

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое училище им. Н. Э. Баумана

С.П. ЕРКОВИЧ, С. А. ВОРОБЬЕВ, А. Ф. НАУМОВ

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ СВЕТА

Методические указания к лабораторной работе О-22 по курсу общей физики

Под редакцией А. Г. Андреева

Москва, 1987

Цель работы - ознакомление со способами получения линейно поляризованного света, экспериментальная проверка закона Малюса по методу статистического корреляционного анализа, измерение степени поляризации света.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Как известно, световые волны поперечны, то есть электрический (\vec{E}) и магнитный (\vec{H}) векторы колеблются в плоскостях, перпендикулярных направлению распространения волны (лучу \vec{S}). Обычные источники света являются совокупностью огромного числа быстро высвечивающихся ($10^{-7} \dots 10^{-8}$ с) элементарных источников (атомов или молекул), испускающих свет независимо друг от друга, с разными фазами и с разными ориентациями векторов \vec{E} и \vec{H} . Ориентация векторов \vec{E} и \vec{H} в результирующей волне поэтому хаотически изменяется во времени, так что в плоскости, перпендикулярной лучу \vec{S} , все направления колебаний оказываются равноправными. Такой свет называют естественным или неполяризованным.

При помощи специальных приспособлений (поляризаторов) естественный свет может быть превращен в линейно поляризованный. В линейно поляризованной световой волне пара векторов \vec{E} и \vec{H} не изменяет с течением времени своей ориентации. Плоскость, проходящая через вектор \vec{E} и луч \vec{S} называется в этом случае плоскостью колебаний, а проходящая через вектор \vec{H} и луч \vec{S} , называется плоскостью поляризации.

Естественный свет можно представить в виде суперпозиции двух некогерентных взаимно перпендикулярно поляризованных волн. На рис.1 представлен естественный свет, распространяющийся вдоль оси OZ в виде суперпозиции двух некогерентных волн, в одной из которых вектор \vec{E} колеблется в плоскости XOZ с амплитудой E_x , а в другой, в плоскости YOZ , с амплитудой E_y . В случае неполяризованного света $E_x = E_y$.

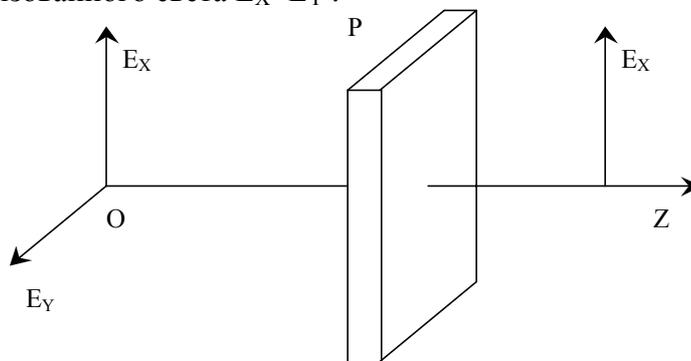


Рис. 1

Если на пути луча установить приспособление, которое пропускает только одну из упомянутых составляющих, то луч окажется линейно поляризованным. Такое оптическое устройство, которое преобразует естественный свет в линейно поляризованный, называется поляризатором.

Плоскость колебаний электрического вектора в волне, прошедшей через поляризатор, называется главной плоскостью поляризатора. Главной плоскостью поляризатора, показанного на рис.1, является плоскость XOZ.

Интенсивность I электромагнитной волны пропорциональна квадрату амплитуды вектора \vec{E} . Поэтому интенсивность естественного света, падающего на поляризатор P (рис.1) с точностью до коэффициента пропорциональности, будет $I_0 = E_x^2 + E_y^2 = 2E_x^2$, а интенсивность света, прошедшего через поляризатор, $I_p = E_x^2 = \frac{1}{2} I_0$.

Всякий поляризатор может быть использован для исследования поляризованного света. В этом случае он называется анализатором.

Интенсивность I линейно поляризованного света после прохождения через анализатор зависит от угла φ между главными плоскостями поляризатора и анализатора. Для установления этой зависимости обратимся к рис.2. Через анализатор A, главная плоскость которого образует угол φ по отношению к главной плоскости поляризатора P, проходит составляющая электрического вектора, параллельная главной плоскости анализатора и равная $E_x \cos \varphi$. Поэтому интенсивность света I , прошедшего через анализатор, точно до коэффициента пропорциональности

будет $I = E_x^2 \cos^2 \varphi = \frac{I_0}{2} \cos^2 \varphi$. Соотношение

$$I = \frac{I_0}{2} \cos^2 \varphi, \quad (1)$$

согласно которому интенсивность света после анализатора пропорциональна квадрату косинуса угла между главными плоскостями поляризатора и анализатора, было установлено в 1808 г. Малюсом и называется законом Малюса.

