

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой»



Д. О. Окунев

ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНИКА

Методические указания
к лабораторным и расчетно-графическим работам
для студентов специальности 1-31 04 08
«Компьютерная физика»

Текстовое электронное издание

Новополоцк
Полоцкий государственный университет
имени Евфросинии Полоцкой
2026

1 – дополнительный титульный экран – сведения об издании

УДК 621.373.826(075.8)(0.034)

Одобрено и рекомендовано к изданию
методической комиссией факультета компьютерных наук и электроники
(протокол № 10 от 24.04.2026)

Кафедра физики

2 – дополнительный титульный экран – производственно-технические сведения

Для создания текстового электронного издания «Лазерная техника» Д. О. Окунева использованы текстовый процессор Microsoft Word и программа Adobe Acrobat XI Pro для создания и просмотра электронных публикаций в формате PDF.

Учебное издание

ОКУНЕВ Дмитрий Олегович

ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНИКА

Методические указания
к лабораторным и расчетно-графическим работам
для студентов специальности 1-31 04 08
«Компьютерная физика»

Редактор *Т. А. Дарьянова*

Подписано к использованию 15.10.2026.

Объем издания 2,20 Мб. Заказ 435.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования «Полоцкий государственный университет
имени Евфросинии Полоцкой».

Свидетельство о государственной регистрации
издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/305 от 22.04.2014.

ЛП № 02330/278 от 27.05.2004.

211440, ул. Блохина, 29,
г. Новополоцк,
Тел. 8 (0214) 59-95-41, 59-95-44
<http://www.psu.by>

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ЛАЗЕРНОЙ ТЕХНИКЕ.....	6
Лабораторная работа 1 (расчетно-графическая) ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРИНЦИПОВ УСИЛЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ВЕЩЕСТВОМ.....	8
Лабораторная работа 2 (расчетно-графическая) ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕОРИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С АТОМНОЙ И МОЛЕКУЛЯРНОЙ СИСТЕМОЙ	14
Лабораторная работа 3 ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДИМОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА	22
Лабораторная работа 4 ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	31
Лабораторная работа 5 (расчетно-графическая) ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРИНЦИПОВ РАБОТЫ ЛАЗЕРНЫХ РЕЗОНАТОРОВ.....	41
Лабораторная работа 6 (расчетно-графическая) ИЗУЧЕНИЕ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТЬЮ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	52
Лабораторная работа 7 (расчетно-графическая) РАСЧЕТ ЗЕРКАЛЬНЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ	62

ВВЕДЕНИЕ

Методические указания составлены в соответствии с учебной программой учреждения образования по учебной дисциплине «Лазерная техника» для студентов специальности 1-31 04 08 «Компьютерная физика».

Лабораторные работы по дисциплине «Лазерная техника» направлены на освоение знаний об общей природе оптических явлений, ознакомление студентов с современным состоянием и перспективами развития лазерной техники, формирование базовых знаний и компетенций по физике лазеров, а также принципов устройства лазерной техники.

Задачи курса:

- изучение основ физики и техники лазеров, особенностей распространения и преобразования лазерного излучения оптическими элементами и системами, принципов действия и технических характеристик лазеров различных типов;

- освоение терминологии, применяемой в лазерной физике и технике, получение навыков практической работы с лазерами и исследований процессов в лазерах и характеристик их излучения;

- освоение техники безопасности при работе с лазерами.

Дисциплина «Лазерная техника» базируется на знаниях, приобретенных студентами при изучении предшествующих учебных дисциплин: «Электричество и магнетизм», «Оптика», «Физика атома и атомных явлений», «Физика ядра», «Основы квантовой механики». При изложении материала широко используется аппарат дисциплин высшей математики.

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ЛАЗЕРНОЙ ТЕХНИКЕ

1. Общие положения

1.1. К выполнению лабораторных работ допускаются лица, прошедшие вводный и первичный инструктаж на рабочем месте с соответствующей регистрацией в журнале, изучившие техническое описание и инструкцию по эксплуатации конкретной лазерной установки, а также ознакомленные с настоящими требованиями.

1.2. Ответственность за соблюдение мер безопасности, исправность оборудования и наличие средств защиты в лаборатории несет руководитель работ (преподаватель, инженер). Студенты и лаборанты несут персональную ответственность за нарушение требований настоящей инструкции.

1.3. Лабораторные работы проводятся только в присутствии руководителя или уполномоченного инженерно-технического работника. Самостоятельное включение и эксплуатация лазерных установок студентами в отсутствие преподавателя категорически запрещается.

2. Классификация опасных и вредных факторов

При выполнении лабораторных работ персонал и обучающиеся могут подвергаться воздействию следующих факторов:

2.1. Прямое, зеркально отраженное и диффузно отраженное лазерное излучение. Основную опасность представляет поражение органов зрения и кожных покровов. Степень опасности определяется классом лазера согласно международному ГОСТ IEC 60825-1.

2.2. Сопутствующее оптическое излучение. Импульсные лампы накачки и плазменные факелы в зоне взаимодействия излучения с мишенью являются источниками мощного широкополосного ультрафиолетового, видимого и инфракрасного излучения.

2.3. Высокое электрическое напряжение. Блоки питания и системы накачки лазеров содержат конденсаторные батареи с напряжением от единиц до десятков киловольт, способные длительное время сохранять заряд после отключения оборудования.

2.4. Химическая опасность. Используемые активные среды, красители, криогенные жидкости (жидкий азот, гелий) и продукты пиролиза материалов при

лазерной обработке могут обладать высокой химической активностью, токсичностью и вызывать обморожения.

2.5. Взрыво- и пожароопасность. Взаимодействие мощного лазерного излучения с горючими материалами, парами легковоспламеняющихся жидкостей, а также пылью оптических элементов создает риск возгорания или взрыва.

3. Действия в аварийных ситуациях

3.1. При случайном облучении глаз или кожи лазерным излучением пострадавший должен немедленно сообщить руководителю работ и обратиться в медицинское учреждение для офтальмологического осмотра даже при отсутствии субъективных болевых ощущений.

3.2. При возникновении возгорания элементов установки или материалов в зоне действия луча руководитель работ обязан немедленно обесточить стенд, применить углекислотный или порошковый огнетушитель и сообщить о происшествии в пожарную охрану.

3.3. При поражении электрическим током необходимо немедленно отключить напряжение на щите, оказать пострадавшему первую доврачебную помощь и вызвать бригаду скорой помощи.

Лабораторная работа 1 (расчетно-графическая)

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРИНЦИПОВ УСИЛЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ВЕЩЕСТВОМ

Цель работы

Целью настоящей работы является закрепление теоретических знаний по основам физики лазеров, включая квантовые переходы между энергетическими уровнями, распределение населенностей уровней в условиях термодинамического равновесия, а также расчет параметров оптического резонатора. В процессе выполнения заданий обучающийся приобретает практические навыки применения соотношений Эйнштейна для спонтанного и вынужденного излучения, использования закона Бугера–Ламберта–Бера для описания взаимодействия излучения с веществом и вычисления времени жизни фотонов в резонаторе.

