

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНСТИТУТ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ И ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

**КВАНТОВЫЕ  
И ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ.  
Лабораторный практикум по дисциплине**

**Учебно-методическое пособие**  
для обучающихся по направлению подготовки  
11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»  
и 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств»

Часть 3

**Лазеры**

Севастополь  
СевГУ  
2020

УДК 621.3.01  
К32

**Р е ц е н з е н т:**

**Д.Г. Мурзин** - к.т.н., доцент кафедры «Электронная техника»

**Ответственный за выпуск:**

**Ю.П. Михайлюк** - заведующий кафедрой «Электронная техника»,  
кандидат технических наук, доцент

*Составители:* В.К. Макаров, А.В. Щерба

**К32      Квантовые и оптоэлектронные приборы.** Лабораторный практикум по дисциплине : учебно-методическое пособие для обучающихся по направлениям подготовки 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника» и 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств». Ч. 3 Лазеры / Сост. В.К. Макаров, А.В. Щерба ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Севастопольский государственный университет. – Севастополь: СевГУ, 2020. – 35 с. – Текст : электронный.

Целью учебно-методического пособия является оказание помощи студентам в подготовке и выполнении лабораторных работ по дисциплине «Квантовые и оптоэлектронные приборы».

Учебно-методическое пособие разработано на основании программы дисциплины «Квантовые и оптоэлектронные приборы» ОПП подготовки бакалавров 11.03.04 — «Электроника и наноэлектроника», 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств».

УДК 621.3.01

Рассмотрено и утверждено на заседании кафедры «Электронная техника», протокол № 8 от 17 марта 2020 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Введение .....                                                                         | 4  |
| Лабораторная работа. Исследование характеристик газового и инжекционного лазеров ..... | 5  |
| 1. Краткие теоретические сведения.....                                                 | 5  |
| 1.1. Спонтанное и вынужденное излучение .....                                          | 5  |
| 1.2. Физика газовых лазеров.....                                                       | 7  |
| 1.3. Физика инжекционных лазеров .....                                                 | 9  |
| 1.4. Поляризация электромагнитного излучения.....                                      | 12 |
| 1.5. Электрооптический модулятор на основе эффекта Керра.....                          | 16 |
| 1.6. Расходимость лазерного луча .....                                                 | 19 |
| 2. Порядок выполнения работы .....                                                     | 20 |
| 2.1. Определение степени поляризации излучения лазера .....                            | 21 |
| 2.2. Исследование модуляции лазерного излучения .....                                  | 24 |
| 2.3. Определение расходимости излучения лазера.....                                    | 25 |
| 2.4. Исследование спектральной характеристики излучения лазера .....                   | 27 |
| Контрольные вопросы.....                                                               | 30 |
| Библиографический список.....                                                          | 31 |
| Приложение А. Градуировка шкалы барабана монохроматора .....                           | 32 |
| Приложение Б. Длины волн ярких спектральных линий некоторых элементов                  | 34 |
| Приложение В. Перечень используемого оборудования .....                                | 35 |

## ВВЕДЕНИЕ

Лазер (оптический квантовый генератор, ОКГ) — прибор, в котором осуществляется генерация электромагнитных волн видимого, инфракрасного и ультрафиолетового диапазонов, характеризующихся высокой степенью когерентности, монохроматичности, однонаправленности и поляризации.

В основе работы лазеров лежат процессы *индуцированного* (или *вынужденного*) излучения при условии *инверсной заселенности* энергетических уровней. Инверсную заселенность уровней обеспечивают источники возбуждения (или источники накачки), входящих в состав лазерных излучателей.

Лазер преобразует мощность источника возбуждения в когерентное оптическое излучение с определенным КПД (отношение мощности лазерного излучения к мощности возбуждения, подводимой к излучателю). В лазерах всех типов излучение генерирует *активная* (рабочая) *среда* (активный элемент), в которой создается инверсная заселенность энергетических уровней и формируется лазерный луч. Лазеры отличаются способом создания в активной среде инверсной заселенности (способами *накачки*) и режимом работы (импульсный и непрерывный).

По типу активной среды различают: газовые, жидкостные, твердотельные лазеры. В отдельную группу твердотельных лазеров относят лазеры на *p-n*-переходах.

Активную среду помещают между двумя плоскими параллельными зеркалами, образующими *оптический резонатор*. Оптический резонатор обеспечивает *положительную обратную связь* и мощное усиление света при многократных проходах излучения между зеркалами. Для выхода излучения одно из зеркал делают полупрозрачным.

Основные виды накачки: накачка в газовом разряде, оптическая, газодинамическая, химическая, инжекционная (в *p-n* переходах) накачка, накачка пучком быстрых электронов или сильным электрическим полем.

Активный элемент, зеркала резонатора, система возбуждения часто объединяют в одну конструкцию, называемую излучателем.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

### Исследование характеристик газового и инжекционного лазеров

**Цель работы:** исследовать поляризацию, расходимость, модуляцию и спектральную характеристику излучения газового и инжекционного лазеров; определить степень поляризации, угол расходимости излучения лазеров, определить постоянную Керра.

#### 1. Краткие теоретические сведения

##### 1.1. Спонтанное и вынужденное излучение

Свет представляет собой электромагнитные волны с длинами волн от 400 до 780 нм. Световые волны, с точки зрения квантовой природы излучения — фотоны с энергией  $\varepsilon = h\nu$ , испускаются атомами вещества при переходе их из возбужденных состояний в более низкоэнергетические состояния (рис. 1). При этом состояние с энергией  $E_1$  принимается за основное. Его энергия является наименьшей из всех возможных,  $E_2$  и т.д. — энергии возбужденных состояний.

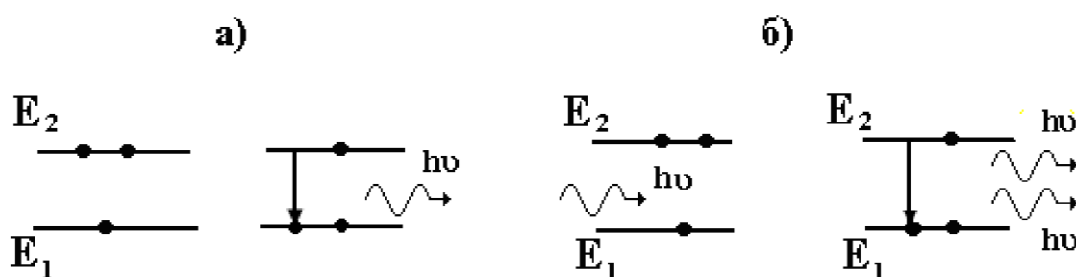


Рисунок 1 — Спонтанное (а) и вынужденное (б) излучения

Возбудить атом, то есть сообщить ему добавочную энергию, можно нагреванием, облучением светом и другими воздействиями. В возбужденном состоянии атом находится короткий промежуток времени, после чего самопроизвольно возвращается в основное состояние. С позиции волновой теории атом при таких переходах испускает "цуг" электромагнитной волны (в квантовой теории — фотон). **Процесс спонтанного излучения** — (рис. 1, а). Частота колебаний в цуге связана со значениями энергий атома  $E_1$  и  $E_2$  формулой Планка [1]:

$$\nu = \frac{E_1 - E_2}{h},$$

где  $h$  — постоянная Планка.

Спонтанное излучение происходит во всех естественных источниках света. Оно состоит из большого количества волновых цугов и имеет следующие особенности [1]:

- а) некогерентное, так как атомы испускают волновые цуги несогласованно, с разной начальной фазой;
- б) немонохроматичное, так как средние частоты цугов неодинаковы;
- в) неполяризованное, так как каждый линейно поляризованный цуг имеет случайные направления колебаний вектора  $\vec{E}$ ;
- г) испускается по всем направлениям телесного угла  $4\pi$ .

По этим причинам от двух независимых естественных источников света невозможно наблюдать интерференционную картину.

Кроме спонтанного, возможно также **индуцированное**, или **вынужденное излучение**. Оно возникает, в случае, когда на вещество падает электромагнитная волна с частотой  $\nu$  (рис. 1, б). Если атомы находятся в возбужденном состоянии, то под действием падающих на них фотонов они будут совершать переходы на основной энергетический уровень. При этом разность энергий  $E_2 - E_1$  выделится в виде когерентных волновых цугов, которые добавятся к падающим. Атомы вещества совершают переходы согласованно и испускают волновые цуги (фотоны), идентичные с падающими по частоте, фазе и поляризации. Это и есть **вынужденное** излучение. Оно используется в лазерах — оптических квантовых генераторах когерентных электромагнитных волн в видимом и инфракрасном диапазонах. Излучение лазеров имеет следующие преимущества по сравнению с обычными источниками света:

— оно в высокой степени когерентно, так как все фотоны испускаются согласованно, с одинаковой начальной фазой;

— практически монохроматично, и разброс по частотам у индуцированных фотонов меньше, чем у спонтанных, так как в лазерах время излучения этих фотонов возрастает в  $10^5$  раз;

— оно является поляризованным излучением, так как все фотоны поляризованы одинаково;

— оно имеет малый угол расходимости (до  $10^{-5}$  рад) [1].

