор. Амплитуда выходящего из анализатора света будет равна $E = E_0 \cdot \cos\varphi$.



$P'P''$ – плоскость поляризации падающего на анализатор света;
 $A'A''$ – главная плоскость анализатора.

Рисунок 1.2 – К выводу закона Малюса

Поскольку интенсивность электромагнитной волны пропорциональна квадрату напряженности электрического поля, то интенсивность I линейно поляризованной световой волны, прошедшей анализатор, будет пропорциональна квадрату косинуса угла φ между плоскостью $P'P''$ колебаний вектора E_0 в падающей волне и главной плоскостью $A'A''$ анализатора:

$$I = I_0 \cdot \cos^2 \varphi. \quad (1.2)$$

Соотношение (1.2) является математическим выражением закона Малюса для линейно поляризованного света. Если на анализатор падает естественный свет, то вне зависимости от ориентации плоскости анализатора, интенсивность прошедшего света будет равна половине интенсивности падающего света, так как для естественного света все направления колебаний равновероятны и среднее значение $\langle \cos^2 \varphi \rangle = 1/2$:

$$\langle \cos^2 \varphi \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \cos^2 \varphi \cdot d\varphi = \frac{1}{2}.$$

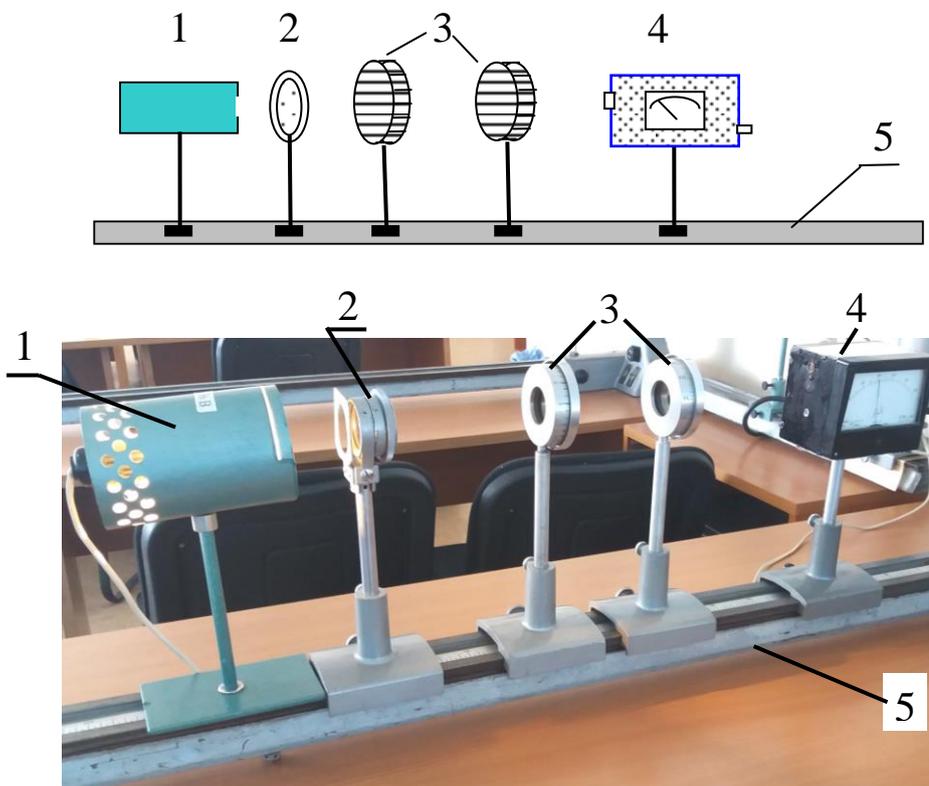
Если на анализатор падает частично поляризованный свет, то при исследовании закона Малюса необходимо вычесть неполяризованную часть света, равную минимальной интенсивности прошедшего света при скрещенных плоскостях преимущественной поляризации $P'P''$ частично поляризованного света и разрешенных колебаний анализатора $A'A''$.

Если плоскости $A'A''$ и $P'P''$ (см. рис.1.2) совпадают, то анализатор пропускает весь падающий на него световой поток ($I_{max} = I_0$). Если угол между плоскостями $A'A''$ и $P'P''$ составляет 90° , то идеальный

анализатор вообще не пропускает линейно поляризованный свет ($I_{min}=0$). Степень "идеальности" анализатора можно определить, воспользовавшись выражением для степени поляризации света (1.1). Для идеального анализатора $I_{max}=I_0$, $I_{min}=0$ и степень поляризации света, вышедшего из анализатора $P=1$. Для используемых в данной работе поляризаторов степень поляризации порядка 0.98 для желто-зеленой области спектра, что близко идеальной. Для красной и фиолетовой областей спектра степень поляризации невелика.

2 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Схема и внешний вид установки для проверки закона Малюса приведены на рисунке 2.1.



1 – лампа накаливания; 2 – линза; 3 – поляризаторы;
4 – блок регистрации света; 5 – оптическая скамья.

Рисунок 2.1– Схема и внешний вид установки для проверки закона Малюса

В качестве источника света используется нить накала электролампы 1, рассчитанной на 36 В. Электролампа устанавливается так, чтобы ее нить накала находилась в фокальной плоскости линзы 2.