Теоретическая часть

1. Время жизни фотонов в резонаторе

Время жизни фотонов в резонаторе τ определяется выражением

$$\tau = \frac{L}{jc}, \quad (1)$$

где $L = L_0 + (n-1)l$ – оптическая длина резонатора; l – длина активной среды; L_0 – расстояние между активной средой и зеркалом резонатора; n – показатель преломления активной среды; c – скорость света в вакууме (рисунок 2.1).

Параметр j представляет собой суммарные логарифмические потери за проход и определяется соотношением

$$j = j_1 + \frac{j_2 + j_i}{2}, \quad (2)$$

где $j_1 = -\ln(1 - T_1)$, $j_2 = -\ln(1 - T_2)$ – логарифмические потери на зеркалах резонатора, обусловленные пропусканием зеркал с коэффициентами T_1 и T_2 ; j_i – логарифмический коэффициент внутренних потерь за проход.

Эффективный объем моды резонатора V определяется как

$$V = \frac{L}{l} V_a, \quad (3)$$

где $V_a = Sl$ – объем активной среды; S – площадь поперечного сечения активного элемента.

2. Распределение частиц по энергетическим уровням

Связь между числами частиц на энергетических уровнях в условиях термодинамического равновесия задается распределением Больцмана:

$$\frac{N_2}{g_2} = \frac{N_1}{g_1} \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{kT}\right), \quad (4)$$

где N_1 и N_2 – населенности нижнего и верхнего энергетических уровней соответственно; g_1 и g_2 – статистические веса (кратности вырождения) этих уровней; E_1 и E_2 – энергии соответствующих уровней; $k = 1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; T – термодинамическая температура.

Иллюстрации заполнения уровней с пояснениями приведены на рисунке 1.1.

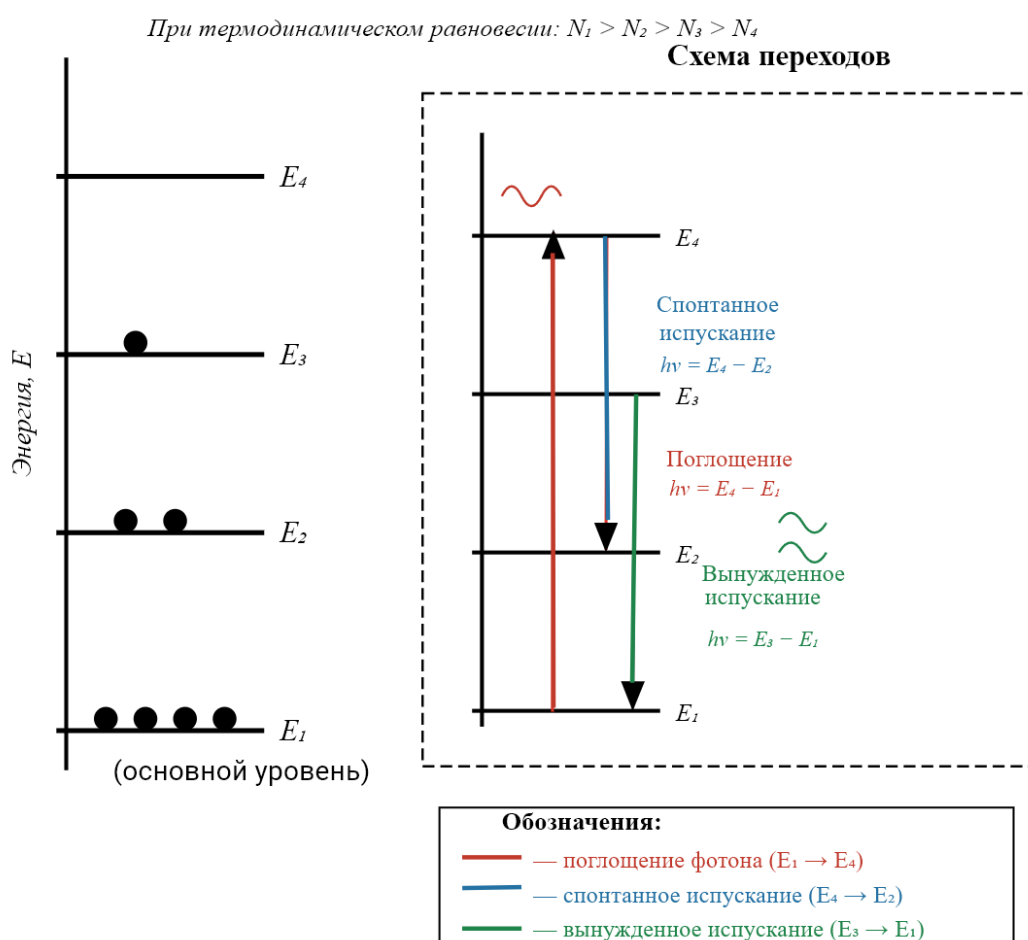


Рисунок 1.1. – Энергетическая диаграмма четырехуровневой системы

Для частного случая равенства статистических весов уровней ($g_1 = g_2$) отношение населенностей принимает вид:

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right),$$

где $\Delta E = E_2 - E_1 = h\nu$ – разность энергий между уровнями; ν – частота фотона, соответствующего переходу. Для разных температур это соотношение проиллюстрировано на рисунке 1.2.

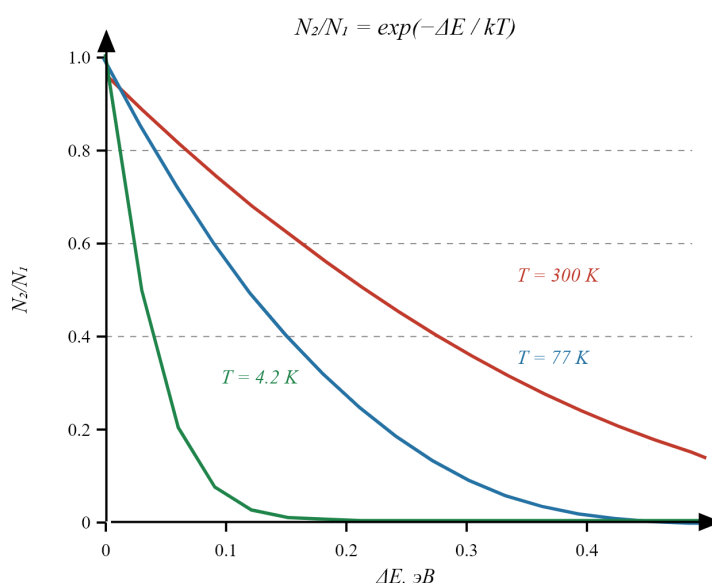


Рисунок 1.2. – Относительная населенность уровней согласно распределению Больцмана

3. Соотношения Эйнштейна для спонтанного и вынужденного излучения

Вероятность спонтанного излучения A_{21} связана с вероятностью вынужденного излучения B_{21} следующим соотношением:

$$A_{21} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} B_{21}. \quad (5)$$

Время жизни спонтанного излучения τ_{sp} определяется как величина, обратная коэффициенту Эйнштейна для спонтанного перехода:

$$\tau_{sp} = \frac{1}{A_{21}}. \quad (6)$$

Энергия фотона, испускаемого или поглощаемого при квантовом переходе, связана с частотой излучения соотношением Планка:

$$E = h\nu, \quad (7)$$

где $h \approx 6,626 \times 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка.