## 1.2. Физика газовых лазеров

В настоящее время одним из самых распространенных является **газовый лазер** на смеси гелия и неона. Общее давление в смеси составляет порядка  $10^2$  Па при соотношении компонент *He* и *Ne* примерно 10:1.

Активным газом, на котором в непрерывном режиме возникает генерация на длине волны 632,8 нм (ярко-красный свет), является неон. Гелий — буферный газ, он участвует в механизме создания инверсной населенности одного из верхних уровней неона. Излучение *He-Ne* лазера обладает непревзойденной монохроматичностью. Расчеты показывают, что спектральная ширина линии генерации *He-Ne* лазера составляет примерно  $\Delta\nu \approx 5 \cdot 10^{-3}$  Гц. Это чрезвычайно малая величина. Время когерентности такого излучения оказывается порядка  $\tau \approx 1/\Delta\nu \approx 2 \cdot 10^3$  с. На практике многие технические причины мешают реализовать столь узкую спектральную линию *He-Ne* лазера. Путем тщательной стабилизации всех параметров лазерной установки удастся достичь относительной ширины  $\Delta\nu/\nu$  порядка  $10^{-14}$ — $10^{-15}$ , что примерно на 3-4 порядка хуже теоретического предела. Но и реально достигнутая монохроматичность излучения *He-Ne* лазера делает этот прибор совершенно незаменимым при решении многих научных и технических задач [2]. Первый гелий-неоновый лазер был создан в 1961 году. На рис. 2 представлена упрощенная схема уровней гелия и неона и механизм создания инверсной населенности лазерного перехода.

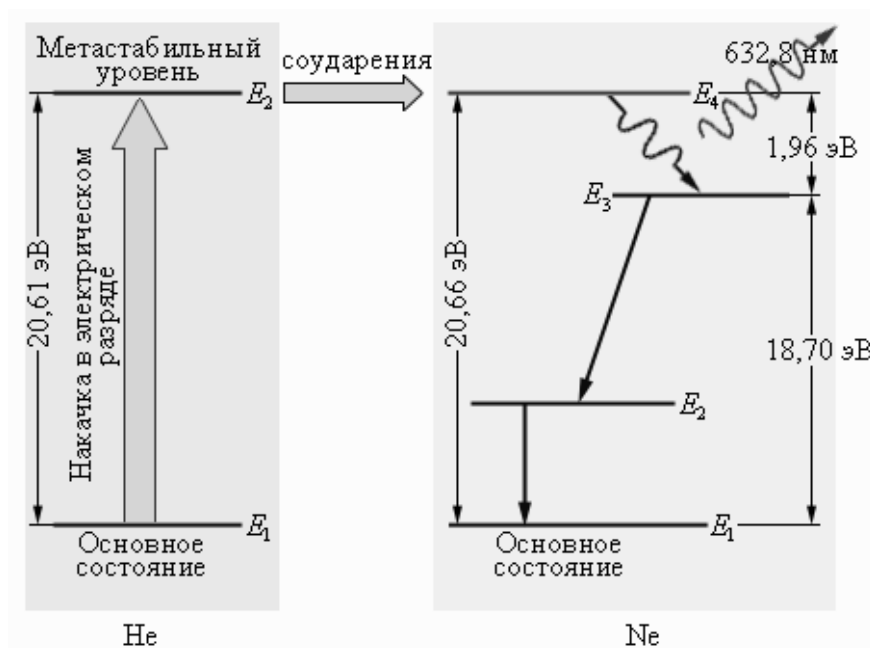


Рисунок 2 — Механизм накачки *He-Ne* лазера

Прямыми стрелками изображены спонтанные переходы в атомах неона.

Накачка лазерного перехода  $E_4 \rightarrow E_3$  в неоне осуществляется следующим образом. В высоковольтном электрическом разряде вследствие соударений с электронами значительная часть атомов гелия переходит в верхнее метастабильное состояния  $E_2$ . Возбужденные атомы гелия неупруго сталкиваются с атомами неона, находящимися в основном состоянии, и передают им свою энергию. Уровень  $E_4$  неона расположен на 0,05 эВ выше метастабильного уровня  $E_2$  гелия. Недостаток энергии компенсируется за счет кинетической энергии соударяющихся атомов. На уровне  $E_4$  неона возникает инверсная населенность по отношению к уровню  $E_3$ , который сильно обедняется за счет спонтанных переходов на нижерасположенные уровни. При достаточно высоком уровне накачки в смеси гелия и неона начинается лавинообразный процесс размножения идентичных когерентных фотонов. Если кювета со смесью газов помещена между отражающими зеркалами, то возникает лазерная генерация [2]. На рис. 3 изображена схема гелий-неонового лазера.

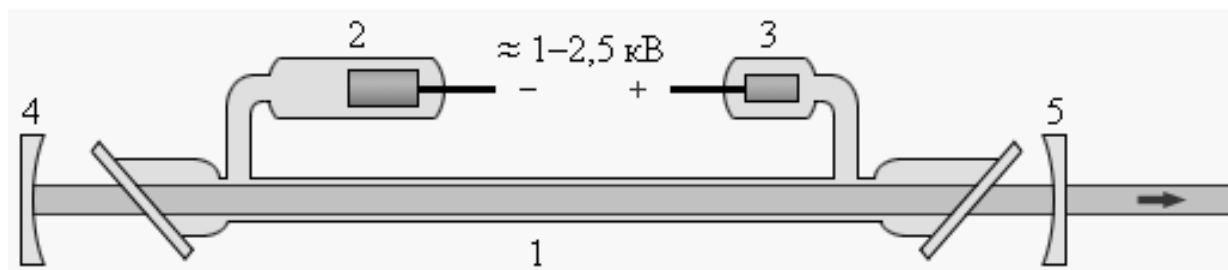


Рисунок 3 — Схема гелий-неонового лазера

- 1 — стеклянная кювета со смесью гелия и неона; 2 — катод;  
 3 — анод; 4 — сферическое зеркало с пропусканием менее 0,1 %;  
 5 — сферическое зеркало с пропусканием 1—2 %

Современные высокостабильные гелий-неоновые лазеры производятся в моноблочном исполнении. Для этого используется стеклообразное вещество — ситалл, обладающий практически нулевым температурным коэффициентом расширения. В куске ситалла в форме прямоугольного параллелепипеда просверливается канал, к торцам которого на оптическом контакте приклеиваются лазерные зеркала. Канал заполняется смесью гелия и неона. Катод и анод вводятся через дополнительные боковые каналы. Такая моноблочная конструкция обеспечивает высокую механическую и тепловую стабильность [3].

### 1.3. Физика инжекционных лазеров

**Инжекционным** называется лазер, активной средой которого является полупроводниковый кристалл, а точнее, область *p-n* перехода. Помимо компактности, полупроводниковые лазеры обладают высоким КПД (до 50 %). А большой выбор современных полупроводниковых материалов обеспечивает генерацию в широком спектральном диапазоне (от 0,3 мкм до 30 мкм). Эти качества обеспечили полупроводниковым лазерам широкое применение в различных областях современной деятельности человека.

В отличие от лазеров других типов, в полупроводниковых лазерах используются излучательные квантовые переходы между разрешенными энергетическими зонами, а не между дискретными уровнями энергии. Инверсная населенность создается с помощью инжекции через *p-n* переход

неравновесных носителей тока, путем приложения внешнего напряжения в прямом направлении. Наряду с генерацией неравновесных носителей существует обратный процесс — **рекомбинация** электронов и дырок — переход электронов из зоны проводимости в валентную зону, в результате чего происходит исчезновение электронов и дырок. Рекомбинация может сопровождаться излучением фотонов, что и лежит в основе работы полупроводниковых светодиодов и лазеров [3].

Создание в рабочей среде инверсной заселенности является необходимым, но еще не достаточным условием для генерации лазерного излучения. В любом лазере часть подводимой к прибору мощности накачки будет бесполезно теряться. Для того, чтобы инжекционный лазер начал работать как квантовый усилитель света, мощность накачки должна превысить определенную величину — **пороговый ток**.

