

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3.02.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА

Введение

В данной работе предстоит исследовать явления, связанные с поляризацией электромагнитных волн.

Волной называют процесс распространения колебаний. Если происходит распространение механических колебаний в упругой среде, то мы имеем дело с механическими или упругими волнами, частным случаем которых являются звуковые волны. Независимо от природы волны бывают продольными, если колебания происходят в направлении распространения волны, и поперечными, если колебания происходят в направлении, перпендикулярном направлению распространения волны.

Для упругой волны существенное значение имеет направление колебаний, так как от этого зависят вид деформации среды и скорость распространения волны. При продольной волне происходит деформация сжатия среды, в результате чего скорость распространения определяется модулем сжатия (модулем Юнга). При поперечной волне происходит деформация сдвига и скорость распространения волны определяется модулем сдвига, который обычно меньше модуля сжатия, поэтому продольные упругие волны распространяются с большей скоростью, чем поперечные упругие волны.

Для продольной волны поворот вокруг направления распространения не меняет направления колебаний и поэтому скорость распространения остается неизменной.

Для поперечной волны поворот вокруг направления распространения волны изменяет направление колебаний и, если среда анизотропная, т.е. обладает различным модулем сдвига в разных направлениях, скорость распространения волны меняется. Для описания этого свойства поперечной волны, т.е. определенной направленности колебаний в пространстве и вводится понятие поляризации волны. Таким образом, свойство поляризации присуще только поперечным волнам.

Процесс распространения электромагнитных колебаний, как совокупности связанных друг с другом быстропеременных электрического и магнитного полей представляет собой электромагнитную волну, частным случаем которой является свет ($\lambda = 0,4 \text{ мкм} \div 0,7 \text{ мкм}$ в вакууме). Электромагнитные волны поперечны. Это значит, что перпендикулярные друг другу переменные электрическое и магнитное поля одновременно перпендикулярны направлению распространения волны. На рис.2.1 показана графическая мо-

дель плоской электромагнитной волны. При распространении волны слева направо электрическое поле при своем изменении остается направленным вертикально, а магнитное поле — горизонтально.