4. Закон Бугера–Ламберта–Бера для активной среды

Изменение интенсивности излучения до и после взаимодействия фотонов с веществом описывается законом Бугера–Ламберта–Бера (рисунок 1.3):

$$I = I_0 \exp(-\alpha d) = I_0 \exp[-\sigma(N_1 - N_2)d], \quad (8)$$

где I_0 – интенсивность падающего излучения; I – интенсивность излучения после прохождения слоя вещества толщиной d ; α – коэффициент поглощения (усиления) среды; σ – сечение перехода; N_1 и N_2 – населенности нижнего и верхнего уровней соответственно.

При создании инверсной населенности ($N_2 > N_1$) показатель экспоненты становится положительным, и среда действует как усилитель. Интенсивность насыщения излучения I_s определяется параметрами активной среды и вероятностями релаксационных переходов.

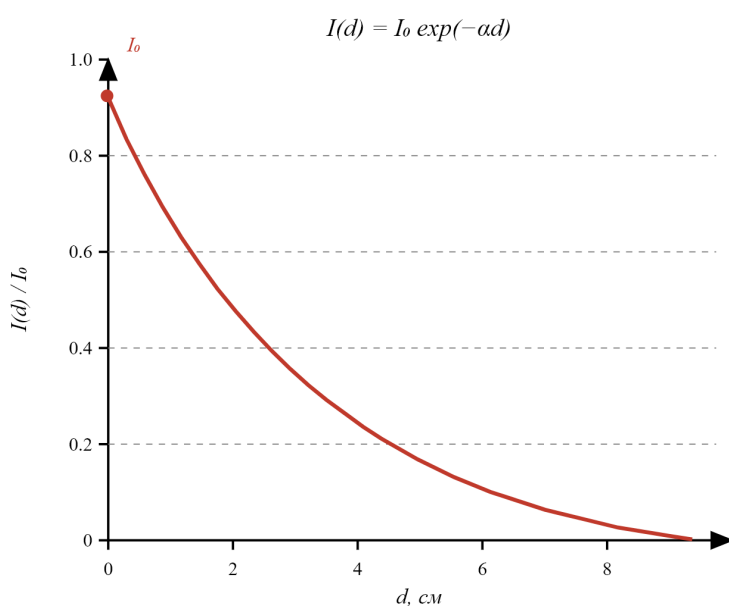


Рисунок 1.3. – Ослабление излучения в среде
(закон Бугера – Ламберта – Бера)

Практические задания

Задание 1

Определить частоту поглощения между энергетическими уровнями ν_{15} , если энергия поглощения между уровнями $E_{14} = 20$ эВ, а $E_{45} = 1$ эВ.

Задание 2

Определить энергию излучения фотона при переходе $4 \rightarrow 3$, если известны частота поглощения ν_{14} и частота излучения ν_{13} .

Задание 3

Вычислить, во сколько раз уменьшится населенность нижнего энергетического уровня при поглощении фотона за время $t = 10$ мс, если вероятность перехода $1 \rightarrow 2$ составляет $A_{12} = 10^8$ с.

Задание 4

Вычислить время жизни спонтанного излучения для длины волны $\lambda = 6328$ Å, если известно, что вероятность вынужденного излучения $A_{21} = 10^8$ с связана с вероятностью спонтанного излучения соотношением

$$W_{21}^{nr} = \frac{8\pi\sigma^2}{c^3} h g A_{21}^{nr}.$$

Задание 5

Найти относительную населенность двух возбужденных энергетических уровней, находящихся в термодинамическом равновесии, если разность частот между этими энергетическими уровнями соответствует частоте излучения YAG:Nd – лазера ($\lambda = 1,064$ мкм) при температурах $T = 300$ К, $T = 77$ К и $T = 4,2$ К.

Отчет по работе

По результатам выполненных измерений составить отчет по выполненной работе. На титульном листе отчета указать название лабораторной работы, ФИО исполнителей, номер группы и дату выполнения. Содержание отчета: привести краткую теорию; выполнение заданий представить подробно; расписать вычисления с переводом всех величин в СИ; построить графики в линейном масштабе с указанием масштаба, величин и единиц измерения для каждой из осей.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение времени жизни фотонов в резонаторе. От каких параметров резонатора и активной среды оно зависит?
2. Запишите распределение Больцмана для населенностей двух энергетических уровней. Поясните физический смысл входящих в него величин.
3. Какая связь существует между коэффициентами Эйнштейна для спонтанного и вынужденного излучения?
4. Сформулируйте закон Бугера–Ламберта–Бера применительно к активной лазерной среде. При каком условии среда проявляет усилительные свойства?
5. Что такое инверсная населенность и почему ее создание является необходимым условием для лазерной генерации?
6. Как зависит относительная населенность возбужденных уровней от температуры? Проанализируйте предельные случаи высоких и низких температур.
7. Поясните физический смысл логарифмических потерь за проход в оптическом резонаторе.
8. Каким образом пропускание выходного зеркала влияет на добротность резонатора и время жизни фотонов в нем?

Список использованной литературы

1. Айрапетян, В. С. Описание практических работ по дисциплине «Физика лазеров» : учебно-методическое пособие / В. С. Айрапетян. — Новосибирск : СГГА, [б. г.]. — Текст электронный.
2. Звелто, О. Принципы лазеров : [пер. с англ.] / О. Звелто. — 4-е изд. — СПб. : Лань, 2008. — 720 с.

Лабораторная работа 2 (расчетно-графическая) ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕОРИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С АТОМНОЙ И МОЛЕКУЛЯРНОЙ СИСТЕМОЙ

Цель работы

Целью настоящей работы является изучение фундаментальных принципов взаимодействия электромагнитного излучения с веществом, составляющих физическую основу работы лазеров, а также приобретение практических навыков расчета параметров активной среды, оптического резонатора и характеристик лазерного излучения. В ходе выполнения заданий обучающийся осваивает методики вычисления разности населенностей энергетических уровней, сечения вынужденного излучения, пороговых условий генерации, спектральных характеристик резонатора и времени жизни возбужденных состояний.