При превышении порогового тока:

- резко возрастает интенсивность испускаемого прибором излучения;
- сужается спектральная линия излучения;
- излучение становится когерентным и узконаправленным.

На рис. 4 схематично представлена конструкция полупроводникового лазера. В таком лазере резонатор создается полировкой двух диаметрально противоположных сторон кристалла, перпендикулярных плоскости *p-n* перехода. Эти плоскости делаются параллельными и полируются с высокой степенью точности. Выходную поверхность можно рассматривать как щель, через которое проходит излучение. Угловая расходимость излучения лазера определяется дифракцией излучения на этой щели. При толщине *p-n* перехода в 20 мкм и ширине — 120 мкм угловая расходимость соответствует приблизительно  $3^\circ$  в плоскости *XZ* и  $1^\circ$  — в плоскости *YZ*.

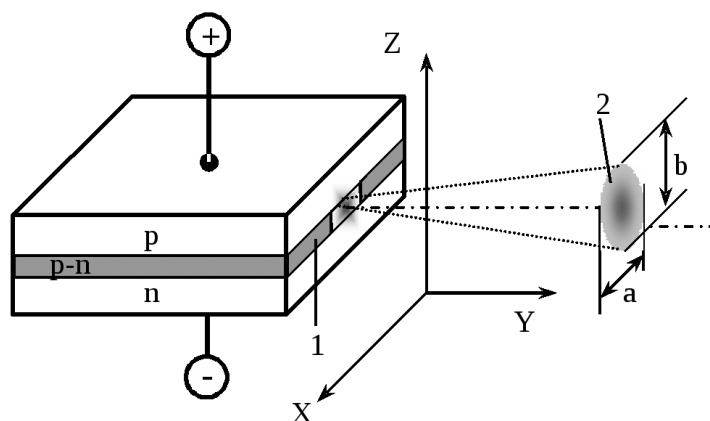


Рисунок 4 — Принципиальная схема инжекционного лазера

1 — активный слой; 2 — сечение лазерного пучка в плоскости  $XY$

В современных полупроводниковых лазерах широко используются так называемые полупроводниковые гетероструктуры, в разработку которых значительный вклад внес академик РАН Ж.И. Алферов. Лазеры на основе гетероструктур обладают лучшими характеристиками, например, большей выходной мощностью и меньшей расходимостью [4].

В табл. 1 и табл. 2 отображены основные характеристики наиболее распространённых газовых и полупроводниковых лазеров.

Таблица 1 — Основные характеристики наиболее распространённых газовых лазеров

| Активная среда        | <i>He-Ne</i> | <i>CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub></i> | <i>Ar</i>   | <i>DF</i>              | <i>KrF</i>               |
|-----------------------|--------------|-------------------------------------|-------------|------------------------|--------------------------|
| $\lambda$ , мкм       | 0,63         | 10,6                                | 0,33—0,53   | 3,5—4                  | 0,249                    |
| Режим работы          | Непрерывный  | Непрерывный                         | Непрерывный | Непрерывный            | Импульсный               |
| Мощность излучения    | 0,5—50 мВт   | 1—1,5·10 <sup>6</sup> Вт            | 0,01—20 Вт  | 1—1·10 <sup>4</sup> Вт | 20—250 Вт (средняя)      |
| Частота импульсов, Гц | —            | —                                   | —           | —                      | До 10 <sup>3</sup>       |
| Длительность импульса | —            | —                                   | —           | —                      | 4·10 <sup>3</sup> —1 мкс |

Продолжение таблицы 1

| Активная среда         | He-Ne        | CO <sub>2</sub> -N <sub>2</sub> | Ar           | DF          | KrF        |
|------------------------|--------------|---------------------------------|--------------|-------------|------------|
| Расходимость излучения | 0,7—3,5 мрад | До 25 мрад                      | 0,5—1,5 мрад | 1,8—15 мрад | 0,1—6 мрад |
| КПД, %                 | 0,01—0,1     | До 20                           | 0,01—0,1     | —           | 0,03—2     |

Таблица 2 — Основные характеристики наиболее распространённых полупроводниковых лазеров

| Активная среда         | GaAs                           | GaAlAs                             |                               | GaInAs, GaAlInAs | PsS, PbSe, PbTe                    |
|------------------------|--------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|------------------|------------------------------------|
| $\lambda$ , мкм        | 0,8—0,9                        | 0,8—0,9                            | 0,8—0,9                       | 1,3—1,5          | 4—15                               |
| Режим работы           | Непрерывный (одиночные лазеры) | Непрерывный (интегральные решетки) | Импульсный (одиночные лазеры) | Непрерывный      | Непрерывный с глубоким охлаждением |
| Мощность излучения     | 5—40 мВт                       | 100—500 мВт                        | 5—30 мВт (пиковая)            | 1—5 мВт          | 0,1 мВт                            |
| Частота импульсов, Гц  | —                              | —                                  | 103                           | —                | —                                  |
| Длительность импульса  | —                              | —                                  | 103 мс                        | —                | —                                  |
| Расходимость излучения | 20—40 град                     | 20—40 град                         | 20—40 град                    | 20—40 град       | 1 град                             |
| КПД, %                 | 1—30                           | 10—20                              | 10—20                         | 10—20            | ~5                                 |

#### 1.4. Поляризация электромагнитного излучения

**Свет** — это поперечная электромагнитная волна, в которой колебания вектора напряженности электрического поля  $\vec{E}$  и вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  перпендикулярны направлению распространения волны (рис. 5). При рассмотрении взаимодействия света с веществом, основную роль играет вектор напряженности электрического поля  $\vec{E}$ , поэтому его называют **световым вектором**.

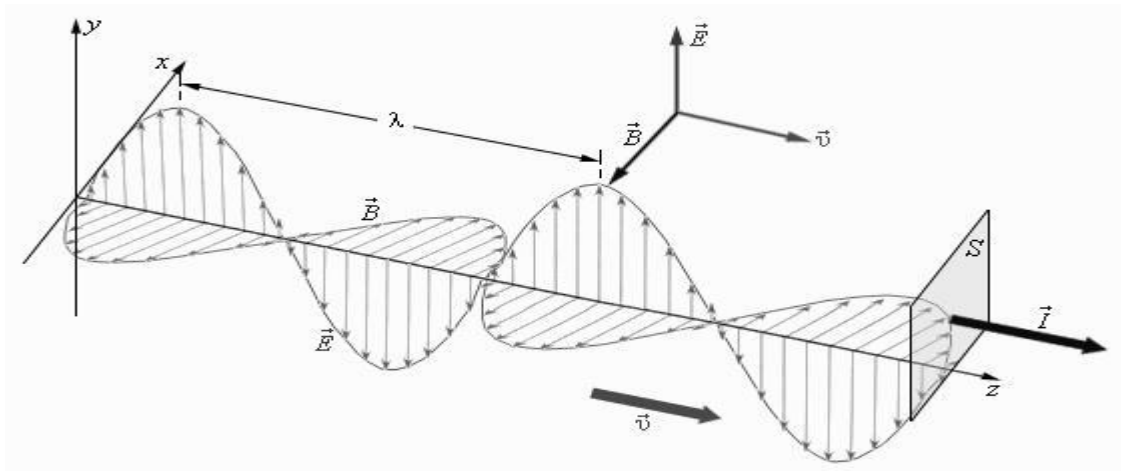


Рисунок 5 — Поперечная электромагнитная волна

Волна, в которой колебания светового вектора упорядочены, называется **поляризованной** [4]. Упорядочить колебания можно только в поперечных волнах.

Это легко увидеть на примере поперечной волны, распространяющейся вдоль оси  $Z$  (рис. 6). Если на пути волны, например, в тонком шнуре, поставить пластику с прорезью, то через прорезь будут проходить только те колебания, которые параллельны ей (в направлении  $y$  на рис. 6). Если повернуть пластинку, так, что прорезь будет находиться параллельно оси  $X$ , то через нее колебания проходить не будут. В продольной волне колебания происходят вдоль оси  $Z$ , и выделение какого-либо направления пропускания невозможно.

