

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет систем управления
и радиоэлектроники

А.Д. Безпалый, А.Е. Мандель, Д.В. Окунев

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Методические указания к лабораторной работе
для студентов технических направлений подготовки и специальностей

Томск
2025

УДК 535:530.145

ББК 22.343

Б-39

Рецензент:

Хатьков Н.Д., доцент кафедры сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники
ТУСУР, канд. техн. наук

Авторы:

А. Д. Безпалый, А. Е. Мандель, Д. В. Окунев

Безпалый, Александр Дмитриевич

Б-39 Исследование поляризации лазерного излучения: методические указания к лабораторной работе для студентов технических направлений подготовки и специальностей / А.Д. Безпалый, А.Е. Мандель, Д.В. Окунев. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2025. – 17 с.

В работе приведены теоретические сведения о поляризации световых волн, описана экспериментальная установка и методика проведения лабораторной работы. В ходе выполнения работы студенты закрепляют теоретические знания о поляризации, законе Малюса и экспериментально исследуют поляризацию лазерного излучения.

Методические указания предназначены для студентов технических направлений подготовки и специальностей.

Одобрено на заседании каф. СВЧиКР протокол № 6 от 14.02.2025 г.

УДК 535:530.145

ББК 22.343

© Безпалый А. Д., Мандель А. Е., Окунев Д. В., 2025
© Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ	5
1.1 Поляризация световых волн.....	5
1.2 Поляризаторы	7
1.3 Фазовые пластинки	7
2 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ.....	9
3 СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ	11
4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.....	12
5 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА.....	15
6 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	16
Список литературы	17

Введение

Одной из важнейших характеристик лазерного излучения наряду с длиной волны, частотой и фазой является поляризация. За направление поляризации лазерного излучения принимается направление колебаний электрического поля лазерного луча. В большинстве случаев излучаемый лазером свет поляризован. Обычно лазерное излучение линейно поляризованное, то есть электрическое поле колеблется в определенном направлении, перпендикулярном направлению распространения лазерного луча

Поляризованное световое излучение используют не только в научных лабораториях, но и в повседневной жизни при работе таких устройств, как поляризационные фильтры, фотоаппараты, антибликовые линзы в солнцезащитных очках и т. д. Кроме этого, любой ЖК монитор и дисплеи мобильных телефонов покрыты плёнкой (поляроидом), позволяющей формировать изображение на экране.

Целью данной работы является закрепление теоретических знаний о поляризации лазерного излучения, а также экспериментальное исследование изменения состояния поляризации лазерного излучения при помощи поляризующих элементов.

1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1 Поляризация световых волн

Плоские световые волны, у которых направления электрического \vec{E} и магнитного \vec{H} векторов сохраняются неизменными в пространстве или меняются по определенному закону, называют поляризованными. При случайных положениях векторов \vec{E} и \vec{H} в пространстве световое поле является *неполяризованным* [1, 2].

За направление поляризации принято считать направление электрического поля волны. Плоскость, проходящая через вектор \vec{E} и направление распространения волны, называется плоскостью поляризации. В зависимости от того, какую фигуру описывает конец вектора \vec{E} в пространстве при распространении световой волны, различают линейную, круговую и эллиптическую поляризации [1, 2].