Теоретическая часть

1. Принцип работы лазера и основные компоненты

Лазер (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation – усиление света за счет вынужденного испускания излучения) представляет собой устройство, генерирующее когерентное электромагнитное излучение оптического диапазона. Основными компонентами лазера (рисунок 2.1) являются: активный элемент (АЭ), усиливающий падающую электромагнитную волну; система накачки, селективно сообщаящая энергию активной среде для достижения инверсной населенности; оптический резонатор, состоящий из двух расположенных друг против друга зеркал ($M1$ с коэффициентом отражения $R \approx 100\%$ и полупрозрачного зеркала $M2$) и накапливающий часть индуцированного излучения.

Усиление электромагнитной волны в среде возможно только при выполнении условия $N_2 > N_1$, где N_1 и N_2 – число частиц на нижнем и верхнем энергетических уровнях соответственно. В состоянии термодинамического равновесия выполняется обратное соотношение $N_2 < N_1$. Для получения интенсивного вынужденного излучения используют многократный проход луча через активную среду, помещенную в оптический резонатор. Использование двухуровневой системы не позволяет создать инверсию населенностей, так как действие сильного электромагнитного поля приводит лишь к выравниванию населенностей (эффект двухуровневого насыщения). Для создания инверсии необходима система из трех или более энергетических уровней.

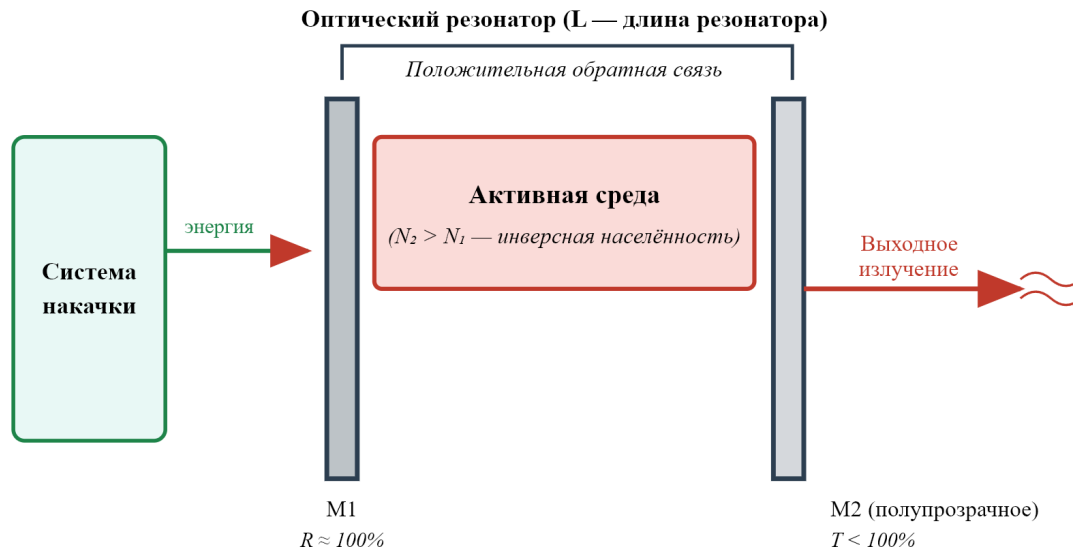


Рисунок 2.1. — Принципиальная схема лазера

2. Постулаты Бора и вероятности переходов

Согласно постулатам Бора, переход между стационарными энергетическими уровнями E_i и E_j сопровождается поглощением или испусканием фотона с энергией:

$$E_i - E_j = h\nu_{ij}, \quad (1)$$

где $h = 6,626 \times 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка; ν_{ij} — частота перехода.

Если $E_i > E_j$, происходит испускание фотона; если $E_i < E_j$ — поглощение.

Вероятности переходов поглощения и вынужденного излучения определяются соотношениями

$$W_{12} = \sigma_{12}F, \quad W_{21} = \sigma_{21}F, \quad (2)$$

где σ_{12} — сечение поглощения; σ_{21} — сечение вынужденного излучения; F — плотность потока фотонов в падающей волне.

Время жизни фотонов на данном уровне составляет $\tau_{12} = 1/W_{12}$.

Скоростные уравнения для поглощения, спонтанного и вынужденного излучения имеют вид:

$$\frac{dN_1}{dt} = -W_{12}N_1; \quad \left(\frac{dN_2}{dt} \right)_{\text{сп}} = -A_{21}N_2; \quad \left(\frac{dN_2}{dt} \right)_{\text{вын}} = -W_{21}N_2, \quad (3)$$

где A_{21} — вероятность спонтанного излучения (коэффициент Эйнштейна).

3. Сечение усиления и закон Бугера–Ламберта–Бера

Сечение усиления (поглощения) определяется выражением

$$\sigma = \frac{g_2}{g_1} \frac{\lambda^2}{2\pi\Delta\nu\tau_0} = h\nu \frac{2W_{12}}{c\tau\Delta g}, \quad (4)$$

где g_1, g_2 – статистические веса уровней; λ – длина волны излучения; $\Delta\nu$ – спектральная ширина перехода; τ_0 – время жизни уровня.

Изменение интенсивности излучения при прохождении через вещество описывается законом Бугер –Ламберта–Бера:

$$I = I_0 \exp(-\alpha d) = I_0 \exp[-\sigma(N_1 - N_2)d], \quad (5)$$

где I_0 – интенсивность падающего излучения; I – интенсивность после прохождения слоя толщиной d ; σ – сечение перехода.