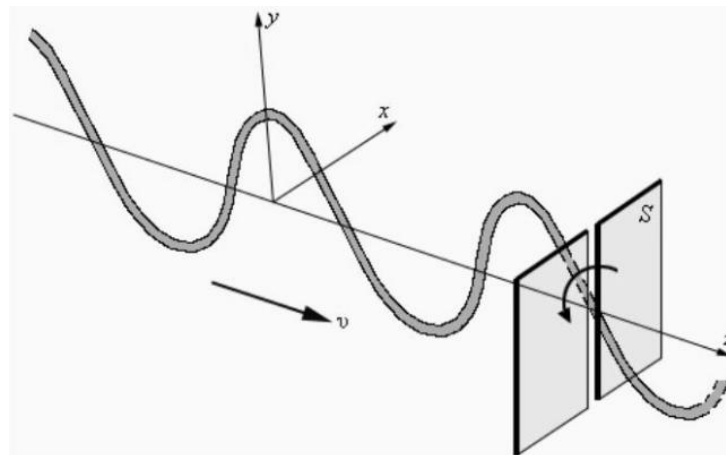


Рисунок 6 — Поляризованная волна

Естественный свет (солнечный свет, свет ламп накаливания) **не поляризован** (рис. 7, а), свет с преимущественными направлениями колебания

вектора  $E$  — частично поляризован (см. рис. 7, б), в линейно поляризованно свете колебания вектора  $E$  совершаются вдоль одной линии (см. рис. 7, в).

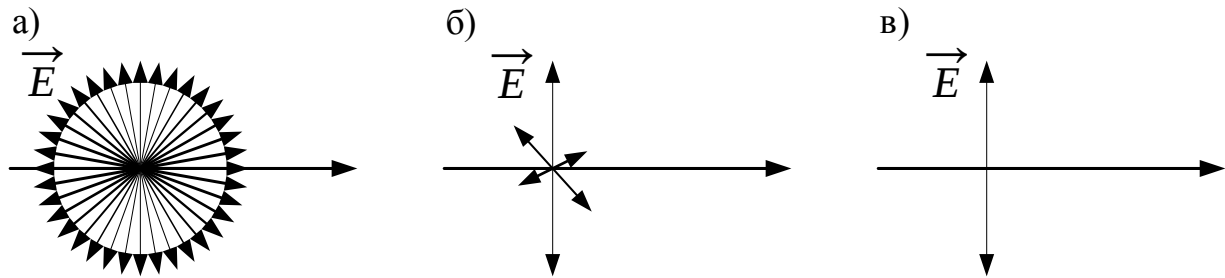


Рисунок 7 — Естественный свет (а), частично поляризованный свет (б), линейно поляризованный свет (в)

Превратить естественный свет в поляризованный можно с помощью устройства, которое называют **поляризатором**. Для получения линейно поляризованного света используют поляризаторы, основанные на использовании одного из трех физических явлений: двойного лучепреломления (поляризация при преломлении), дихроизма или поляризации при отражении от поверхности раздела двух сред [4].

Явление двойного лучепреломления наблюдается в кристаллах исландского шпата ( $CaCO_3$ ), когда падающий луч раздваивается на два луча (рис. 8).

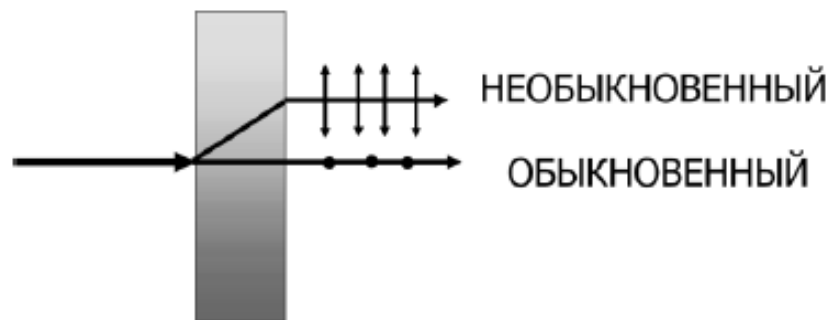


Рисунок 8 — Явление двойного лучепреломления

**Обыкновенный луч** подчиняется закону преломления, в нем колебания светового вектора происходят перпендикулярно плоскости, проходящей через падающий и преломленный лучи. В **необыкновенном луче** не выполняется закон преломления, и колебания светового вектора лежат в плоскости,

проходящей через падающий и преломленный лучи. Двойное лучепреломление связано с анизотропностью показателя преломления.

Для обыкновенного луча (о) скорость распространения световой волны изотропна (**одинакова** для всех направлений)

Для необыкновенного луча (е) скорость распространения световой волны анизотропна (**неодинакова** для всех направлений)

Показатели преломления соответственно:

$$n_o = \frac{c}{V_o}; \quad n_e = \frac{c}{V_e},$$

где  $c$  — скорость света в вакууме;

$V_o$  — скорость распространения обыкновенного луча;

$V_e$  — скорость распространения необыкновенного луча.

В зависимости от того, какая из скоростей  $V_o$  или  $V_e$  больше, различают положительные и отрицательные одноосные кристаллы. При условии, когда  $V_o > V_e$  — кристалл **положительный**,  $V_o < V_e$  — **отрицательный**.

Степень поляризации излучения  $P$  определяется по формуле [4]:

$$P = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}, \quad (1)$$

где  $I_{max}$  — максимальная интенсивность света;

$I_{min}$  — минимальная интенсивность света.

Для плоскополяризованного света  $I_{min} = 0$  и  $P = 1$ ; для естественного света  $I_{max} = I_{min}$  и  $P = 0$ . К эллиптически поляризованному свету понятие степени поляризации не применимо (у такого света колебания полностью упорядочены, так что **степень поляризации** всегда равна 1).

### 1.5. Электрооптический модулятор на основе эффекта Керра

Для модуляции лазерного излучения широко используют хорошо изученный электрооптический эффект Керра, состоящий в возникновении оптической анизотропии под действием внешнего электрического поля в изотропном веществе.

Оптические характеристики любой среды, например, такие, как показатель преломления, влияют на характер и поляризацию света, зависят от распределения связанных зарядов (электронов и ионов) в среде. Под действием приложенного электрического поля оно может меняться, что приводит к изменению так называемого эллипсоида показателя преломления и состояния поляризации. В средах с центральной симметрией наблюдается квадратичный электрооптический эффект Керра. Этот электрооптический эффект может быть использован при построении электрооптических модуляторов.

**Искусственная оптическая анизотропия** — сообщение оптической анизотропии естественно изотропным веществам, если они подвергаются механическим напряжениям, помещаются в электрическое или магнитное поле. В результате вещество приобретает свойства одноосного кристалла, оптическая ось которого совпадает с направлениями деформации, электрического или магнитного полей.

**Эффект Керра** — это возникновение двойного лучепреломления в оптически изотропных веществах под действием внешнего однородного электрического поля. Оптически изотропная среда, помещенная в однородное электрическое поле, становится анизотропной и приобретает свойства одноосного кристалла, оптическая ось которого направлена вдоль поля [4].

Механизм эффекта Керра обусловлен различной поляризуемостью молекул диэлектрика по разным направлениям. Электрическое поле ориентирует полярные молекулы вдоль поля и индуцирует электрический момент у неполярных молекул. Поэтому показатели преломления ( $n$ ), следовательно, и скорости распространения в веществе световых волн, поляризованных вдоль и перпендикулярно вектору напряженности

электрического поля) становятся различными, и возникает двойное лучепреломление.

Для наблюдения эффекта Керра (рис. 9) прозрачное диэлектрическое вещество помещают между обкладками плоского конденсатора, к которому прикладывают напряжение  $U$ , создающее в модулирующей среде достаточно сильное электрическое поле  $E$ . **Ячейку Керра** помещают между скрещенными поляризатором  $\Pi$  и анализатором  $A$ . При  $U = 0$  интенсивность света на выходе устройства также равна нулю, однако при наложении напряжения модулирующая среда становится в оптическом отношении подобной двулучепреломляющему кристаллу с оптической осью, параллельной направлению электрического поля.