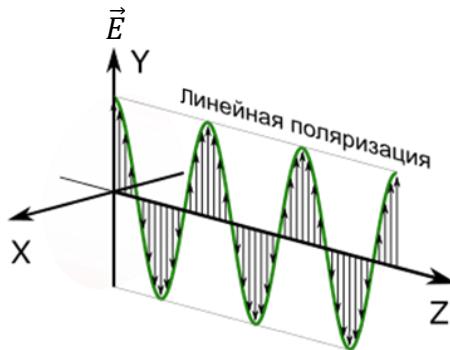


Рисунок 1.1 – Электромагнитная волна с линейной поляризацией

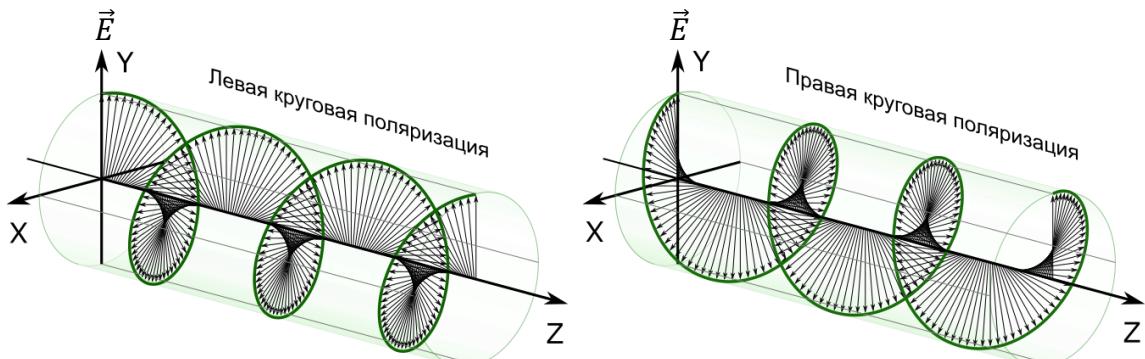


Рисунок 1.2 – Электромагнитные волны с правой и левой круговой поляризацией

Для того, чтобы представить себе условия возникновения видов поляризации, рассмотрим суперпозицию линейно поляризованных волн с ортогональной поляризацией: \vec{E}_1 (плоскость поляризации вдоль оси X) и \vec{E}_2 (плоскость поляризации вдоль оси Y).

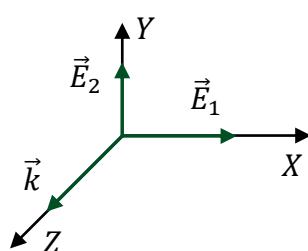


Рисунок 1.3 – Направления ортогонально поляризованных волн

Волны имеют одинаковую частоту ω и распространяются в направлении оси OZ .

Пусть волны имеют произвольный фазовый сдвиг φ . Запишем обе волны:

$$\left. \begin{aligned} \vec{E}_x &= \vec{x}_0 E_{m1} \cdot \cos(\omega t - kz) \\ \vec{E}_y &= \vec{y}_0 E_{m2} \cdot \cos(\omega t - kz - \varphi) \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

Суммарное поле распространяющейся вдоль оси Z волны определяется суперпозицией этих полей:

$$\left. \begin{aligned} \vec{E} &= \vec{E}_x + \vec{E}_y \\ \vec{E} &= \vec{x}_0 E_{m1} \cdot \cos(\omega t - kz) + \vec{y}_0 E_{m2} \cdot \cos(\omega t - kz - \varphi) \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

Характерные виды поляризации плоской волны соответствуют различным фазовым сдвигам φ [1, 2].

1. Рассмотрим случай, когда фазовый сдвиг волн $\varphi = 0$. Волны синфазны. Направление суммарного вектора определяется сложением двух векторов. Сложив волны в точке $z = 0$ получим:

$$\vec{E} = (\vec{x}_0 E_{m1} + \vec{y}_0 E_{m2}) \cdot \cos(\omega t). \quad (1.3)$$

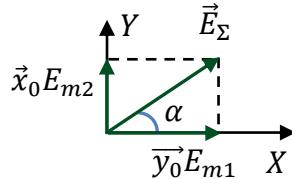


Рисунок 1.4 – Направление суммарного вектора

Угол наклона суммарного вектора к оси X будет:

$$\alpha = \arctg \left(\frac{E_{m1}}{E_{m2}} \right). \quad (1.4)$$

Результат сложения двух синфазных линейно поляризованных волн с ортогональной поляризацией дает линейно поляризованную волну. В частных случаях, при поляризации света в плоскостях XOZ и YOZ получим, соответственно:

$$\vec{E} = E_0 \vec{x}_0 \cdot \cos(\omega t - kz), \quad \vec{E} = E_0 \vec{y}_0 \cdot \cos(\omega t - kz). \quad (1.5)$$

2. Рассмотрим случай, когда фазовый сдвиг волн $\varphi = 90^\circ$. Предположим, что амплитуды волн равны:

$$E_{m1} = E_{m2} = E_m. \quad (1.6)$$

При $\varphi = 90^\circ$ следует: $E_x = E_m \cdot \cos(\omega t)$, а $E_y = E_m \cdot \cos(\omega t - 90^\circ) = E_m \cdot \sin(\omega t)$.

Угол наклона суммарного вектора к оси X будет:

$$\alpha = \arctg \left(\frac{\sin(\omega t)}{\cos(\omega t)} \right) = \omega t. \quad (1.7)$$

Плоскость поляризации не остается фиксированной. Она вращается с частотой ω при распространении волны. Конец суммарного вектора \vec{E}_Σ при этом описывает окружность. Такая поляризация называется круговой.

