

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И
РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

А.Д. Безпальный, А.Е. Мандель

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

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

Томск
2023

УДК 535:530.145

ББК 22.343

Рецензент:

Шарангович С.Н., профессор кафедры сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники
ТУСУР, канд. физ.-мат. наук

Авторы:

А. Д. Безпалый, А. Е. Мандель

Безпалый, Александр Дмитриевич,

Исследование поляризации лазерного излучения / А.Д. Безпалый, А.Е. Мандель. –
Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2023. – 13 с.

В работе представлена краткая теория 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 №2 от 28.09.2023 г.

УДК 531.1

ББК 22.3

© Безпалый А.Д., 2023

© Томск. гос. ун-т систем упр. и
радиоэлектроники, 2023

Оглавление

| | |
|--|----|
| Введение | 4 |
| 1 ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ | 4 |
| 1.1 Поляризация плоских световых волн..... | 4 |
| 1.2 Поляризаторы..... | 7 |
| 1.3 Фазовые пластинки..... | 7 |
| 2 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ | 8 |
| 3 ЗАДАНИЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ | 10 |
| 4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ | 10 |
| 5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ | 11 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | 13 |

Введение

Одной из важнейших характеристик оптического излучения (света) наряду с длиной волны, частотой и фазой является поляризация. Поляризацию 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 работы является закрепление теоретических знаний о поляризации лазерного излучения, законе Малюса и экспериментальное исследование поляризации твердотельного и газового лазеров.

1 ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ

1.1 Поляризация плоских световых волн

Волны, у которых направления электрического \vec{E} и магнитного \vec{H} полей 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].

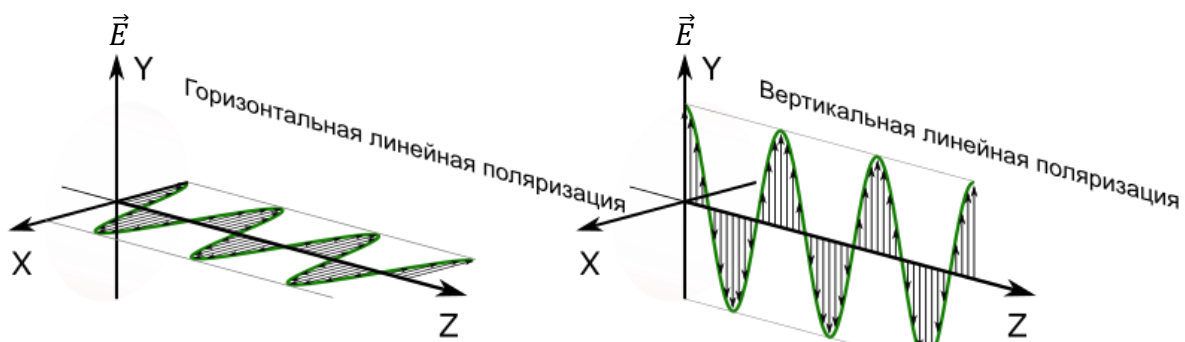


Рисунок 1.1 – Электромагнитные волны с горизонтальной и вертикальной линейной поляризацией

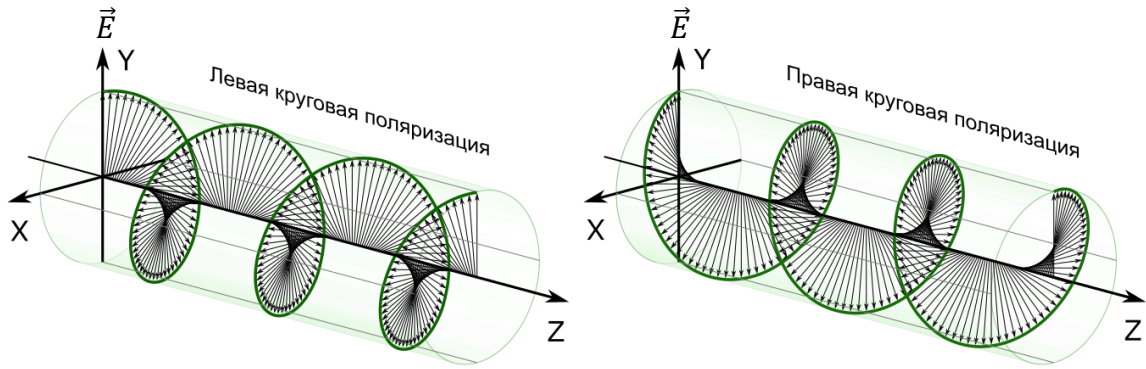


Рисунок 1.2 – Электромагнитные волны с правой и левой круговой поляризацией

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).