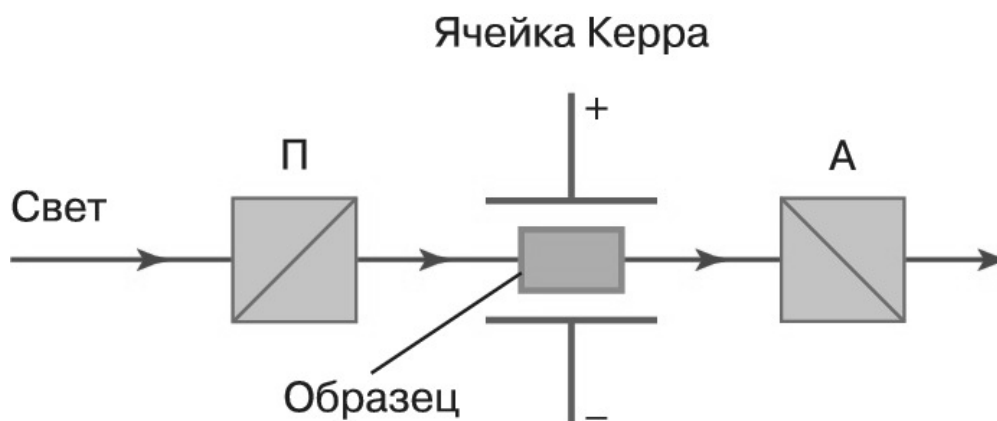


Рисунок 9 — Схема расположения приборов для наблюдения эффекта Керра  
 $\Pi$  и  $A$  — скрещенные поляризатор и анализатор, между которыми расположен конденсатор, заполненный исследуемым веществом

Поэтому, пройдя через ячейку Керра, световая волна распадается на две линейно поляризованные составляющие: обыкновенный луч ( $o$ ) и необыкновенный луч ( $e$ ). Оба луча линейно поляризованы во взаимно перпендикулярных плоскостях. Показатели преломления обыкновенного ( $n_o$ ) и необыкновенного ( $n_e$ ) лучей и их скорости в направлении перпендикулярном полю различны. Проходя через вещество, обыкновенный и необыкновенный лучи приобретают разность фаз и, складываясь на выходе, дают в общем случае эллиптически поляризованный свет, частично проходящий через анализатор.

Величина фазового сдвига  $\delta$  обыкновенного и необыкновенного лучей анизотропной среды определяется выражением [4]:

$$\delta = \frac{2\pi K l U^2}{d^2}, \quad (2)$$

где  $l$  — длина пути в веществе;

$d$  — расстояние между обкладками конденсатора;

$U$  — напряжение приложенное к ячейке Керра;

$K$  — постоянная Керра.

При разности хода обыкновенного и необыкновенного лучей, равной  $\lambda/2$  на выходе будет линейно поляризованная волна, плоскость поляризации которой повернута на  $90^\circ$  относительно падающей волны.

Можно показать, что интенсивность света  $I$  на выходе из анализатора [4]:

$$I = I_0 \sin^2 \frac{\delta}{2}, \quad (3)$$

где  $I_0$  — интенсивность света на выходе из анализатора при параллельном положении анализатора и поляризатора, и при нулевом электрическом поле;

$I$  — интенсивность света на выходе из анализатора при наличии электрического поля, приложенном к ячейке Керра и направленном, под углом  $45^\circ$  к скрещенным анализатору и поляризатору.

Из выражения (3) фазовый сдвиг  $\delta$  равен:

$$\delta = 2 \arcsin \sqrt{\frac{I}{I_0}}. \quad (4)$$

Для определения постоянной Керра  $K$  продифференцируем уравнение (3) по  $U^2$  и выразим оттуда  $K$ :

$$K = \frac{d^2}{\pi l} \frac{d\delta}{dU^2}. \quad (5)$$

Для вычисления постоянной Керра необходимо:

1. Снять экспериментально зависимость  $I/I_0$  от напряжения  $U$ ;

2. Вычислить  $\delta$  по формуле (4) и результаты вычислений представить в векторном виде;

3. Вычислить  $U^2$ ; результаты вычислений представить в векторном виде;

Как следует из формулы (2) зависимость фазового сдвига  $\delta$  от  $U^2$  имеет линейный характер.

4. С помощью функции  $\text{slope}(U^2, \delta)$  в *Mathcad* найти  $d\delta/dU^2$  и, зная геометрические размеры  $l$  и  $d$  ячейки Керра, вычислить постоянную Керра  $K$  по формуле (5).

Постоянная Керра  $K$  определяет чувствительность ячейки Керра.

### 1.6. Расходимость лазерного луча

**Расходимость пучка лазерного луча** является мерой того, как быстро луч расходится (расширяется) в дальней зоне. Малая расходимость пучка может применяться в таких областях, как целеуказание, или канал оптической связи в свободном пространстве. Пучки с очень малой расходимостью, то есть с приблизительно постоянным радиусом на значительном расстоянии распространения, называются коллимированными пучками.

Оценку **расходимости излучения** можно сделать, измерив размеры лазерного пучка в двух сечениях, отстоящих друг от друга на некоторых расстояниях. Размеры светового пятна измеряются на экране, который может перемещаться по ходу луча. На рис. 10 изображена схема измерения размеров лазерного пятна в двух сечениях.

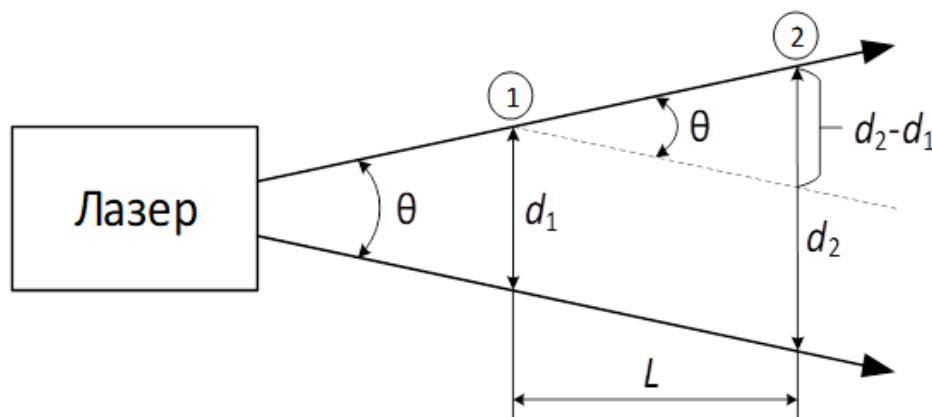


Рисунок 10 — Схема измерения размеров лазерного пятна в двух сечениях

Угол расходимости лазерного луча определяют по формуле

$$\theta = \frac{d_2 - d_1}{L}, \quad (6)$$

где  $d_1, d_2$  — диаметры светового пятна в положениях 1 и 2;

$L$  — расстояние между положениями экрана.

Схема измерения размеров лазерного пятна и формула для расчета угла расходимости (10) используется в разделе 2.3.

Значения расходимости излучения для наиболее распространенных типов лазеров приведены в табл. 1 и табл. 2.

## **2. Порядок выполнения работы**

### **Указания по технике безопасности:**

1. При выполнении лабораторной работы не прикладывать усилий при закреплении элементов в стойках и закручивании закрепляющих винтов;

2. Установка содержит лазер и большое количество отражающих поверхностей, поэтому при проведении измерений следить, чтобы прямые и отраженные лучи не попадали в глаза, нельзя смотреть в выходное отверстие лазерной трубки;

3. Блок питания лазера — источник высокого напряжения, поэтому категорически запрещается трогать разъемы для подключения проводов.

4. По завершению измерений необходимо отключить все приборы от электрической сети.

### **Общие указания**

Важнейшим этапом работы является выполнение юстировки.

Юстировка — совокупность операций по выравниванию конструкций и конструктивных элементов вдоль некоторого направления, а также по приведению измерительного или оптического прибора в рабочее состояние, обеспечивающее точность, правильность и надежность их действия.

Отъюстировать — точно подогнать, отрегулировать, выверить прибор, механизм и тому подобное или их части.

1. Перед началом измерений необходимо производить юстировку приборов измерительной системы вдоль направления лазерного луча.

Юстировка в данной работе осуществляется с помощью регулировочных винтов лазера, фотодиода, поляризатора, анализатора, ячейки Керра, экрана.

Критерием точности юстировки для измерительных систем при выполнении работ по пунктам 2.1, 2.2, 2.4, является максимальный ток фотодиода, а по пункту 2.3 — точность совмещения центра светового пятна с центром экрана.

2. При измерении тока фотодиода в системе лазер — фотодиод важно учитывать ток засветки  $I_{\text{засв}}$  — ток фотодиода, вызванный внешними источниками света.

Измеряемый ток фотодиода  $I$  равен сумме тока фотодиода вызванного лазерным светом и тока засветки  $I_{\text{засв}}$ . В дальнейшем ток засветки необходимо вычитать и измеряемого тока фотодиода.

3. Интенсивность излучения лазера можно приблизительно считать пропорциональной току фотодиода (за вычетом тока засветки). Поэтому в работе для упрощения задачи вместо интенсивности лазерного излучения используется ток фотодиода.

4. Все расчеты и вычисления необходимо производить в пакете *Mathcad*.