4. Пороговое условие генерации

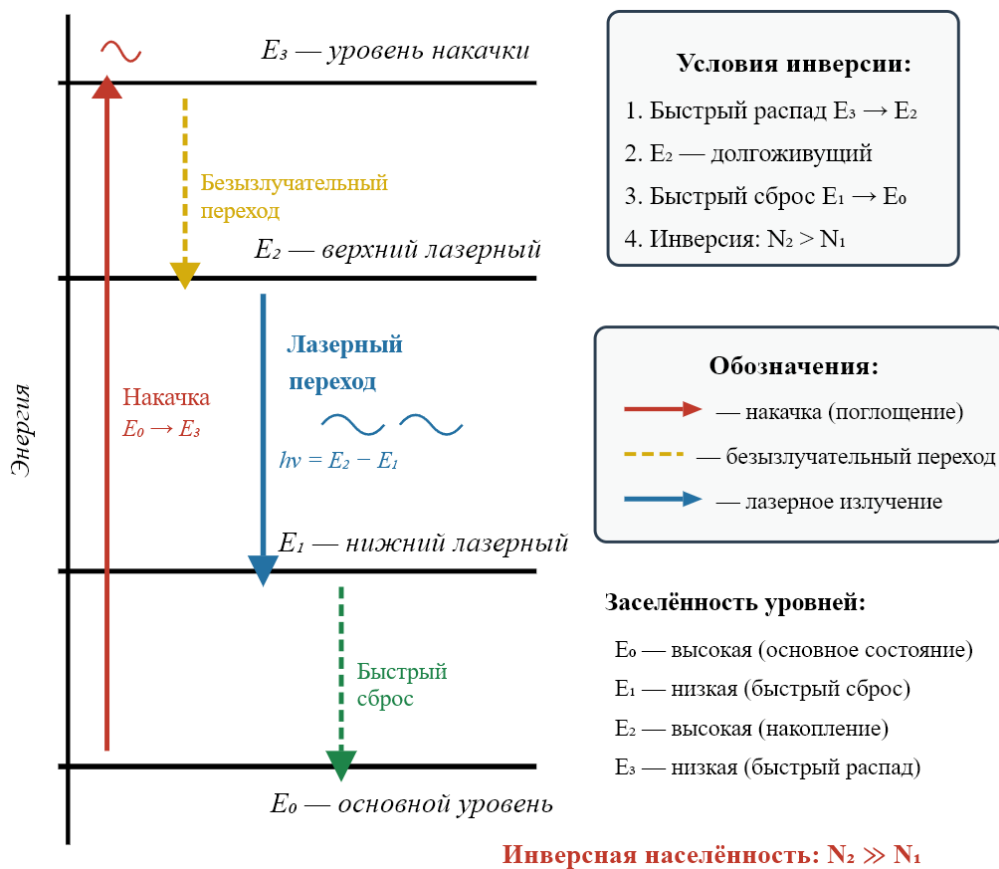


Рисунок 2.2. – Энергетическая диаграмма четырехуровневого лазера

Усиление излучения в резонаторе компенсирует потери, обусловленные коэффициентами отражения R и пропускания T зеркал. Пороговое условие усиления генерации имеет вид:

$$GRT > 1, \quad (6)$$

где $G = \exp[\sigma(N_2 - N_1)d]$ – усиление излучения за проход; $R = \sqrt{R_1 R_2}$; $T = \sqrt{T_1 T_2}$ – среднегеометрические значения коэффициентов отражения и пропускания зеркал.

Схема четырехуровневого лазера – см. рисунок 2.2.

Для критического значения разности населенностей получаем:

$$(N_2 - N_1)_{кр} \geq \frac{\ln(1/RT)}{\sigma d} \approx \frac{1-RT}{\sigma d}. \quad (7)$$

5. Оптический резонатор и моды излучения

В оптическом резонаторе интерференция падающей и отраженной волн приводит к образованию стоячей волны. Распределения поля представляют собой типы колебаний, или моды резонатора, обозначаемые TEM_{mnq} . Индексы m и n характеризуют распределение интенсивности в поперечном сечении, q – число максимумов напряженности поля на оси резонатора. Основной моде TEM_{00} соответствует гауссово распределение интенсивности.

Из условия резонанса следует, что на длине резонатора должно укладываться целое число полуволн:

$$L = n \cdot \lambda / 2.$$

где L — длина резонатора; $n = 1, 2, 3, \dots$ – целое число.

Частота аксиальной моды и расстояние между соседними модами определяются выражениями

$$\nu_n = \frac{c}{\lambda_n} = \frac{nc}{2L}, \quad (8)$$

$$\Delta\nu = \nu_{n+1} - \nu_n = \frac{c}{2L}. \quad (9)$$

6. Характеристики лазерного излучения

Основными свойствами лазерных пучков являются: монохроматичность, когерентность (пространственная и временная), направленность (малая расходимость), высокая спектральная яркость. Расходимость лазерного излучения

в дальней зоне определяется дифракционными эффектами и геометрией резонатора.

Способы накачки активных сред подразделяются на оптический, электрический, химический, газодинамический, накачку электронным пучком и рентгеновским излучением.

7. Распределение Больцмана и тепловое равновесие

Связь между населенностями энергетических уровней в условиях термодинамического равновесия задается выражением

$$\frac{N_2}{g_2} = \frac{N_1}{g_1} \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{kT}\right), \quad (10)$$

где $k = 1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; T – термодинамическая температура.

Практические задания

Задание 1

Построить график зависимости сечения излучения (поглощения) от длины волны излучаемого света для десяти точек в оптическом диапазоне (формула (4)).

Задание 2

Построить график зависимости сечения излучения (поглощения) от частоты излучаемого света для десяти точек в оптическом диапазоне.

Задание 3

Определить разность населенностей между верхним и нижним энергетическими уровнями атомной системы, если сечение вынужденного излучения составляет $\sigma_{21} = 10^{-11}$ см². Отношение плотности потока фотонов, прошедшего в среду на глубину $l = 60$ см, к плотности падающего потока фотонов $F(l)/F(0) = 0,5$.

Указание: $F_s = I_s \tau = \frac{h\nu}{2\sigma}; I = I_0 \exp[-\sigma(N_1 - N_2)d].$

Задание 4

Вычислить длину активной среды лазера, если сечение вынужденного излучения $\sigma_{21} = 2 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2$, критическая разность населенностей $(N_2 - N_1)_{кр} = 1,6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, отношение плотности потока фотонов $F(l) / F(0) = 0,1$.

Указание: $F_s = I_s \tau = \frac{h\nu}{2\sigma}; I = I_0 \exp[-\sigma(N_1 - N_2)d]$.

Задание 5

Учитывая, что неопределенность положения внешнего электрона составляет $a = 10^{-10} \text{ м}$, а M – масса атома, оценить порядок величины разности энергий между электронным (ΔE_e), колебательным (ΔE_v) и вращательным (ΔE_r) уровнями.

Указание: $\Delta E_e = \frac{\hbar^2}{m_e a^2}, \Delta E_v = \left(\frac{m_e}{M}\right)^{1/2} \Delta E_e, \Delta E_r = \left(\frac{m_e}{M}\right)^{1/2} \Delta E_v$.

Задание 6

Квантовый выход перехода $S_1 \rightarrow S_0$ в красителе родамин 6G равен $\phi = 0,87$, а соответствующее время жизни $\tau \approx 5 \text{ нс}$. Вычислить спонтанное τ_{cn} и безызлучательное $\tau_{безызл}$ время жизни уровня S_1 .

Указание: $\tau_{cn} = \tau / \phi; \tau_{безызл} = \tau / (1 - \phi)$.

Задание 7

В молекуле CO_2 , находящейся в тепловом равновесии при $T = 400 \text{ К}$, максимум населенности уровня 001 соответствует вращательному подуровню с квантовым числом $j = 21$. Найти для уровня 001 молекулы CO_2 вращательную постоянную B .

Указание: $2j + 1 = \sqrt{\frac{2kT}{B}}$.

Задание 8

Вычислить доплеровское уширение линии излучения He–Ne–лазера ($\lambda = 0,6328 \text{ мкм}$) при комнатной температуре ($T = 300 \text{ К}$) для атомов Ne.