Из закона Малюса следует, что если главные плоскости поляризатора и анализатора совпадают ($\varphi=0$), то интенсивность света максимальна. Если главные плоскости скрещены ($\varphi=\pi/2$), то интенсивность света равна нулю.

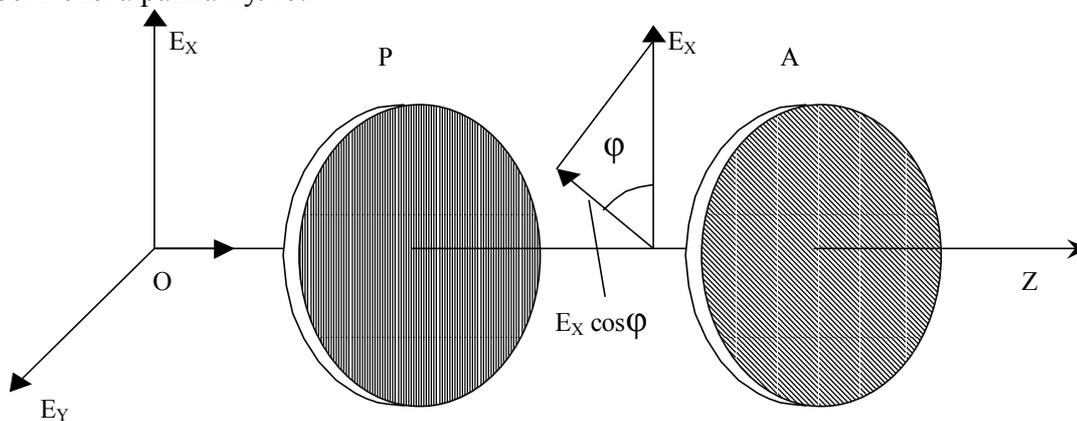


Рис.2

Опишем несколько способов получения линейно поляризованного света.

1. Преломление света в двоякопреломляющих кристаллах. Некоторые кристаллы обладают свойством двойного лучепреломления. Преломляясь в таком кристалле, световой луч разделяется на два луча с взаимно перпендикулярными плоскостями колебаний. Отклоняя один из лучей в сторону, можно получить линейно поляризованный свет. Так устроены поляризационные призмы.

2. Поглощение света в дихроических пластинках. У некоторых двоякопреломляющих кристаллов коэффициенты поглощения света для двух взаимно перпендикулярно поляризованных лу-

чей отличаются настолько сильно, что уже при небольшой толщине кристалла один из лучей поглощается почти полностью, и из кристалла выходит линейно поляризованный пучок света. Это явление носит название оптического дихроизма. Поляризаторы, изготовленные из дихроичных пластинок, называются поляроидами.

В данной работе поляроиды используются в качестве поляризатора и анализатора.

Поляроиды не являются идеальными поляризаторами. Естественный свет после прохождения через поляроид оказывается поляризованным лишь частично. Одной из характеристик частично поляризованного света является степень поляризации, которая определяется соотношением

$$P = \frac{I_{\text{MAX}} - I_{\text{MIN}}}{I_{\text{MAX}} + I_{\text{MIN}}}, \quad (2)$$

где I_{MAX} и I_{MIN} - наибольшая и наименьшая интенсивности, наблюдаемые с помощью идеально анализатора, установленного на пути частично поляризованного света. В случае полностью поляризованного света, как видно из формул (2) и (1), степень поляризации равна единице; степень поляризации естественного света равна нулю.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Прибор для экспериментальной проверки закона Малюса представляет собой коробку, на верхней части которой расположены лампа накаливания 1 (рис.3) и две стойки для крепления поляроидов - поляризатора и анализатора. Лампа накаливания является источником естественного света. В одной из стоек неподвижно закреплен поляризатор. Анализатор закреплен в диске с делениями для отсчета угла поворота анализатора и может свободно поворачиваться (от руки) вокруг горизонтальной оси. Шкала на диске имеет 360 делений, каждое из которых соответствует повороту на 1° .