### 2.1. Определение степени поляризации излучения лазера

Схема лабораторной установки, показана на рис. 11.

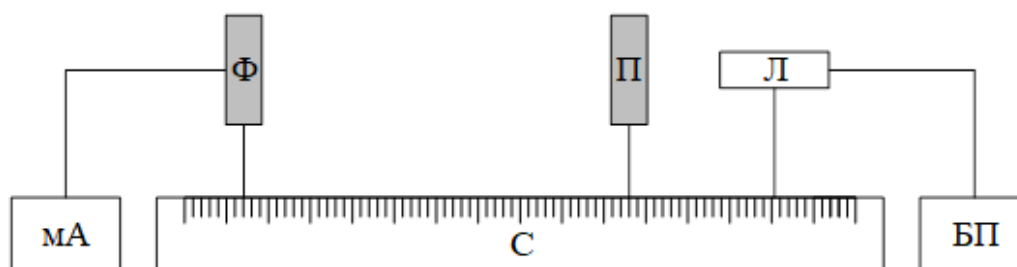


Рисунок 11 — Схема лабораторной установки для определения поляризации лазерного излучения

С — оптическая скамья;

Л — лазер;

БП — блок питания лазера;

П — поляризатор;

Ф — фотодиод;

мА — измеритель тока фотодиода.

1. Установить *He-Ne* лазер (Л) и фотодиод (Ф) на оптическую скамью (С) в соответствии со схемой рис. 11;

2. Включить измеритель тока фотодиода (мА);

3. Не включая блок питания лазера (БП), измерить ток засветки  $I_{засв}$ , записать показания в табл. 3 и табл. 4;

4. Включить блок питания лазера. Отъюстировать систему лазер — фотодиод. Контроль точности юстировки осуществлять по показаниям измерителя тока фотодиода. Добиться максимального значения фототока;

5. Установить поляризатор (П) в соответствии со схемой рис. 11 и отъюстировать его;

6. Медленно вращая поляризатор до полного оборота вокруг оси пучка лазерного излучения найти минимальные  $I_{min}$  и максимальные  $I_{max}$  значения тока фотодиода. Занести показания в табл. 3. Повторить опыт несколько раз;

7. Установить угол поворота поляризатора на  $0^\circ$ . Вращая поляризатор по часовой стрелке с шагом  $10^\circ$  до полного оборота, снять показания измерителя тока фотодиода  $I$  и записать показания в табл. 4;

8. Вместо *He-Ne* лазера установить инжекционный лазер, выполнить пункты 4, 5, 6, 7. Последующие пункты 9—11 выполнить для *He-Ne* лазера и инжекционного лазера;

9. Рассчитать степень поляризации лазерного излучения по формуле (1), найти среднее значение степени поляризации;

10. Оценить погрешность измерения степени поляризации  $\sigma_P$  (среднее квадратическое отклонение) по формуле

$$\sigma_P = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P - \bar{P})^2}{n}},$$

где  $P$  — степень поляризации лазерного излучения;

$\bar{P}$  — среднее значение степени поляризации;

$n$  — количество измерений.

Занести результаты вычислений в табл. 3.

Таблица 3 — Степень поляризации лазерного излучения

| He-Ne лазер        |                        |                        |     |           |            |                        | $I_{\text{засв}}, \text{ мА}$ |
|--------------------|------------------------|------------------------|-----|-----------|------------|------------------------|-------------------------------|
| №                  | $I_{\min}, \text{ мА}$ | $I_{\max}, \text{ мА}$ | $P$ | $\bar{P}$ | $\sigma_p$ | $\bar{P} \pm \sigma_p$ |                               |
| 1                  |                        |                        |     |           |            |                        |                               |
| 2                  |                        |                        |     |           |            |                        |                               |
| ...                |                        |                        |     |           |            |                        |                               |
| 6                  |                        |                        |     |           |            |                        |                               |
| Инжекционный лазер |                        |                        |     |           |            |                        |                               |
| №                  | $I_{\min}, \text{ мА}$ | $I_{\max}, \text{ мА}$ | $P$ | $\bar{P}$ | $\sigma_p$ | $\bar{P} \pm \sigma_p$ |                               |
| 1                  |                        |                        |     |           |            |                        |                               |
| 2                  |                        |                        |     |           |            |                        |                               |
| ...                |                        |                        |     |           |            |                        |                               |
| 6                  |                        |                        |     |           |            |                        |                               |

Таблица 4 — Зависимость фототока от угла поворота поляризатора

| He-Ne лазер          |          | Инжекционный лазер   |          | $I_{\text{засв}}, \text{ мА}$ |
|----------------------|----------|----------------------|----------|-------------------------------|
| Угол $\theta$ , град | $I$ , мА | Угол $\theta$ , град | $I$ , мА |                               |
| 0                    |          | 0                    |          |                               |
| 10                   |          | 10                   |          |                               |
| ...                  |          | ...                  |          |                               |
| 360                  |          | 360                  |          |                               |

11. Построить график зависимости фототока  $I-I_{\text{засв}}$  от угла поворота поляризатора  $\theta$ . Указать углы, при которых поляризатор полностью гасит излучение.

## 2.2. Исследование модуляции лазерного излучения

В этой части работы необходимо:

- исследовать зависимость лазерного излучения от напряжения на ячейке Керра;
- определить постоянную Керра.

Схема лабораторной установки, показана на рис. 12.

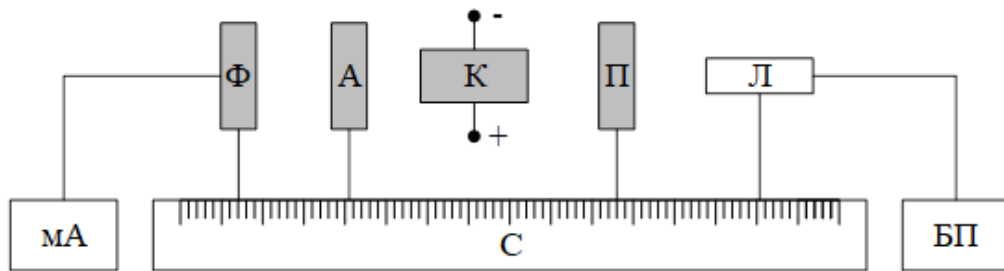


Рисунок 12 — Схема лабораторной установки для исследования электрооптического эффекта Керра

С — оптическая скамья;

Л — лазер;

БП — блок питания лазера;

П — поляризатор;

К — ячейка Керра;

А — анализатор;

Ф — фотодиод;

мА — измеритель тока фотодиода.

1. Установить *He-Ne* лазер (Л) и фотодиод (Ф) на оптическую скамью (С) в соответствии со схемой рис. 12;
2. Включить измеритель тока фотодиода (мА);
3. Не включая блок питания лазера (БП), измерить и записать ток засветки  $I_{\text{засв}}$ , записать показания в табл. 5;
4. Включить блок питания лазера. Отъюстировать систему лазер — фотодиод;
5. Установить поляризатор (П), анализатор (А) и ячейку Керра (К) в соответствии со схемой рис. 12 и отъюстировать их;

6. Установить направление пропускания поляризатора и анализатора под углом  $45^\circ$  к вертикали;

7. Измерить значение тока фотодиода  $I_0$ , вышедшего из анализатора, при нулевом напряжении на ячейке Керра ( $U = 0$  В). Занести значение  $I_0$  в табл. 5;

8. Установить направление пропускания поляризатора под углом  $45^\circ$  к вертикали, анализатора под углом  $45^\circ$  к горизонтали;

9. Изменяя напряжение, приложенное к ячейке Керра в пределах 300—1000 В с шагом 50 В, снять показания измерителя тока фотодиода и записать их в табл. 5;

10. Вместо *He-Ne* лазера установить инжекционный лазер и выполнить пункты 4, 5, 6—9. Последующие пункты 11—13 выполнить для *He-Ne* лазера и инжекционного лазера;

11. Рассчитать  $I/I_0$ ,  $\delta$  по формуле (4). Занести полученные данные в табл. 5.