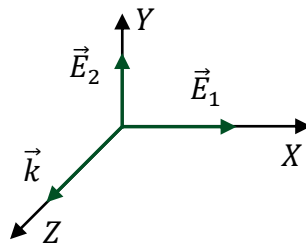


Рисунок 1.3 – Направления ортогонально поляризованных волн

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:

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

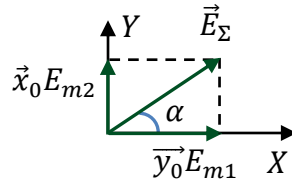


Рисунок 1.4 – Направление суммарного вектора

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, равный $\pm 90^\circ$

При сдвиге фаз $\varphi = 90^\circ$ вращение вектора \vec{E} происходит по часовой стрелке, если смотреть вдоль направления распространения волны. Такую поляризацию называют левой круговой поляризацией. Для фазового сдвига $\varphi = -90^\circ$ 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 пластинки.

Фазовые пластинки 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 пластинки. Линейно поляризованная плоская световая волна с вектором \vec{E} , отклоненным от оптической оси на угол в 45° , в пластинке 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 пластинки 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 меняет на противоположное направление вращения вектора \vec{E} в прошедшей волне. 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.

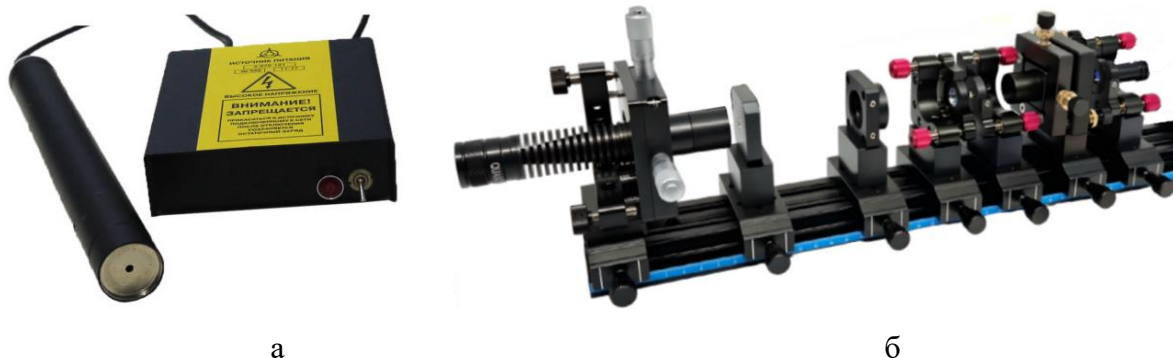


Рисунок 2.1 – Источники лазерного излучения: а – He-Ne лазер;
б – YAG:Nd³⁺ лазер с генерацией второй гармоники

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.

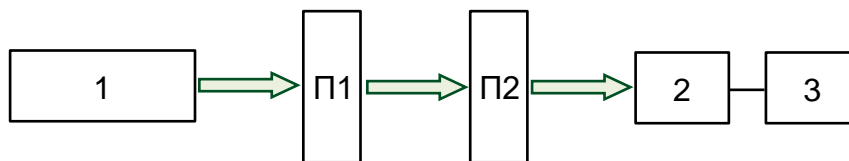


Рисунок 2.2 – Схема экспериментальной установки: 1 – источник излучения; П1 – поляроид 1; П2 – поляроид 2; 2 – фотодиод; 3 – амперметр

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 попавший на его фоточувствительную область свет 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 пластинок на линейную поляризацию излучения исследуется в работе при помощи экспериментальных установок, изображенных на рисунках 2.3 и 2.4.