Указание: $\Delta\nu = 2\nu_0 \left(\frac{2kT}{Mc^2} \ln 2\right)^{1/2}$, где M — молярная масса атома.

Задание 9

Плоский интерферометр Фабри–Перо имеет число Френеля $N_F = 1,8 \cdot 10^5$, а газовый лазер с плоскими зеркалами – $N_{F1} = 4$. Оценить отношение теряемой энергии за один проход интерферометра Фабри–Перо к потерям резонатора газового лазера.

Указание: $\gamma_{\text{диф}} \approx 1 / N_F$.

Задание 10

Неконфокальный резонатор образован двумя зеркалами с радиусами кривизны $R_1 = R_2 = R = 1,2$ м, расположенными на расстоянии $L = 0,6$ м друг от друга. Вычислить разность частот $\Delta\nu$ между модами $(q, 0, 0)$ и $(q, 1, 0)$.

Указание: $\nu_{q,m,n} = \frac{c}{2L} \left[q + \frac{1}{\pi} (m + n + 1) \arccos \sqrt{g_1 g_2} \right]$, где $g_i = 1 - L / R_i$.

Задание 11

Для получения одномодового режима работы YAG:Nd³⁺–лазера ($\lambda = 1,064$ мкм) в резонатор длиной $L = 70$ см помещен стеклянный эталон Фабри–Перо с показателем преломления $n = 1,5$. Определить толщину эталона, установленного по нормали к оптической оси резонатора.

Указание: $m\lambda_{\text{max}} = 2nd \cos \Theta$.

Задание 12

Ширина профиля излучения аргон-ионного лазера примерно равна $\Delta\nu = 8$ ГГц. При использовании внутри резонатора стеклянного эталона Фабри–Перо ($n = 1,5$) с областью дисперсии $\delta\nu = 10$ ГГц можно получить одномодовый режим. Вычислить резкость $\mathcal{F}$ эталона, если коэффициент отражения зеркал $R = 0,87$, и его толщину ($d = 500$ мкм).

Указание: $\Delta\nu = \delta\nu / \mathcal{F}$; $\mathcal{F} = \pi R^{1/2} / (1 - R)$; $\delta\nu = c / (2nd)$.

Отчет по работе

По результатам выполненных измерений составить отчет по выполненной работе. На титульном листе отчета указать название лабораторной работы, ФИО исполнителей, номер группы и дату выполнения. Содержание отчета: привести краткую теорию; выполнение заданий представить подробно; расписать вычисления с переводом всех величин в СИ; построить графики в линейном масштабе с указанием масштаба, величин и единиц измерения для каждой из осей.

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные компоненты лазера и охарактеризуйте назначение каждого из них.
2. Почему в двухуровневой системе невозможно создать инверсию населенностей?
3. Сформулируйте постулаты Бора. Какая связь существует между энергией перехода и частотой излучения?
4. Дайте определение сечения вынужденного излучения. От каких параметров активной среды оно зависит?
5. Сформулируйте закон Бугера–Ламберта–Бера применительно к активной лазерной среде.
6. Запишите пороговое условие генерации лазера. Какие физические величины определяют порог генерации?
7. Что такое моды оптического резонатора? Поясните обозначение TEM_{mnq} .
8. Как определяется расстояние между соседними продольными модами резонатора?
9. Какие способы накачки активных сред вам известны?
10. В чем заключается физическая природа доплеровского уширения спектральной линии?
11. Сформулируйте условие устойчивости оптического резонатора.

Список использованной литературы

1. Айрапетян, В. С. Описание практических работ по дисциплине «Физика лазеров» : учебно-методическое пособие / В. С. Айрапетян. — Новосибирск : СГГА, [б. г.]. — Текст электронный.
2. Звелто, О. Принципы лазеров : [пер. с англ.] / О. Звелто. — 4-е изд. — СПб. : Лань, 2008. — 720 с.
3. Мэйтленд, А. Введение в физику лазеров / А. Мэйтленд, М. Данн. — М. : Наука, 1978. — 408 с.
4. Тарасов, Л. В. Физика процессов в генераторах когерентного оптического излучения / Л. В. Тарасов. — М. : Радио и связь, 1981. — 440 с.

Лабораторная работа 3

ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДИМОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА

Цель работы

Целью настоящей работы является ознакомление с существующими представлениями об угловом распределении интенсивности монохроматического и немонхроматического светового пучка в дальней зоне, а также приобретение практических навыков экспериментального измерения ширины распределения интенсивности в дальней зоне, представляющей собой угловую расходимость светового поля.

Теоретическая часть

1. Свойства лазерного излучения

Основными свойствами лазерных пучков являются: спектральная ширина (модовая структура), монохроматичность, когерентность (пространственная и временная), расходимость и яркость (выходная мощность). В настоящей работе основное внимание уделяется физическому процессу расходимости лазерного излучения в дальней зоне.

2. Расходимость лазерного излучения

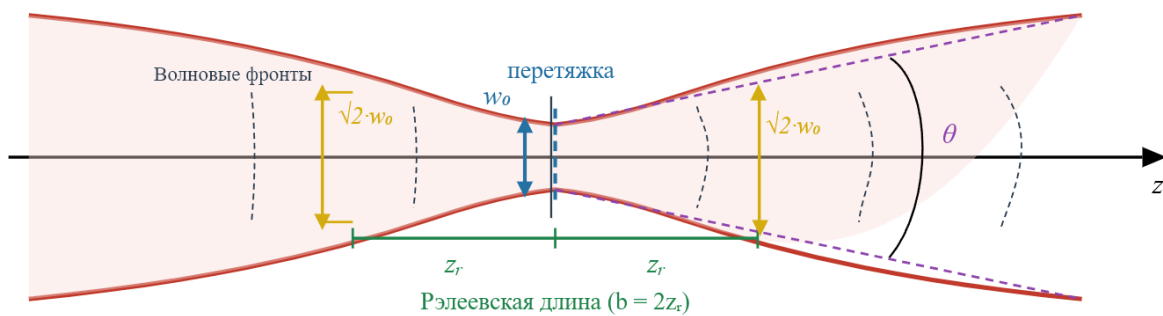
Угловая расходимость лазерного излучения представляет собой величину потока излучения, приходящуюся на единицу телесного угла, т.е. угловое распределение интенсивности излучения в дальней зоне. Спектральная ширина распределения интенсивности в дальней зоне является угловой расходимостью светового пучка $\Delta\theta$. На практике применяется понятие «расходимость по уровню 0,5 интенсивности» – спектральная ширина диапазона углов, в котором энергия излучения составляет не менее половины максимального значения. Это угловой диаметр круга в дальней зоне, охватывающий половину всего потока излучения (рисунки 3.1 и 3.2).