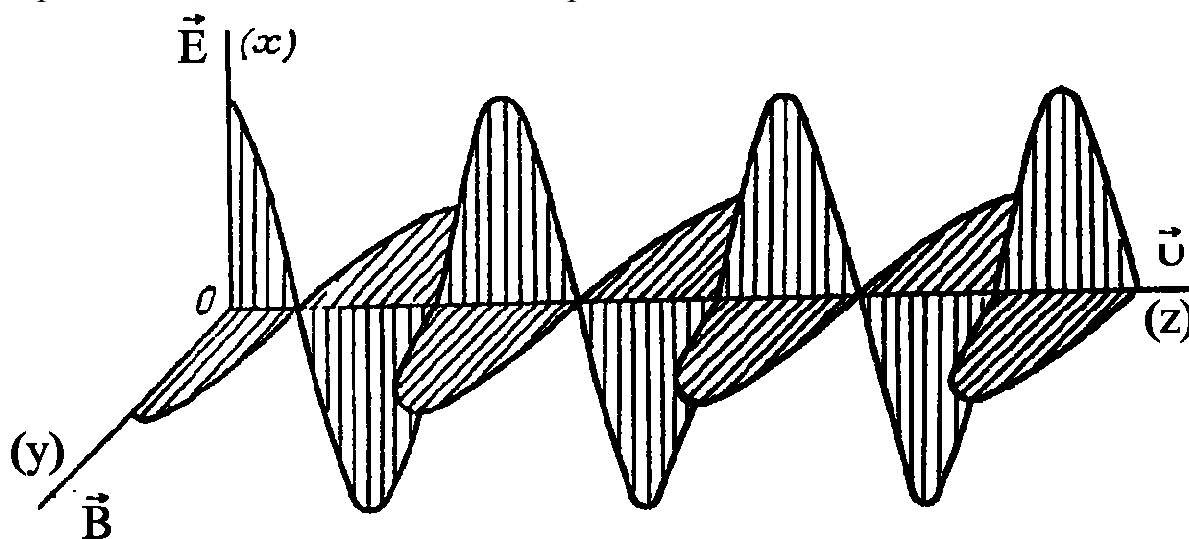


Рис. 2.1. Плоская электромагнитная волна

В отрыве друг от друга в электромагнитной волне электрическое и магнитное поля существовать не могут. Однако ввиду того, что основные световые воздействия осуществляются электрическим полем волны, а также для удобства объяснения на рисунках изображают только электрическое поле, точнее изменение напряженности электрического поля, называя ее иногда световым вектором. Поперечность электромагнитной волны приводит к тому, что понятие поляризации для нее имеет существенное значение. Электромагнитную волну называют плоско или линейно поляризованной, если при ее распространении колебания вектора E происходят в одном, строго определенном, направлении.

Плоскость, проходящую через направление распространения волны и направление колебаний, называют плоскостью колебаний. Для электромагнитной волны, (показанной на рис.2.1. — это плоскость XOZ . Непосредственными излучателями световых волн являются атомы. Волна, излучаемая отдельным атомом, является поляризованной, но свет, идущий от источника, представляет собой суперпозицию громадного числа волн, излученных спонтанно отдельными атомами. Поэтому среднее значение напряженности электрического поля в любом направлении одинаково. Такой свет называют естественным.

Если смешать естественный свет и линейно поляризованный, то возникает частично поляризованный свет, т.е. свет, имеющий преимущественное направление колебаний вектора E (в этом направлении значение напряжен-

ности электрического поля больше, чем в остальных).

Величину, характеризующую долю поляризованной составляющей в общей интенсивности частично поляризованного света, называют степенью поляризации и обозначают буквой P :

$$P = \frac{J_{\text{пол}}}{J_{\text{общ}}} \quad (1)$$

где $J_{\text{пол}}$ — интенсивность поляризованной составляющей; $J_{\text{общ}}$ — общая интенсивность света.

Если $J_{\text{пол}}=J_{\text{общ}}$, то $P=1$, что соответствует полностью поляризованному свету.

Если $J_{\text{пол}}=0$, то $P=0$ — отсутствие поляризации или естественный свет.

Существует эллиптическая поляризация света. Это такая упорядоченность изменения электрического поля в волне, при которой вектор напряженности электрического поля вращается вокруг направления распространения волны и меняет свое значение так, что проекция конца вектора напряженности на плоскость, перпендикулярную лучу, описывает эллипс.

Если при вращении вектора напряженности электрического поля не происходит изменения его модуля, то говорят о циркулярной или круговой поляризации света.

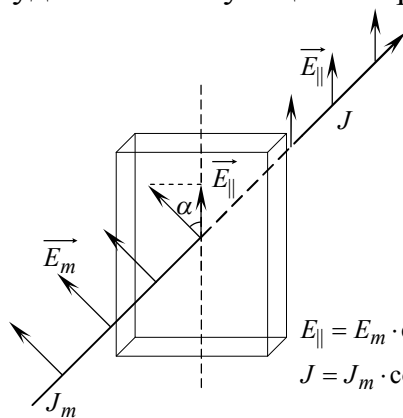
Наиболее общей является эллиптическая поляризация, а линейная и круговая — ее частные случаи.

Получить из естественного света линейно поляризованный, а также исследовать свойства света можно с помощью поляризаторов. Поляризатор — это оптическое устройство, при прохождении через которое свет становится линейно поляризованным. Плоскость колебаний вектора E света, пропускаемого поляризатором, называется плоскостью поляризатора.

Если плоскость колебаний плоско поляризованного света, падающего на поляризатор, совпадает с плоскостью поляризатора, такой свет проходит через поляризатор полностью. Если плоскость колебаний плоско поляризованного света перпендикулярна плоскости поляризатора, то идеальный поляризатор не пропускает света вообще.