Таким образом, чтобы получить волну с круговой поляризацией, исходные волны должны быть ортогонально линейно поляризованы, иметь одинаковые амплитуды и фазовый сдвиг ϕ , равный $\pm 90^\circ$

При сдвиге фаз $\phi = 90^\circ$ вращение вектора \vec{E} происходит по часовой стрелке, если смотреть вдоль направления распространения волны. Такую поляризацию называют левой круговой поляризацией. Для фазового сдвига $\phi = -90^\circ$ вектор \vec{E} вращается в противоположном направлении – это правое вращение. Если выполняется условие

$$E_{m1} \neq E_{m2}, \quad (1.8)$$

то окружность превращается в эллипс, а поляризацию называют эллиптической.

1.2 Поляризаторы

Поляризаторы – это элементы, преобразующие состояние поляризации световых волн. Они используют эффекты оптического дихроизма (анизотропии поглощения света) и оптической анизотропии кристаллических материалов [1].

Дихроичные поляризаторы имеют в основе полимерные пленки с молекулами в виде длинных цепочек, ориентированных преимущественно в одном направлении. Пример: пленки поливинилового спирта с добавками йода или хинина. Они могут пропускать до 80% света, поляризованного в одном направлении, и менее 1% света, поляризованного в ортогональном направлении. Достоинство таких поляризаторов – низкая цена, основной недостаток – низкая лучевая стойкость [1].

Кристаллические поляризаторы изготавливаются, как правило, из природного или синтетического исландского шпата (кальцит, $CaCO_3$). Они обладают высоким оптическим качеством, прозрачны в диапазоне длин волн от 0,2 до 2,2 мкм, устойчивы к воздействию интенсивного лазерного излучения. Существует несколько типов таких элементов. Это призмы Николя, Глана, Волластона, Рошона и т.д. Призмы Николя и Глана пропускают излучение лишь одной поляризации, призмы Волластона и Рошона на выходе имеют два ортогонально поляризованных световых луча, распространяющихся под некоторым углом относительно направления падающего излучения [1].

Интенсивность света при прохождении линейно поляризованной волны через поляризатор определяется законом Малюса [1]:

$$I_{\text{вых}} = I_0 \cdot \cos^2 \theta, \quad (1.9)$$

где I_0 – интенсивность падающей световой волны, θ – угол между направлением поляризации света и главным направлением поляризатора [1].

1.3 Фазовые пластиинки

Фазовые пластиинки преобразуют линейно поляризованный свет в свет с эллиптической (круговой) поляризацией и наоборот [1]. Это плоскопараллельные образцы с толщиной d , вырезанные из одноосного кристалла, с оптической осью, лежащей в плоскости пластиинки. Линейно поляризованная плоская световая волна с вектором \vec{E} , отклоненным от оптической оси на угол в 45° , в пластиинке распадается на обыкновенную и необыкновенную волны, распространяющиеся в кристалле со скоростями $v_o = c/n_o$ и $v_e = c/n_e$. Разность фаз между обыкновенным и необыкновенным лучами на выходе пластиинки толщиной d :

$$\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} (n_o - n_e) d. \quad (1.10)$$

Поляризация прошедшего через пластинку светового поля определяется величиной Φ . На практике стандартными элементами являются четвертьволновые ($\lambda/4$) и полуволновые ($\lambda/2$) пластинки. Для $\lambda/4$ пластинки $\Phi = \pi/2$ и при линейной поляризации падающей световой волны прошедшая через пластинку будет иметь круговую поляризацию. Для полуволновой пластинки $\Phi = \pi$ и при линейной поляризации падающей волны прошедшая волна остается также линейно поляризованной, но плоскость ее поляризации поворачивается на 90° [1].

Очевидно, что если падающая на полуволновую пластинку световая волна имеет круговую поляризацию, то пластинка изменяет вращение вектора \vec{E} в прошедшей волне на противоположное направление. В подобной ситуации четвертьволновая пластинка преобразует свет с круговой поляризацией в линейно поляризованный [1].

При заданной толщине пластинки фазовый сдвиг между волнами с ортогональной поляризацией может быть равен π или $\pi/2$ только на определенной длине волны [1].