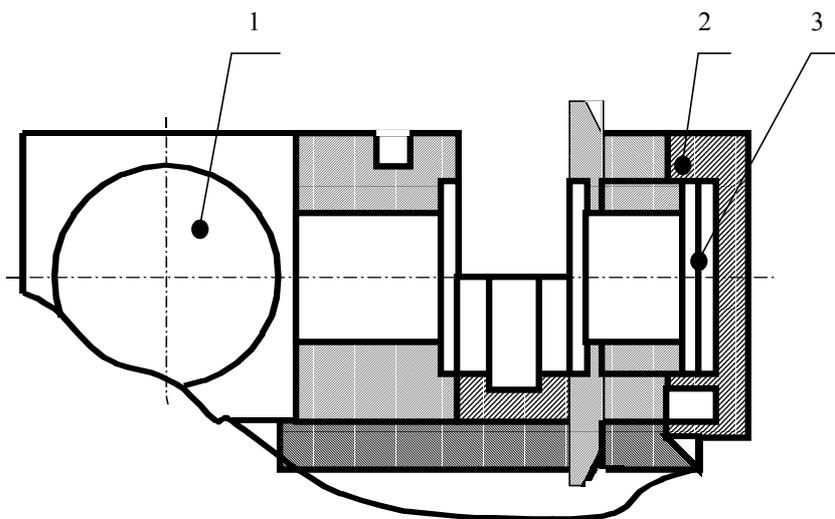


Рис.3

На откидной крышке 2 в изолирующих кольцах закреплен фотоприемник 3. Фототок регистрируется непосредственно электроизмерительным прибором с числовым отсчетом. Фотоприемник работает в линейном режиме, при котором сила фототока $J_{\text{Ф}}$ пропорциональна интенсивности I падающего на него света. В этом случае вместо равенства (1) можно записать

$$J_{\text{Ф}} \sim \cos^2 \varphi$$

Для работы в светлом помещении имеется дугообразная крышка, с помощью которой перекрывается «боковой» свет, падающий на анализатор.

ВЫПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Проверить правильность присоединения проводов от фотоприемника к электроизмерительному прибору.
2. Включить прибор в электрическую сеть.
3. Открыть крышку с фотоприемником.

4. Вращая анализатор, убедиться в изменении интенсивности света, прошедшего от световой лампы через поляроиды.
5. Закрыть крышку.
6. Установить анализатор на деление φ_0 , указанное на установке. Угол φ_0 соответствует взаимно параллельному расположению главных плоскостей поляризатора и анализатора и, следовательно, максимуму интенсивности света, прошедшего анализатор.
7. Вращая анализатор, снять зависимость силы фототока J_Φ от угла поворота анализатора β через каждые 10° от φ_0 до $(\varphi_0 + 90^\circ)$ (всего 10 точек). При этом угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора будет $\varphi = \beta - \varphi_0$.
8. Результаты измерений силы фототока J_Φ занести в табл.1, в которой указаны значения соответствующих косинусов и их квадратов.

Таблица 1

№ п/п	β^0	φ^0	$\cos \varphi$	$\cos^2 \varphi$	J_Φ , мкА
1	φ_0	0	1	1	
2	φ_0+10	10	0,985	0,97	
3	φ_0+20	20	0,940	0,88	
4	φ_0+30	30	0,866	0,75	
5	φ_0+40	40	0,766	0,59	
6	φ_0+50	50	0,643	0,41	
7	φ_0+60	60	0,500	0,25	
8	φ_0+70	70	0,342	0,12	
9	φ_0+80	80	0,174	0,03	
10	φ_0+90	90	0,000	0,00	

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Проверка закона Малюса.

Так как сила фототока J_Φ пропорциональна интенсивности света I , падающего на фотоэлемент, то при справедливости закона Малюса (1) должна выполняться зависимость

$$J_\Phi = \frac{1}{2} J_\Phi \cos^2 \varphi, \quad (3)$$

Обозначая фототок через y , а $\cos^2 \varphi$ через x , зависимость (3) можно представить в виде $y = a_1 x$. Следовательно, для подтверждения закона Малюса необходимо, чтобы на основании данных опыта подтверждалась гипотеза о линейной зависимости величин x и y . С этой целью по результатам измерений вычисляют основные статистические показатели эксперимента - средне-квадратические отклонения :

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}, \quad S_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{y} - y_i)^2}$$

где n - число измерений, \bar{x} , \bar{y} - средние значения величин x_i и y_i , коэффициент ковариации

$$K_{xy} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)(\bar{y} - y_i),$$

и коэффициент корреляции

$$r = K_{xy} / S_x S_y$$

Для удобства вычислений рекомендуется воспользоваться табл.2.