Если плоскость колебаний плоско поляризованного света составляет угол α с плоскостью колебаний поляризатора, то из общей интенсивности света J_m , соответствующей величине амплитуды светового вектора падающей волны E_m , через поляризатор будет проходить свет интенсивности J , соответствующей проекции светового вектора падающей волны на направ-

ление плоскости колебаний поляризатора E_{\parallel} (рис.2.2). Отношение интенсивности прошедшего и падающего света равно отношению квадратов амплитуд соответствующих напряженностей:



$$\frac{J}{J_m} = \frac{E_{\parallel}^2}{E_m^2} = \cos^2 \alpha, \quad (2)$$

так как $E_{\parallel} = E_m \cos \alpha$.

Отсюда получаем закон Малюса:

$$J = J_m \cos^2 \alpha, \quad (3)$$

т.е. интенсивность прошедшего через поляризатор плоско поляризованного света пропорциональна квадрату косинуса угла между

Рис.2.2. Прохождение плоско (линейно) поляризованного света через поляризатор.

плоскостями поляризации света и поляризатора.

Таким образом, согласно закону Малюса вращение поляризатора вокруг направления распространения плоско поляризованного света изменяет интенсивность прошедшего через поляризатор света от $J = J_{\max}$ до $J = 0$.

Вращение поляризатора вокруг направления распространения естественного света не изменяет интенсивность прошедшего через поляризатор света. Она остается постоянной и равной $J = 1/2 J_0$, где J_0 — интенсивность падающего естественного света*).

Вращение поляризатора вокруг направления распространения частично поляризованного света ($J_{\text{общ}} = J_{\text{пол}} + J_0$) изменяет интенсивность прошедшего через поляризатор света от $J = J_{\max}$ до $J = J_{\min}$ по закону

$$J = J_{\text{пол}} \cos 2\alpha + 1/2 J_0,$$

где $J_{\text{пол}}$ — интенсивность поляризованной составляющей; J_0 — интенсивность естественной составляющей.

$$\text{При } \alpha = 0 \quad J = J_{\text{пол}} + 1/2 J_0 = J_{\max};$$

$$\alpha = 90^\circ \quad J = 0 + 1/2 J_0 = J_{\min}.$$

Отсюда видно, что

$$J_{\max} - J_{\min} = J_{\text{пол}}$$

$$J_{\max} + J_{\min} = J_{\text{пол}} + J_0 = J_{\text{общ}}$$

Следовательно, измерив J_{\max} и J_{\min} можно вычислить степень поляризации по формуле :

$$P = \frac{J_{\max} - J_{\min}}{J_{\max} + J_{\min}}, \quad (5)$$

которая и используется для экспериментального определения степени поля-

*)Рекомендуется студентам показать при подготовке к лабораторной работе.

ризации частично линейно поляризованного света с помощью поляризатора.

Выше описано действие так называемого линейного поляризатора. Существуют поляризаторы и для получения эллиптической поляризации.

Действие поляризатора основано на взаимодействии электромагнитной волны с веществом, из которого он изготовлен. Из нескольких видов взаимодействий мы рассмотрим здесь явление двойного лучепреломления.

Скорость света в веществе зависит от показателя преломления: $v=c/n$ (c — скорость света в вакууме; n — показатель преломления вещества). Показатель преломления зависит от электрических и магнитных свойств вещества ($n = \sqrt{\epsilon \mu}$). Магнитную проницаемость прозрачных сред, являющихся диэлектриками, можно считать равной единице ($\mu=1$).

Скорость света в такой среде зависит только от ее диэлектрической проницаемости:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} \quad (6)$$

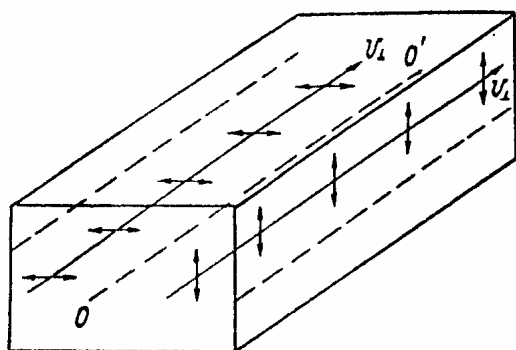


Рис. 2.3. Линейно поляризованный свет. Свет распространяется в направлении оптической оси (ось OO').