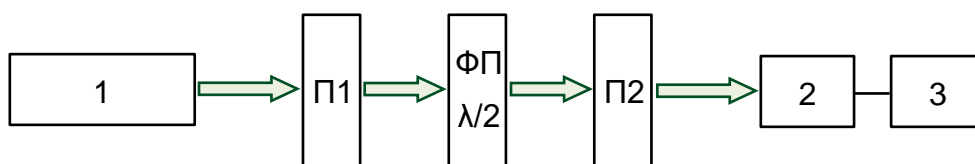


Рисунок 2.3 – Схема экспериментальной установки с полуволновой фазовой пластинкой: 1– источник излучения; П1 – поляроид 1; ФП $\lambda/2$ – полуволновая пластинка; П2 – поляроид 2; 2 – фотодиод; 3 – амперметр

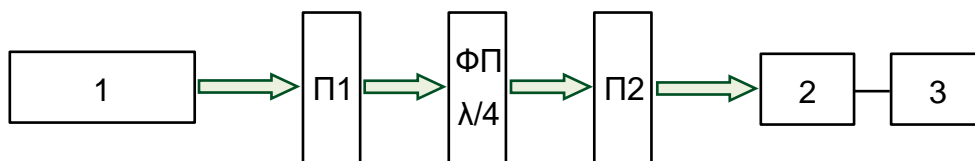


Рисунок 2.4 – Схема экспериментальной установки с полуволновой фазовой пластинкой: 1– источник излучения; П1 – поляроид 1; ФП $\lambda/4$ – четвертьволновая пластинка; П2 – поляроид 2; 2 – фотодиод; 3 – амперметр

3 ЗАДАНИЕ ДЛЯ 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 для подгруппы и исходные данные, соответствующие варианту, представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – 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° |

4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Необходимо включить источник излучения и убедиться в его исправной работе. В случае неисправной работы устройства сообщить преподавателю!

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

3. Установить положение контрольного поляроида П2 на величину 0°, обозначенной на шкале элемента.

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

5. Включить питание амперметра и убедиться в исправности прибора. Далее необходимо установить диапазон измеряемых значений на «мкА». В случае неисправной работы прибора сообщить преподавателю!

6. Провести полный цикл измерений фототока, зарегистрированных амперметром, поворачивая главную ось поляроида П2 с шагом 10°. Полный цикл измерений соответствует одному полному обороту главной оси поляроида, т. е. 360°. Результаты измерений занести в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Измерения фототока, зарегистрированные при повороте поляроида П2

| Угол поворота θ_2 главной оси поляроида П2 | 0° | 10° | 20° | 30° | 40° | ... | 350° |
|---|----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| Фототок I_f , мкА | | | | | | | |

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

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

9. Собрать экспериментальные установки, изображенные на рисунках 2.3 и 2.4. Провести исследование влияния фазовых пластин на линейно поляризованное излучение. Провести измерения с фазовой пластинкой $\lambda/2$ и $\lambda/4$. Измеренные данные занести в таблицы, аналогичные таблице 4.1.

10. Сопоставить нормированные зависимости на одном графике и сравнить экспериментальные результаты с теоретическими. Определить вид поляризации излучения лазера. На рисунке обозначить ориентацию плоскости поляризации относительно осей X и Y , если условно считать, что волна распространяется вдоль оси Z , а главная ось поляроида Π при значении на шкале 0° совпадает с осью X .

11. Оформить отчет по работе и сделать выводы о проделанной работе. В отчет должны входить следующие пункты:

- Введение.
- Элементы теории.
- Описание установки.
- Ход работы.
- Выводы.

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

5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое поляризация? Какие виды поляризации различают?
2. Что такое плоскость поляризации? Обозначьте на рисунке.
3. Какое излучение называется поляризованным/неполяризованным?
4. Как описывается распространение плоской световой волны в произвольном направлении?
5. Опишите распространение световой волны вдоль оси Z , если плоскость поляризации параллельна оси Y .

6. О чем гласит закон Малюса? Как зависит интенсивность плоскополяризованного излучения, прошедшего через поляроид, от угла поворота главной оси поляроида?

7. Что такое фазовые пластинки? В какой вид поляризации фазовые пластинки преобразуют свет? Возможно ли преобразовать плоскополяризованное вид излучения в круговой 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: 05.09.2023 г.)
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. – <https://edu.tusur.ru/publications/10026> (дата обращения: 05.09.2023 г.)