Таблица 2

№ п/п	$x = \cos^2 \varphi$	$y = J_\varphi, \text{ мкА}$	$(\bar{x} - x_i)^2$	$(\bar{y} - y_i)^2$	$(\bar{x} - x_i)(\bar{y} - y_i)$
1					
.					
.					
.					
10					
	$\bar{x} = \dots$	$\bar{y} = \dots$	$\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2 = \dots$	$\sum_{i=1}^n (\bar{y} - y_i)^2 = \dots$	$\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)(\bar{y} - y_i) = \dots$

Если коэффициент корреляции удовлетворяет неравенству

$$\frac{|r|}{\sqrt{1-r^2}} \sqrt{n-2} > t_\alpha(f) \quad (4)$$

то с вероятностью ошибки α можно считать, что величины x и y действительно связаны линейной зависимостью и, следовательно, закон Малюса подтверждается.

Значения $t_\alpha(f)$ - квантили распределения Стьюдента для различных уровней значимости α и числа степеней свободы $f=n-2$ приведены в таблице, имеющейся в лаборатории. По этой таблице и критерию (4) следует определить уровень значимости α и достоверность $\gamma = n-2$ подтверждения закона Малюса в условиях данного эксперимента.

2. Построение графика регрессии.

Если на опыте закон Малюса подтверждается, то экспериментальные точки на графике $y=f(x)$ должны располагаться вблизи линии регрессии вида

$$y_x = a_0 + a_1 x \quad (5)$$

для которой коэффициенты регрессии a_0 и a_1 рассчитываются по экспериментальным данным с помощью соотношений

$$a_0 = \bar{y} - r \frac{S_y}{S_x} \bar{x} = \bar{y} - \frac{K_{xy}}{S_x^2} \bar{x} \quad (6)$$

$$a_1 = r \frac{S_x}{S_y} = \frac{K_{xy}}{S_y^2} \quad (7)$$

Вычислив по этим формулам коэффициенты a_0 и a_1 , постройте с их помощью график регрессионной зависимости $y_x = a_0 + a_1 x$. На поле графика нанесите все экспериментальные точки.

Оцените среднеквадратичные ошибки коэффициентов эмпирического уравнения регрессии по формулам

$$S_{a_0}^2 = S_{yx}^2 \left(\frac{1}{n} + \frac{(\bar{x})^2}{(n-1)S_x^2} \right), \quad (8)$$

$$S_{a_1}^2 = S_{yx}^2 \frac{1}{(n-1)S_x^2}, \quad (9)$$

$$S_{yx}^2 = \frac{n-1}{n-2} S_y^2 (1-r^2) \quad (10)$$

3. Вычисление степени поляризации света, прошедшего через поляририд.

Поляририд не является совершенным поляризатором. Так как в нашей работе не только поляризатор, но и анализатор не являются идеальными, то степень поляризации определить непосредственно по соотношению (2) нельзя. Можно показать, что в этом случае степень поляризации

$$P = \frac{1 - a_0 / (2a_1)}{1 + a_0 / (2a_1)} \quad (11)$$

где a_0 и a_1 - коэффициенты регрессии, вычисленные по формулам (6) и (7).

Вычислите степень поляризации, подставив в (11) найденные значения a_0 и a_1 .

Оцените квадратичную погрешность степени поляризации по квадратичным погрешностям величин a_0 и a_1 , пользуясь формулой

$$S_P = \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial a_0}\right)^2 S_{a_0}^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial a_1}\right)^2 S_{a_1}^2} = \sqrt{\frac{1}{a_1^2} S_{a_0}^2 + \frac{a_0^2}{a_1^4} S_{a_1}^2}$$

где S_{a_0} и S_{a_1} - среднеквадратичные ошибки коэффициентов регрессии, найденные по формулам (8) и (9).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой свет называют естественным?
2. Какой свет называют линейно поляризованным?
3. В чем состоит закон Малюса?
4. Чем вызвано отличие от нуля коэффициента регрессии a_0 ?

ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.3. Квантовая оптика, Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. - 2-е изд., перераб. - М.: Наука, 1982. - 304 с.
2. Ландсберг Г. С. Оптика. - М.: Наука, 1976. - 926 с.
3. Матвеев А.Н. Оптика. - М.: Высшая школа, 1985. - 351 с.
4. Еркович С.П. Методические указания по применению регрессионного и корреляционного анализа для обработки результатов измерений в физическом практикуме. - М.: МВТУ, 1984. - 9 с.