Если диэлектрик анизотропен, то диэлектрическая проницаемость также анизотропна, т.е. имеет разные значения в зависимости от направления в кристалле. Поэтому и скорость световых волн, поляризованных в различных направлениях, будет разной.

В кристаллах, называемых одноосными, есть направление, в котором диэлектрическая проницаемость заметно отличается от ее значений в других направлениях. Это направление в кристалле принято называть оптической осью кристалла. Обозначим диэлектрическую проницаемость в направлении оптической оси $\epsilon_{||}$, а в перпендикулярном к ней направлении — ϵ_{\perp} . Если свет распространяется в кристалле в направлении оптической оси, то напряженность электрического поля будет перпендикулярна направлению оптической оси и скорость света связана с диэлектрической проницаемостью ϵ_{\perp} (рис.2.3).

Таким образом, плоскополяризованные электромагнитные волны, идущие в направлении оптической оси, распространяются в одноосном кристалле с одинаковой скоростью. Если световая волна распространяется перпендикулярно оптической оси, то напряженность электрического поля волн

различной линейной поляризации будет по-разному направлена относительно оптической оси. На рис.2.4. первая волна с плоскостью колебаний, параллельной оптической оси, распространяется

со скоростью $v_{\parallel} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{\parallel}}}$, а вторая волна, с плоскостью колебаний, перпендикулярной оптической оси, распространяется со скоростью $v_{\perp} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{\perp}}}$.

Если плоскость колебаний световой волны составляет некоторый угол с направлением оптической оси кристалла, то она распадается на две (любое колебание можно разложить на два взаимно перпендикулярных колебания, рис.2.5), одна из которых распространяется со скоростью v_{\perp} и называется обыкновенной, а другая со скоростью v_{\parallel} и называется необыкновенной. Обе волны распространяются в одном направлении, но с различными скоростями. Ввиду различия скоростей распространения волны будут приобретать разность хода и соответствующую ей разность фаз. По выходе из кристалла такие волны, складываясь, образуют в общем случае эллиптически поляризованный свет.

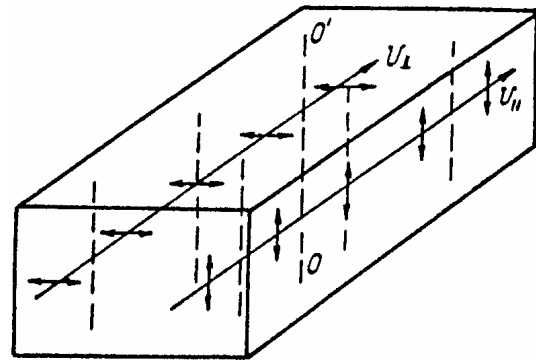


Рис. 2.4. Линейно поляризованный свет распространяется перпендикулярно оптической оси.

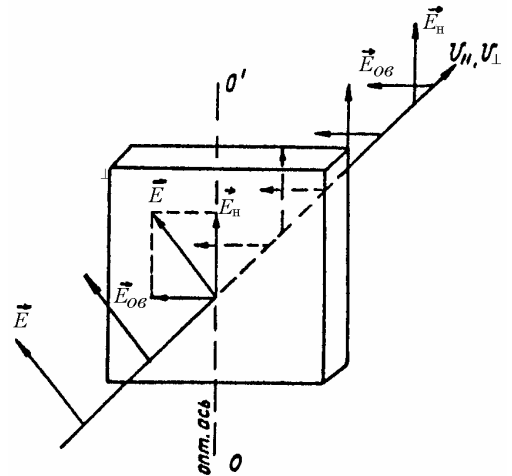


Рис. 2.5. Образование обыкновенного и необыкновенного лучей в кристаллической пластинке.