2 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Излучение лазерных приборов может быть линейно или эллиптически поляризованным, либо частично поляризованным. Источниками лазерного излучения могут быть газовые, твердотельные или полупроводниковые лазеры (рисунок 2.1). Для поляризации излучения используются дополнительные элементы.



Рисунок 2.1 – Источники лазерного излучения: а – He-Ne лазер; б – YAG:Nd³⁺ лазер с генерацией второй гармоники ($\lambda = 532$ нм)

Определить характер поляризации излучения можно путем экспериментального исследования, что и предлагается в данной работе. Схема экспериментальной установки для исследования поляризации изображена на рисунке 2.2.

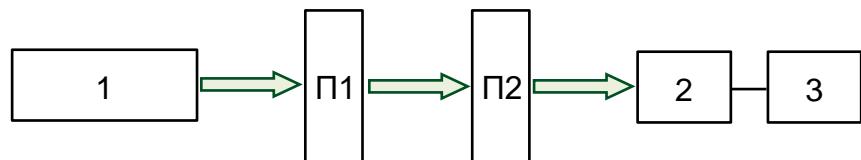


Рисунок 2.2 – Схема экспериментальной установки: 1 – источник излучения; П1 – поляроид 1; П2 – поляроид 2; 2 – фотодиод; 3 – амперметр

В качестве источника излучения 1 в лабораторной установке используется He-Ne лазер с длиной волны $\lambda = 632,8$ нм и выходной мощностью $P \approx 1$ мВт (рисунок 2.1а), либо твердотельный YAG:Nd³⁺ лазер с генерацией второй гармоники ($\lambda = 532$ нм) (рисунок 2.1б). Поляроид П1 является элементом, задающим поляризацию излучения лазера. Поляроид П2 используется в качестве контрольного элемента (плоскополяризующего фильтра), после прохождения через который интенсивность плоскополяризованного света изменяется. Фотодиод 2 преобразует свет, попавший на его фоточувствительную область, в электрический заряд. Амперметр 3 измеряет величину фототока, зависящую от изменения интенсивности линейно поляризованного излучения при повороте главной оси поляроида П2.

Влияние полуволновой и четвертьволновой фазовых пластин на линейную поляризацию излучения исследуется в работе при помощи экспериментальных установок, изображенных на рисунках 2.3 и 2.4.

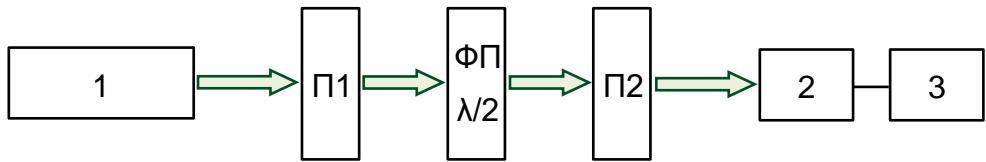


Рисунок 2.3 – Схема экспериментальной установки с полуволновой фазовой пластинкой:
 1 – источник излучения; П1 – поляроид 1; ФП $\lambda/2$ – полуволновая пластина; П2 – поляроид 2;
 2 – фотодиод; 3 – амперметр

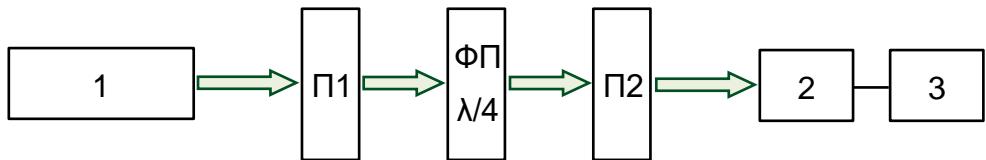


Рисунок 2.4 – Схема экспериментальной установки с четвертьволновой фазовой пластинкой:
 1 – источник излучения; П1 – поляроид 1; ФП $\lambda/4$ – четвертьволновая пластина; П2 – поляроид 2;
 2 – фотодиод; 3 – амперметр

При прохождении линейно поляризованной световой волны через полуволновую пластинку поляризация остается также линейной, однако ее плоскость поворачивается на 90° .

В случае, когда линейно поляризованная световая волна проходит через четвертьволновую пластинку плоскость поляризации будет вращаться, описывая окружность или эллипс. Таким образом, линейная поляризация изменяется на круговую или эллиптическую. В обратном случае, когда свет с круговой или эллиптической поляризацией проходит через четвертьволновую пластинку, прошедшая волна становится линейно поляризованной.