Таблица 5 — Значения тока фотодиода

| He-Ne лазер        |                |                 |                           |                        | $I_{\text{засв, мА}}$ |
|--------------------|----------------|-----------------|---------------------------|------------------------|-----------------------|
| $I_0, \text{ мА}$  | $U, \text{ В}$ | $I, \text{ мА}$ | $I/I_0, \text{ отн. ед.}$ | $\delta, \text{ град}$ |                       |
|                    | 300            |                 |                           |                        |                       |
|                    | 350            |                 |                           |                        |                       |
|                    | ...            |                 |                           |                        |                       |
|                    | 1000           |                 |                           |                        |                       |
| Инжекционный лазер |                |                 |                           |                        |                       |
| $I_0, \text{ мА}$  | $U, \text{ В}$ | $I, \text{ мА}$ | $I/I_0, \text{ отн. ед.}$ | $\delta, \text{ град}$ |                       |
|                    | 300            |                 |                           |                        |                       |
|                    | 350            |                 |                           |                        |                       |
|                    | ...            |                 |                           |                        |                       |
|                    | 1000           |                 |                           |                        |                       |

12. Построить график зависимости  $(I - I_{\text{засв}})/(I_0 - I_{\text{засв}})$  от напряжения  $U$ , приложенного к ячейке Керра;

13. Рассчитать постоянную Керра  $K$  по методике, изложенной в пункте 1.5.

### 2.3. Определение расходимости излучения лазера

Схема лабораторной установки, показана на рис. 13.

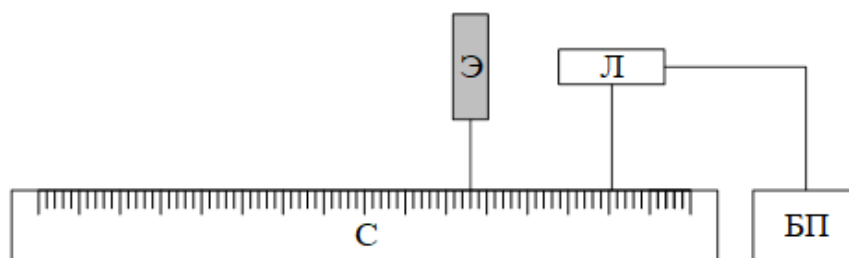


Рисунок 13 — Схема лабораторной установки для определения расходимости излучения лазера

Э — экран;

С — оптическая скамья;

Л — лазер;

БП — блок питания лазера.

1. Установить *He-Ne* лазер (Л) и экран (Э) на оптическую скамью (С) в соответствии со схемой рис. 13;

2. Включить блок питания лазера (БП). Отъюстировать систему лазер — экран. Контроль точности юстировки осуществлять по положению светового пятна излучения лазера на экране. Добиться максимальной точности совмещения светового пятна с центром экрана;

3. Измерить диаметр лазерного пятна  $d_1$  (проводить измерения в соответствии с методикой, описанной в пункте 1.6), записать показания в табл. 6;

4. Передвинуть экран от лазера на 2—3 м, выполнить пункт 2;

5. Измерить расстояние  $L$  рулеткой с точностью 1 мм, измерить диаметр лазерного пятна  $d_2$ , записать показания в табл. 6;

6. Вместо *He-Ne* лазера установить инжекционный лазер и выполнить пункты 2—5;

7. Рассчитать угловую расходимость излучения *He-Ne* лазера и лазера на  $p$ - $n$  переходе по формуле (6). Полученные значения в радианах перевести также в градусы, записать полученные данные в табл. 6.

Таблица 6 — Расходимость лазерного излучения

| <i>He-Ne</i> лазер |  | Инжекционный лазер |  |
|--------------------|--|--------------------|--|
| $d_1$ , мм         |  | $d_1$ , мм         |  |
| $d_2$ , мм         |  | $d_2$ , мм         |  |
| $L$ , мм           |  | $L$ , мм           |  |
| $\theta$ , мрад    |  | $\theta$ , мрад    |  |
| $\theta$ , град    |  | $\theta$ , град    |  |

## 2.4. Исследование спектральной характеристики излучения лазера

Схема лабораторной установки, показана на рис. 14.

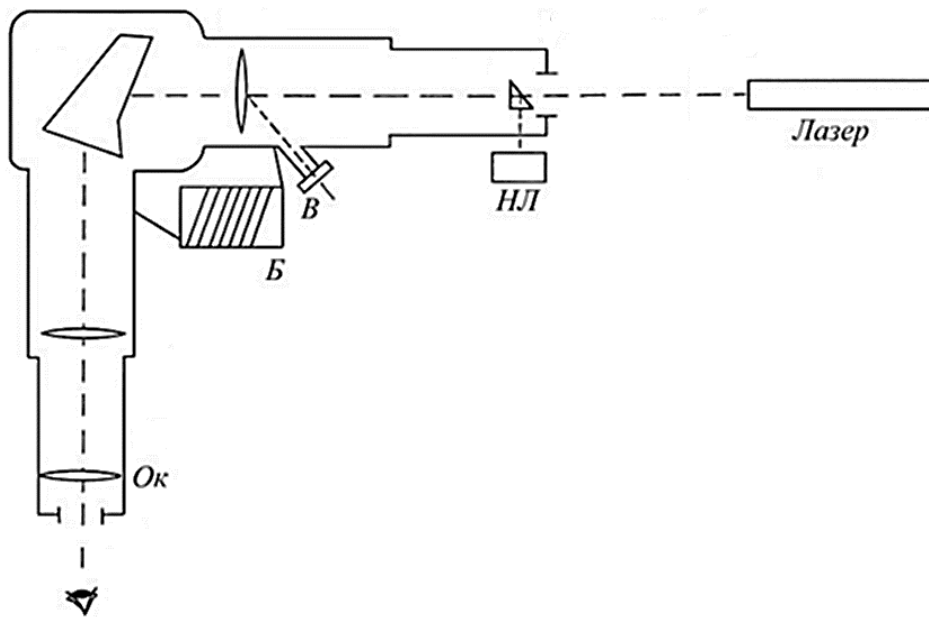


Рисунок 14 — Схема лабораторной установки для исследования спектральной характеристики излучения лазера

НЛ — неоновая лампа;

В — микровинт перемещающий объектив;

Б — барабан монохроматора;

ОК — окуляр монохроматора.

Методика градуировка шкалы барабана монохроматора приведена в приложении А с использованием данных из табл. 9.

1. Установить *He-Ne* лазер в соответствии с рис. 14;
2. Включить блок питания лазера и в окуляр монохроматора наблюдать спектр излучения *He-Ne* лазера. Вращая барабан монохроматора (Б) найти

линию генерации излучения лазера — линия, соответствующая цвету излучения лазера;

3. В качестве эталонного источника излучения используется неоновая лампа. Включить неоновую лампу (НЛ) и получить спектр *Ne* в плоскости указателя. Убедиться, что линии излучения *Ne* присутствуют в спектре излучения *He-Ne* лазера. Остальные линии принадлежат *He*;

4. Вращая барабан монохроматора найти яркую желтую линию излучения *Ne*. Кроме того, найти следующие линии излучения:

- все яркие линии слева от яркой желтой линии;
- одиночную зеленую и две близких зеленых линии слева от яркой желтой линии;
- наиболее яркие красные линии слева от линии генерации.

5. Найти самые яркие линии *He* в желтой, желто-зеленой, голубой и фиолетовой частях спектра, *He-Ne* лазера. Отключить неоновую лампу;

6. Найти изученные линии *Ne* и *He* в таблице спектральных линий (см. табл. Б.1);

7. Углы поворота барабана монохроматора, полученные при выполнении пунктов 2—5, занести в табл. 7;

8. Установить фотодиод к окуляру монохроматора;

9. Включить измеритель тока фотодиода;

10. Не включая блок питания лазера, измерить и записать ток засветки  $I_{\text{засв}}$ , записать показания в табл. 8;

11. Включить блок питания лазера. Отъюстировать систему лазер — монохроматор — фотодиод;

12. Вращая барабан монохроматора (Б) в пределах 2500—500°, с шагом 50° снять показания измерителя тока фотодиода  $I$  и записать в табл. 8;

13. Вместо *He-Ne* лазера установить инжекционный лазер и выполнить пункты 11,12;

14. Заменить лазер на светодиодную градуировочную лампу и, вращая барабан монохроматора, найти углы поворота барабана монохроматора для

красного, зеленого и синего света максимальной яркости, полученные данные записать в табл. 9, эти данные затем используются в приложении А;

Таблица 7 — Линии излучения в спектре *He-Ne* лазера

| Линии излучения в спектре лазера | Цвет | Угол поворота барабана | $\lambda_{\text{эксперимент, нм}}$ | $\lambda_{\text{табличная, нм}}$ |
|----------------------------------|------|------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| <i>Ne</i>                        |      |                        |                                    |                                  |
|                                  |      |                        |                                    |                                  |