Кристаллическую пластинку из одноосного кристалла, вырезанную параллельно оптической оси и имеющую толщину, при которой разность хода обыкновенной и необыкновенной волны эквивалента $\lambda/4$, называют четвертьволновой пластинкой. Четвертьволновые пластинки используют для получения эллиптической и круговой поляризации. Круговая поляризация возникает при условии, если плоскость колебаний падающей на пластинку волны составляет угол 45° с оптической осью пластинки.

Мы рассмотрели распространение световой волны параллельно и пер-

пендикулярно оптической оси кристалла при условии, что угол падения (φ) света на пластинку равен нулю (нормальное падение). В этом случае пространственного разделения обыкновенной и необыкновенной волны не происходит. При произвольном направлении распространения происходит пространственное разделение обыкновенной и необыкновенной волны, поэтому явление и называется двойным лучепреломлением.

Задача

1. Изучить экспериментально закон прохождения линейно- и эллиптически поляризованного света через поляризатор.
2. Оценить степень поляризации лазерного луча *).

Экспериментальная установка

Схема установки показана на рис.2.6. Источником света служит гелий-неоновый лазер ($\lambda_0 = 0,63$ мкм) с блоком питания (БП). На оптической скамье непосредственно перед фотоприемником устанавливается ослабитель O , а в зависимости от цели исследования поляризатор Π , кристаллическая пластинка $\Pi\lambda$ или их комбинация. Свет через диафрагму D попадает на фотоприемник $\Phi\Pi$. Интенсивность света J , падающего на фотоприемник, оценивают напряжением U , измеренным вольтметром. Это справедливо при малых значениях интенсивности света, когда показания вольтметра U пропорциональны J . Именно для выполнения этого условия используют ослабляющий фильтр.

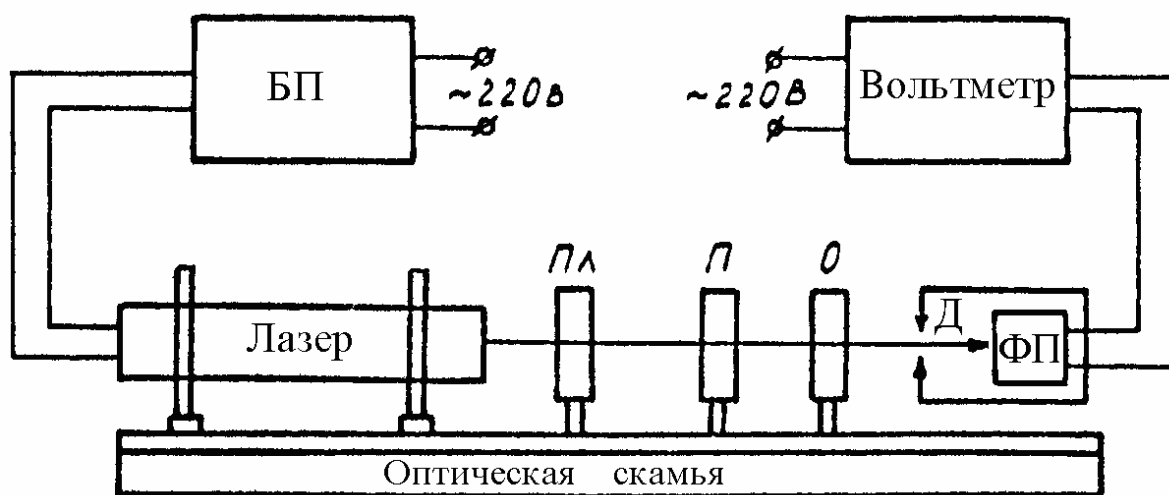


Рис. 2.6. Схема установки.

Для отсчета углов оправа поляризатора снабжена градусным лимбом.

*) Дополнительно преподавателем может быть предложено изучить закон прохождения линейно поляризованного света через два поляризатора

Установите на оптической скамье только ослабитель O . Включите вольтметр и лазер. Убедитесь в том, что луч лазера попадает в отверстие диафрагмы. Перекройте луч лазера и, изменяя отверстие диафрагмы наблюдайте изменения фонового сигнала (U_T). Работать рекомендуется при минимальном U_T .