После линзы свет в виде параллельного пучка лучей падает на пленочные поляроиды 3, вставленные в оправы, позволяющие поворачивать поляроиды вокруг горизонтальной оси. Первый поляроид является поляризатором, второй – анализатором. Блок регистрации света 4, состоит из полупроводникового фоторезистора, сопротивление которого при освещении уменьшается, а проводимость увеличивается за счет появления пар электрон-дырка (внутреннего фотоэффекта). Фоторезистор, на который подается напряжение 6 В, помещен в светонепроницаемый кожух и соединен последовательно с микроамперметром, регистрирующим фототок. Чувствительность регистрирующей системы можно изменять подстроечным резистором, установленным на блоке справа от микроамперметра. Вся установка крепится на оптической скамье 5.

Лампа накаливания является источником естественного света. Для получения линейно поляризованного излучения применяется пленочный поляроид - поляризатор. Второй поляроид служит анализатором падающего на него излучения и позволяет наблюдать изменение интенсивности светового потока по мере вращения плоскости поляризации анализатора (см. рис.2.1) относительно плоскости поляризации падающего света. Угол поворота плоскости анализатора отсчитывается по шкале от 0° до 180° , нанесенной на оправу. Интенсивность света, прошедшего через анализатор, определяется по величине фототока, регистрируемого блоком 4. Если при скрещенных плоскостях поляризации анализатора и поляризатора фототок не равен нулю, то это означает, что на фоторезистор падает посторонний свет или степень поляризации света, выделяемого поляризатором, не высока. Пленочные поляризаторы, применяемые в данной работе, не обеспечивают 100 % поляризации света в области максимальной чувствительности (650 -760 нм) фоторезисторов, а интенсивность излучения электролампы в этой области спектра еще значительна. Следовательно, с помощью фоторезистора регистрируется интенсивность частично поляризованного света. Поэтому при проверке закона Малюса, из интенсивности света, прошедшего через поляризатор и анализатор необходимо вычесть интенсивность неполяризованной части света, равной показанию микроамперметра при скрещенных поляризаторе и анализаторе. Предполагается, что интенсивность света пропорциональна току, проходящему через освещаемый фоторезистор.

3 ЗАДАНИЯ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

3.1 Собрать установку согласно рис.2.1 и включить лампу накаливания **на 36 В!** Направить световой луч в центр окошка фоторегистрирующего блока.

3.2 Включить в сеть 220 В блок питания фоторегистрирующего устройства и переключить тумблер на правой стороне панели в положение “вкл.”, предварительно скрестив поляроиды, ориентируясь обозначенными на них направлениями плоскостей поляризации (п-п). Вращая один из поляроидов, установить величину максимального отклонения стрелки микроамперметра с помощью подстроечного резистора, установленного на блоке справа от микроамперметра.

3.3 Выбрать за $\varphi=0^\circ$ наиболее удобное деление на оправе анализатора (учитывая изменение φ от 0° до 90°) и вращением поляризатора добиться максимального отклонения стрелки микроамперметра. Убедиться, что при вращении анализатора фототок периодически изменяется от максимального при выбранном $\varphi=0^\circ$ до минимального значений I_{min} при $\varphi=90^\circ$. Значение I_{min} занести в таблицу 3.1.

3.4 Постепенно поворачивать анализатор от 0° до 90° , через каждые 10° записывая в таблицу 3.1 значения фототока i и соответствующее деление φ шкалы анализатора. Считать, что фототок i прямо пропорционален интенсивности падающего света.

Таблица 3.1– Результаты измерений

φ°	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
$\cos^2\varphi$	1	0.970	0.883	0.750	0.587	0.413	0.250	0.117	0.030	0
i										
$I = i - I_{min}$										

3.5 По данным таблицы 3.1 построить график зависимости интенсивности I линейно поляризованной части света, проходящего через анализатор, от квадрата косинуса угла поворота φ . С учетом интенсивности I_{min} неполяризованной части света, равной показанию прибора при скрещенных (при $\varphi=90^\circ$) поляризаторах, $I = i - I_{min}$.

Если построенный график зависимости $I = f(\cos^2\varphi)$ представляет собой прямую линию, это означает, что интенсивность линейно поляризованного света, прошедшего через анализатор, подчиняется закону Малюса.

4 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

4.1 Чем отличаются естественный свет и линейно поляризованный, поляризованный по кругу, эллиптически поляризованный и частично поляризованные излучения?

4.2 Какова поляризация света от лампы накаливания? Каковы способы получения линейно поляризованного света?

4.3 Какое направление колебаний вектора E пропускает поляроид?

4.4 Как зависит интенсивность излучения, проходящего через поляризатор при повороте его главной плоскости, от характера поляризации падающего света?

5 РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

5.1 Савельев, И.В. Курс общей физики [Электронный ресурс]: учебник в 3-х т. Т. 2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика.-14-е изд., стер. / И. В. Савельев. - СПб.: Лань, 2018. - с.493-496.

5.2 Савельев, И.В. Курс общей физики : учебное пособие для втузов: В 5 кн. Кн. 4: Волны. Оптика. / И. В. Савельев. - М.: Астрель, 2008. -256 с.

5.3 Детлаф, А.А. Курс физики: учебное пособие. – 6-е изд. /А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. -М.: Изд. центр “Академия”, 2007. -720 с.