Продолжение таблицы 7

| Линии излучения в спектре лазера | Цвет | Угол поворота барабана | $\lambda_{\text{эксперимент, нм}}$ | $\lambda_{\text{табличная, нм}}$ |
|----------------------------------|------|------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| <i>He</i>                        |      |                        |                                    |                                  |
|                                  |      |                        |                                    |                                  |
| Линия генерации                  |      |                        |                                    |                                  |

Таблица 8 — Спектральные характеристики лазеров

| Угол поворота барабана | $\lambda$ , нм | <i>He-Ne</i> лазер | Инжекционный лазер | $I_{\text{засв, мА}}$ |
|------------------------|----------------|--------------------|--------------------|-----------------------|
|                        |                | $I$ , мА           | $I$ , мА           |                       |
| 2500°                  |                |                    |                    |                       |
| 2450°                  |                |                    |                    |                       |
| ...                    |                |                    |                    |                       |
| 500°                   |                |                    |                    |                       |

Таблица 9 — Данные для градуировки шкалы барабана

| Цвет светодиодной лампы | Угол барабана монохроматора | Длина волны |
|-------------------------|-----------------------------|-------------|
| красный                 |                             | 660 нм      |
| зеленый                 |                             | 525 нм      |
| синий                   |                             | 470 нм      |

15. Построить график зависимости тока фотодиода  $I-I_{\text{засв}}$ , вызванный лазерным излучением, от длины волны  $\lambda$  для *He-Ne* лазера и инжекционного лазера.

**Отчет должен содержать:**

- Цель и название работы;
- Экспериментальные данные для расчетов и построения графиков;
- Результаты расчетов и графики соответствующих зависимостей по экспериментальным данным;
- Выводы.

**Контрольные вопросы**

1. Описать механизм вынужденного излучения света.
2. Перечислить способы возбуждения активной среды.
3. Что называется инверсной населенностью и почему она необходима для получения усиления в квантовой системе?
4. Чем добивается усиление сигнала в инверсной среде?
5. От каких факторов зависит ширина спектральной линии?
6. Назовите и кратко охарактеризуйте основные способы накачки.
7. Укажите условия возникновения генерации излучения в квантовой системе.
8. Что такое когерентность излучения, и для каких областей применения лазеров она важна?
9. Какими факторами определяется расходимость лазерного излучения?
10. Почему плотность мощности излучения лазеров может достигать очень больших величин?
11. Как зависит мощность излучения инжекционного лазера от плотности тока через переход?

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1 Алешкевич В.А. Курс общей физики. Оптика: учеб. пособие / В.А. Алешкевич. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. — 320 с.

2 Киселев, Г.Л. Квантовая и оптическая электроника: учеб. пособие / Г. Л. Киселев. — М.: Лань, 2011. — 313 с.

3 БореЙшо А.С. Лазеры. Устройство и действие: учеб. пособие / А.С. БореЙшо, С.В. Ивакин. — М.: Лань, 2017. — 312с.

4 Айхлер Ю. Лазеры. Исполнение, управление, применение / Ю. Айхлер, Г.И. Айхлер. — М.: Техносфера, 2012. — 496 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Градуировка шкалы барабана монохроматора

Для нахождения зависимости между углом поворота барабана монохроматора и длиной волны выходного излучения необходимо как минимум три опорные точки. Такими точками являются три цвета светодиодной лампы с монохромным излучением света:

- красный — 660 нм;
- зеленый — 525 нм;
- синий — 470 нм.

По этим точкам необходимо построить кривую, максимально близко описывающую зависимость длины волны излучения от угла поворота барабана монохроматора. Для этого в ПО *MathCad* можно воспользоваться функцией аппроксимации по точкам *expfit()*. В качестве аргументов она принимает вектор углов поворота барабана и соответствующий вектор длин волн выходного излучения. Данная функция возвращает вектор, содержащий три коэффициента для экспоненциальной кривой вида, (А.1):

$$f(x) = ae^{bx} + c, \quad (\text{А.1})$$

где  $x$  — аргумент функции;

$a, b, c$  — коэффициенты экспоненциальной кривой.

На рис. А.1 изображен пример построения градуировочной кривой для зависимости длины волны от угла поворота барабана. После возвращения маткадом коэффициентов, их необходимо подставить в формулу (А.1). В дальнейших расчетах при переводе градусной меры угла поворота барабана в длину волны выходного излучения необходимо использовать исключительно эту формулу. Во всех расчетах длина волны измеряется только в нанометрах (нм). Углы поворота барабана монохроматора для построения градуировочной кривой необходимо брать из табл. 9.

$$\varphi := \begin{pmatrix} 500 \\ 1000 \\ 1600 \end{pmatrix} \text{ — углы поворота барабана монохроматора}$$

$$\lambda := \begin{pmatrix} 470 \\ 525 \\ 660 \end{pmatrix} \text{ — длины волн}$$

$$\xi_w := \text{expfit}(\varphi, \lambda) = \begin{pmatrix} 31.978 \\ 1.287 \times 10^{-3} \\ 409.128 \end{pmatrix}$$

$$\lambda(\varphi) := c_0 \cdot e^{c_1 \cdot \varphi} + c_2$$

$$\varphi := 0 \dots 3000$$

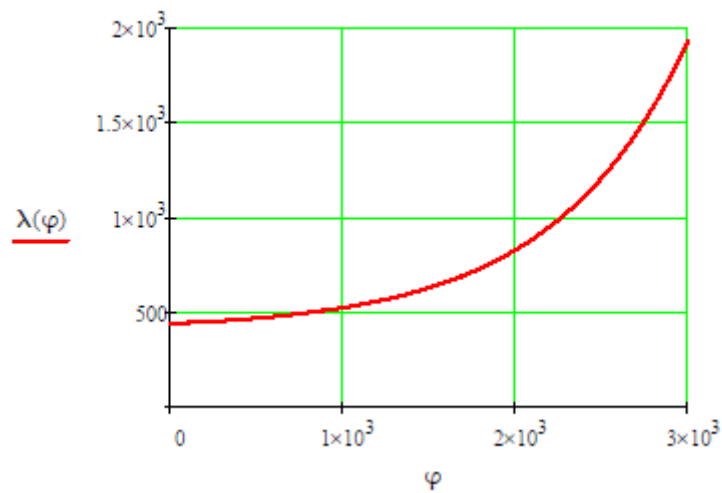


Рисунок А.1 — Градировочная кривая для зависимости длины волны от угла поворота барабана

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Длины волн ярких спектральных линий некоторых элементов

Таблица Б.1 — Длины волн ярких спектральных линий некоторых элементов

| Ртуть            |       | Гелий         |       | Неон             |       |
|------------------|-------|---------------|-------|------------------|-------|
| Окраска линии    | нм    | Окраска линии | нм    | Окраска линии    | нм    |
| Красная          | 623,4 | Темно-красная | 706,5 | Ярко-красная     | 640,2 |
| Красно-оранжевая | 612,3 | Ярко-красная  | 657,8 | Красно-оранжевая | 614,3 |
| Желтая           | 579,1 | Оранжевая     | 587,6 | Оранжевая        | 594,5 |
| Желтая           | 577,0 | Зеленая       | 501,6 | Желтая           | 585,2 |
| Зеленая          | 546,1 | Зеленая       | 492,2 | Зеленая          | 540,0 |
| Сине-зеленая     | 491,6 | Синяя         | 471,3 | Зеленая          | 533,0 |
| Фиолетовая       | 435,8 | Фиолетовая    | 447,1 | Зеленая          | 503,1 |
| Фиолетовая       | 434,7 | Фиолетовая    | 402,6 | Сине-зеленая     | 484,9 |
| Фиолетовая       | 433,9 | Фиолетовая    | 388,9 |                  |       |
| Фиолетовая       | 410,8 |               |       |                  |       |
| Фиолетовая       | 407,7 |               |       |                  |       |
| Фиолетовая       | 404,7 |               |       |                  |       |

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Перечень используемого оборудования

- гелий-неоновый и инжекционный лазеры;
- блок питания лазера;
- оптическая скамья;
- поляризатор, анализатор;
- фотодиод;
- измеритель тока фотодиода;
- ячейка Керра;
- экран;
- монохроматор УМ-2;
- неоновая лампа;
- светодиодная лампа;
- рулетка 5 м с точностью 1 мм.

**КВАНТОВЫЕ  
И ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ.  
Лабораторный практикум по дисциплине**

*Учебно-методическое пособие*

Часть 3

**Лазеры**

*Составители:* **Макаров** Виктор Константинович,  
**Щерба** Антон Викторович

В авторской редакции

Изд. № 203/2020. Объем 2,25 п.л.  
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»