Проверка степени поляризации света лазера. Оцените степень поляризации света, испускаемого лазером. Для этого установите поляризатор и ослабляющий фильтр. Поворачивая поляризатор, убедитесь в том, что интенсивность прошедшего света меняется и ее максимальное значение (показание вольтметра) не превышает указанного на установке. Медленно вращая поляризатор, добейтесь максимального значения интенсивности прошедшего света и запишите соответствующее показание вольтметра в протокол. Затем установите с помощью поляризатора U_{\min} . Если $U_{\min} \neq 0$, то необходимо перекрыть лазерный луч и записать значение фоновой подсветки фотоприемника U_T . Полезный сигнал определяется как $U - U_T$.

По формуле (5) оцените степень поляризации луча.

Проведите измерения по проверке закона Малюса. Для этого установите поляризатор в положение, соответствующее максимуму интенсивности проходящего через него света. Как следует из закона Малюса, необходимо принять это положение поляризатора за начальное ($\alpha = 0$). Исследуйте зависимость интенсивности проходящего через поляризатор света от угла α , меняя его через 10° от начального положения до общего поворота на 360° .

Получите эллиптически поляризованный свет, поместив перед поляризатором кристаллическую пластинку, и проведите его исследование, как при проверке закона Малюса.

Обработка результатов

1. Проверка закона Малюса. Рассчитайте и изобразите на графике в декартовых координатах кривую зависимости $\cos^2 \alpha$ от α в пределах от 0 до 360° . По измеренным значениям U в зависимости от α вычислите относительную интенсивность прошедшего через поляризатор света как

$$J_{\text{отн}} = \frac{U_{\text{изм}} - U_T}{(U_{\text{max}})_{\text{изм}} - U_T}$$

для всех значений U от начального α_0 до $\alpha_0 + 360^\circ$. Экспериментальные значения относительной интенсивности нанесите на график расчетной зависимости.

α , град	$\alpha - \alpha_0$, град	$U_{\text{изм}}, \text{В}$	$J_{\text{отн}} = \frac{U_{\text{изм}} - U_{\text{т}}}{(U_{\text{max}})_{\text{изм}} - U_{\text{т}}}$	$\cos^2(\alpha - \alpha_0)$
α_0	0	$U_{\text{max изм}}$		
α_1	10			
\vdots	\vdots			
\vdots	\vdots			

2. Исследование эллиптической поляризации света. Сравните экспериментальные данные с расчетом на основе зафиксированных значений J_{max} и J_{min} интенсивности. Расчет интенсивности прошедшего через поляризатор свет можно выполнить по принципу суперпозиция. Представим себе эллиптически поляризованный свет как суперпозицию ортогонально поляризованных волн с интенсивностями $J_1 = J_{\text{max}}$ и $J_2 = J_{\text{min}}$. Если плоскость колебаний поляризатора составляет угол α с большой полуосью эллипса, то интенсивность прошедшего света определяется равенством:

$$J_{\alpha} = J_{\text{max}} \cos^2 \alpha + J_{\text{min}} \sin^2 \alpha$$

Расчетные и экспериментальные данные представьте в виде таблицы и графика в полярных координатах.

Контрольные вопросы

1. С чем связано понятие поляризации волны ?
2. Для каких волн имеет смысл понятие поляризации ?
3. Дайте определение линейно, эллиптически и циркулярно поляризованного света.
4. Что такое поляризатор?
5. Как должна изменяться интенсивность поляризованного, естественного и частично поляризованного света, прошедшего через линейный поляризатор при его вращении?
6. Сформулируйте закон Малюса.
7. Что такое четвертьволновая пластинка?
8. Как получить эллиптически и циркулярно поляризованный свет из естественного?
9. Можно ли с помощью только линейного поляризатора отличить эллиптически поляризованный свет от частично линейно поляризованного света и циркулярно поляризованный свет от естественного света?