3 СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

- 3.1 Исследование интенсивности линейно поляризованного излучения, прошедшего через поляроид.
- 3.2 Теоретический расчет зависимости интенсивности света I от угла θ между главной осью поляроида и плоскостью поляризации.
- 3.3 Исследование влияния полуволновой пластинки на излучение с линейной поляризацией.
- 3.4 Исследование влияния четвертьволновой пластинки на излучение с линейной поляризацией.

4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Перед выполнением работы необходимо ознакомиться с целью работы, теоретическим материалом, описанием экспериментальной установки и пройти инструктаж по технике безопасности.

Лабораторную работу необходимо выполнять в защитных очках!

Варианты заданий и исходные данные представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Варианты заданий и исходные данные

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7
Угол поворота θ_1 главной оси поляроида П1	0°	90°	45°	30°	60°	120°	180°
Длина волны λ , нм	633	633	633	633	532	532	532

1. Ознакомиться с источниками излучения и схемами экспериментальных установок (рисунки 2.1-2.4).
2. Включить источник излучения.
3. Убедиться в наличии генерации. В случае неисправной работы устройства сообщить преподавателю!

4. Исследование интенсивности линейно поляризованного излучения, прошедшего через поляроид.

Интенсивность линейно поляризованного излучения после его прохождения через поляризатор зависит от угла θ между плоскостью поляризации падающей волны и главной осью поляризатора определяется законом Малюса (подраздел 1.2).

Порядок выполнения пункта 4.

4.1 Установить элементы экспериментальной установки, схема которой изображена на рисунке 2.2.

4.2 В соответствии с номером варианта необходимо установить положение главной оси поляроида П1 на величину, равную углу θ_1 .

4.3 Установить положение контрольного поляроида П2 на величину 0°.

4.4 Убедиться, что излучение лазера падает на фоточувствительную область фотодиода.

4.5 Включить питание амперметра и убедиться в исправности прибора. Далее необходимо установить диапазон измеряемых значений на «мкА».

В случае неисправной работы прибора сообщить преподавателю!

4.6 Провести полный цикл измерений фототока I_ϕ , поворачивая поляроид П2 с шагом 10°. Полный цикл соответствует одному полному обороту главной оси поляроида. Результаты измерений занести в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты измерений

Угол поворота θ_2 главной оси поляроида П2	0°	10°	20°	30°	40°	...	350°
Фототок I_ϕ , мкА							
Интенсивность I , отн. ед.							

4.7 Построить экспериментальную зависимость изменения интенсивности поляризованного излучения от угла поворота главной оси поляроида $I_{exp}(\theta_2)$ в соответствии с измеренными значениями.

4.8 Относительно осей X и Y изобразить схематически направление поляризации волны, прошедшей через поляроид П1. При этом условно считать, что излучение распространяется вдоль оси Z , а главная ось поляроида П1 при значении на шкале 0° совпадает с осью Y .

5. Теоретический расчет зависимости интенсивности света I от угла θ между главной осью поляроида и плоскостью поляризации.

В соответствии с законом Малюса интенсивность I линейно поляризованного света при прохождении через поляризатор падает пропорционально квадрату косинуса угла θ между плоскостью поляризации падающего света и осью поляризатора.

Порядок выполнения пункта 5.

5.1 Построить теоретическую зависимость интенсивности поляризованного излучения от угла поворота главной оси поляроида $I(\theta)$ в соответствии с законом Малюса (формула 1.9).

5.2 Сопоставить нормированные зависимости $I(\theta)$ и $I_{exp}(\theta_2)$ на одном графике и сравнить экспериментальные результаты с расчетными.

6. Исследование влияния полуволновой пластиинки на излучение с линейной поляризацией.

Полуволновые пластиинки позволяют сохранить линейную поляризацию, повернув плоскость поляризации на 90° (подраздел 1.3).

Порядок выполнения пункта 6.

6.1 Установить элементы экспериментальной установки, схема которой изображена на рисунке 2.3.

6.2 В соответствии с номером варианта необходимо установить положение главной оси поляроида П1 на величину, равную углу θ_1 .

6.3 Установить положение контрольного поляроида П2 на величину, равную углу θ_1 .

6.4 Убедиться, что излучение лазера падает на фоточувствительную область фотодиода.