Для гауссова пучка, размер которого в перетяжке устойчивого резонатора со сферическими зеркалами равен w_0 , а на расстоянии z от перетяжки пучок имеет размер w и радиус кривизны волновой поверхности R , из теории дифракции получены следующие выражения:

$$w(z) = w_0 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2} \right)^2 \right]^{1/2},$$

$$R(z) = z \left[1 + \left(\frac{\pi w_0^2}{\lambda z} \right)^2 \right].$$

$\theta = \lambda / (\pi \cdot w_0)$ — расходимость гауссова пучка



— огнибающая пучка — перетяжка w_0 — асимптоты (угол θ)

Рисунок 3.1. – Продольное сечение гауссова пучка и его основные параметры

В дальней зоне, т.е. при условии $\lambda z / (\pi w_0^2) \gg 1$, получаем $w \approx \lambda z / (\pi w_0)$ и $R \approx z$. Это означает, что диаметр пучка и радиус кривизны сферической волны линейно возрастают с увеличением расстояния. Расходимость гауссова пучка определяется выражением

$$\theta_d = \frac{w}{z} = \frac{\lambda}{\pi w_0}.$$

Расчеты показывают, что расходимость гауссова пучка оказывается в два раза меньше расходимости плоского пучка.

В общем случае расходимость пространственно-когерентной волны вычисляется как

$$\theta_d = \beta \frac{\lambda}{D},$$

где D – диаметр пучка; β – числовой коэффициент порядка единицы.

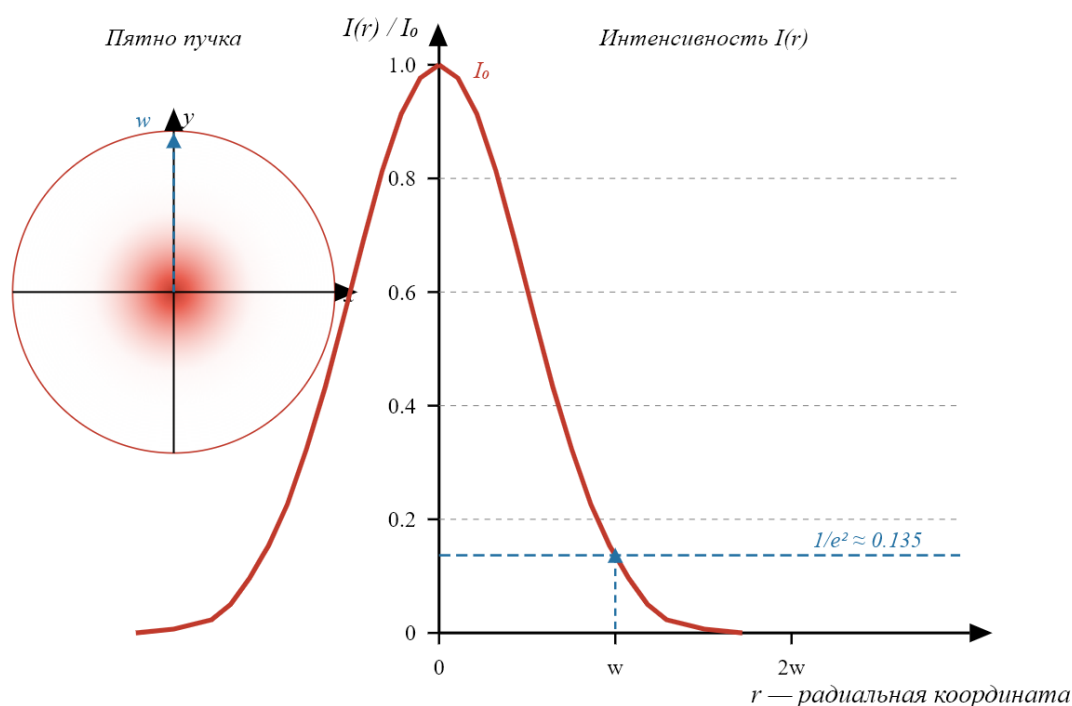
3. Параметр качества пучка

В реальном источнике излучения присутствуют отклонения от идеального гауссова распределения, обусловленные дифракционными ограничениями. Для количественной оценки степени близости реального пучка к гауссову вводится специальный параметр – фактор качества пучка M^2 . Гауссово распределение интенсивности симметрично убывает по мере удаления от центра пятна и описывается как

$$I(r, z) = I_0 \left(\frac{w_0}{w(z)} \right)^2 \exp \left(-\frac{2r^2}{w^2(z)} \right),$$

где I_0 – пиковая интенсивность в центре пучка; r – радиальное расстояние от оси; $w(z)$ – радиус лазерного пучка по уровню интенсивности $1/e^2$ (приблизительно 13,5%) от I_0 .

Перетяжкой пучка называется минимальный диаметр пучка, интенсивность в пределах которого составляет не ниже 13,5% максимального значения.



$$I(r) = I_0 \cdot \exp(-2r^2 / w^2)$$

w — радиус пучка по уровню $1/e^2$ (~13.5% от I_0); при $r = w$ интенсивность падает в $e^2 \approx 7.4$ раза

Рисунок 3.2. – Распределение интенсивности в поперечном сечении гауссова пучка

4. Экспериментальное измерение расходимости

Анализ приведенных выше соотношений показывает, что понятие дальней зоны требует, как правило, значительного удаления от лазерного источника. Так, при длине волны $\lambda = 1$ мкм и диаметре лазерного пучка 5–10 см дальняя зона формируется на расстоянии порядка нескольких километров. Однако экспериментальное измерение расходимости возможно и в непосредственной близости от источника излучения.

Одним из наиболее распространенных способов измерения является способ с применением квадратичного фазового корректора, простейшим устройством которого служит тонкая линза со сферическими поверхностями ($f > 0$). При прохождении лазерного излучения через тонкую линзу распределение амплитуды не изменяется, меняется только кривизна волнового фронта. Если источник находится в фокусе линзы, она преобразует сферический волновой фронт в плоский. Распределение интенсивности после тонкой линзы подобно распределению интенсивности излучения в дальней зоне, а расходимость излучения вычисляется как отношение диаметра пучка в фокальной плоскости d к фокусному расстоянию линзы f .

В настоящей работе рассмотрен другой способ измерения расходимости. Вследствие дифракции на выходном зеркале резонатора происходит увеличение диаметра лазерного пучка, характеризуемого углом расходимости θ_d (рисунок 3.3).