6.5 Расположенную между П1 и П2 полуволновую пластиинку установить так, чтобы показания амперметра стали минимальными.

6.6 Провести полный цикл измерений фототока I_ϕ , поворачивая поляроид П2 с шагом 10° . Полный цикл соответствует одному полному обороту главной оси поляроида. Результаты измерений занести в таблицу.

6.7 Сопоставить нормированные зависимости $I(\theta)$ и $I_{exp}(\theta_2)$ на одном графике и сравнить экспериментальные результаты с расчетными.

6.8 Относительно осей X и Y изобразить схематически направление поляризации волны, прошедшей через полуволновую пластиинку. При этом условно считать, что излучение распространяется вдоль оси Z , а главная ось поляроида П1 при значении на шкале 0° совпадает с осью Y .

7. Исследование влияния четвертьволновой пластиинки на излучение с линейной поляризацией.

Четвертьволновые пластиинки позволяют изменять линейную поляризацию на круговую или эллиптическую, и наоборот – круговую или эллиптическую на линейную

(подраздел 1.3).

Порядок выполнения пункта 7.

7.1 Установить элементы экспериментальной установки, схема которой изображена на рисунке 2.4.

7.2 В соответствии с номером варианта необходимо установить положение главной оси поляроида П1 на величину, равную углу θ_1 .

7.3 Установить положение контрольного поляроида П2 на величину 0° .

7.4 Убедиться, что излучение лазера падает на фоточувствительную область фотодиода.

7.5 Настроить поляроид П2 так, чтобы показания амперметра выдавали минимальные значения. Диапазон измеряемых значений при этом должен быть установлен на шкалу «мкА».

7.6 Расположенную между П1 и П2 четвертьволновую пластинку установить так, чтобы показания амперметра стали максимальными.

7.7 Провести полный цикл измерений фототока I_ϕ , поворачивая поляроид П2 с шагом 10° . Полный цикл соответствует одному полному обороту главной оси поляроида. Результаты измерений занести в таблицу.

7.8 Сопоставить нормированные зависимости $I(\theta)$ и $I_{exp}(\theta_2)$ на одном графике и сравнить экспериментальные результаты с теоретическими.

7.9 Определить вид поляризации излучения лазера.

7.10 Относительно осей X и Y изобразить схематически направление поляризации волны, прошедшей через четвертьволновую пластинку. При этом условно считать, что излучение распространяется вдоль оси Z , а главная ось поляроида П1 при значении на шкале 0° совпадает с осью Y .

5 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать следующие пункты:

- Цель работы.
- Теоретические сведения.
- Описание установки.
- Ход работы.
- Результаты проделанной работы и выводы.

Требования к оформлению отчета приведены в образовательном стандарте вуза ОС ТУСУР 01-2021 [3].

После оформления отчет сдать на проверку преподавателю и приступить к защите работы. Перед защитой необходимо повторно изучить рекомендуемую литературу.

6 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое поляризация света? Какие виды поляризации различают?
2. Что такое плоскость поляризации? Обозначьте на рисунке.
3. Какое излучение называется поляризованным/неполяризованным?
4. Опишите распространение световой волны вдоль оси Z , если плоскость поляризации параллельна оси Y .
5. В чем суть закона Малюса? Как зависит интенсивность плоскополяризованного излучения, прошедшего через поляроид, от угла поворота главной оси поляроида?
6. С помощью каких элементов можно управлять поляризацией излучения?
7. Возможно ли преобразовать линейно поляризованное поле в волну с круговой поляризацией и наоборот?

Список литературы

1. Шандаров, В. М. Основы физической и квантовой оптики: Учебное пособие [Электронный ресурс] / В. М. Шандаров. – Томск: ТУСУР, 2012. – 197 с. – Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/750> (дата обращения: 10.02.2025)
2. Боков Л.А., Замотринский В.А., Мандель А.Е. Электродинамика и распространение радиоволн: учеб. пособие – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2022. – 409 с. – Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/10026> (дата обращения: 10.02.2025)
3. Образовательный стандарт вуза ОС ТУСУР 01-2021. Работы студенческие по направлениям подготовки и специальностям технического профиля. Общие требования и правила оформления от 25.11.2021 [Электронный ресурс]. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2021. – 52 с. – Режим доступа: <https://regulations.tusur.ru/#/documents/87> (дата обращения: 10.02.2025)