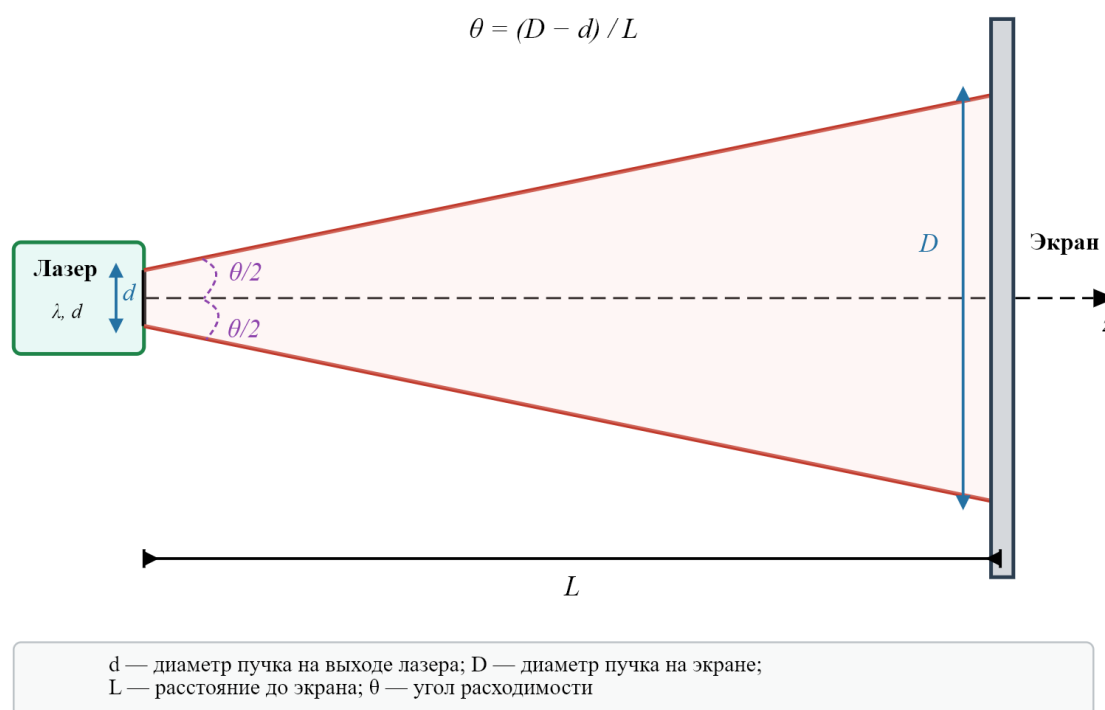


Рисунок 3.3. – Геометрическая схема
для определения расходимости лазерного пучка

Из простых геометрических построений, измеряя диаметр d пучка непосредственно перед лазером, диаметр D пучка в дальней зоне и расстояние L между лазером и экраном, можно получить расчетную формулу расходимости лазерного пучка для малых углов:

$$\operatorname{tg}(\theta / 2) \approx \sin(\theta / 2) \approx \frac{\theta}{2} = \frac{D-d}{2L},$$

откуда:

$$\theta = \frac{D-d}{L}.$$

5. Дифракция света на щели и дифракционной решетке

При падении параллельного пучка монохроматического света нормально на непрозрачный экран с длинной узкой щелью шириной a все точки щели становятся точечными источниками когерентных волн. Оптическая разность хода между двумя крайними лучами равна $\Delta = a \sin \varphi$ (рисунок 3.4).

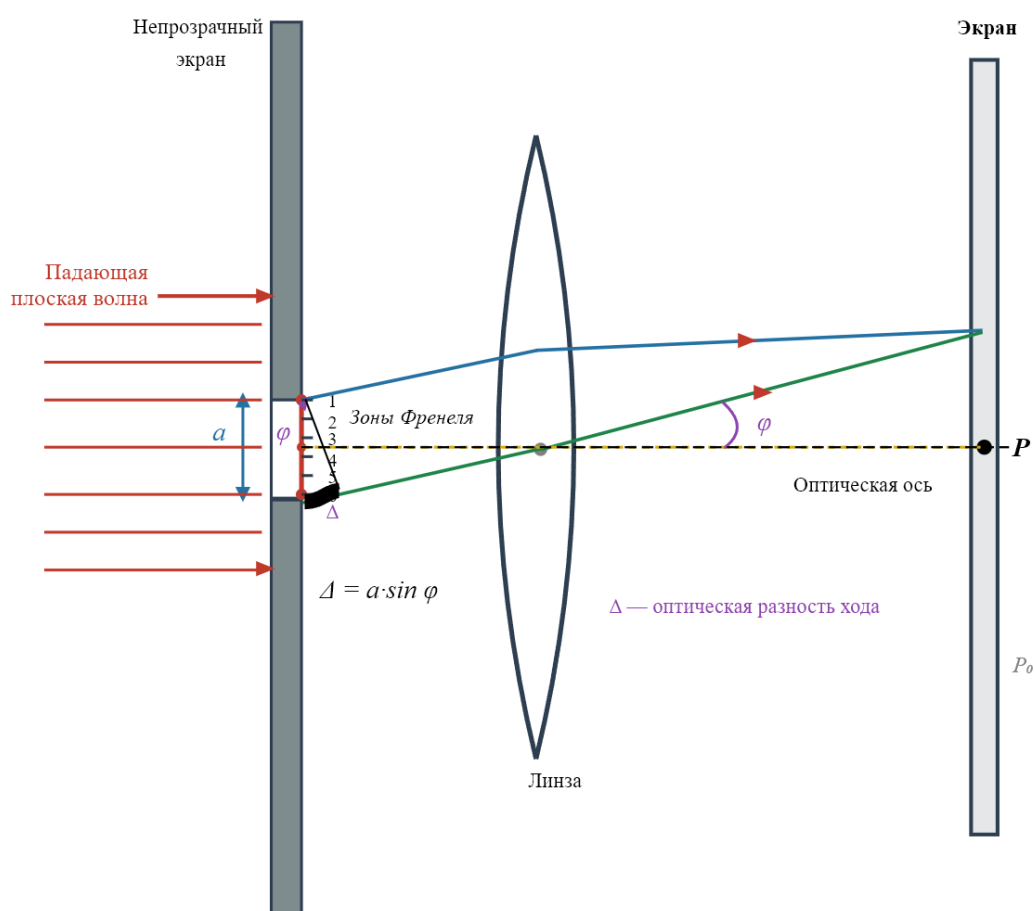


Рисунок 3.4. – Дифракция на одной щели:
разность хода и зоны Френеля

Если $\Delta = a \sin \varphi = \pm 2k \frac{\lambda}{2}$ ($k=1,2,\dots$), фронт световой волны в пределах щели разбивается на четное число зон Френеля, и лучи от соседних зон взаимно гасят друг друга – это условие минимума интенсивности.

Если $\Delta = a \sin \varphi = \pm (2k+1) \frac{\lambda}{2}$, поверхность фронта разбивается на нечетное число зон Френеля, и действие одной зоны остается не скомпенсированным – это условие максимума интенсивности для дифракции от одной щели.

Дифракционная решетка представляет собой ряд параллельных щелей одинаковой ширины a , разделенных непрозрачными промежутками шириной b . Величина $d = a + b$ называется периодом или постоянной дифракционной решетки (рисунок 3.5). Условие главных максимумов интенсивности для дифракционной решетки имеет вид:

$$d \sin \varphi = \pm m \lambda \quad (m=0,1,2,\dots).$$

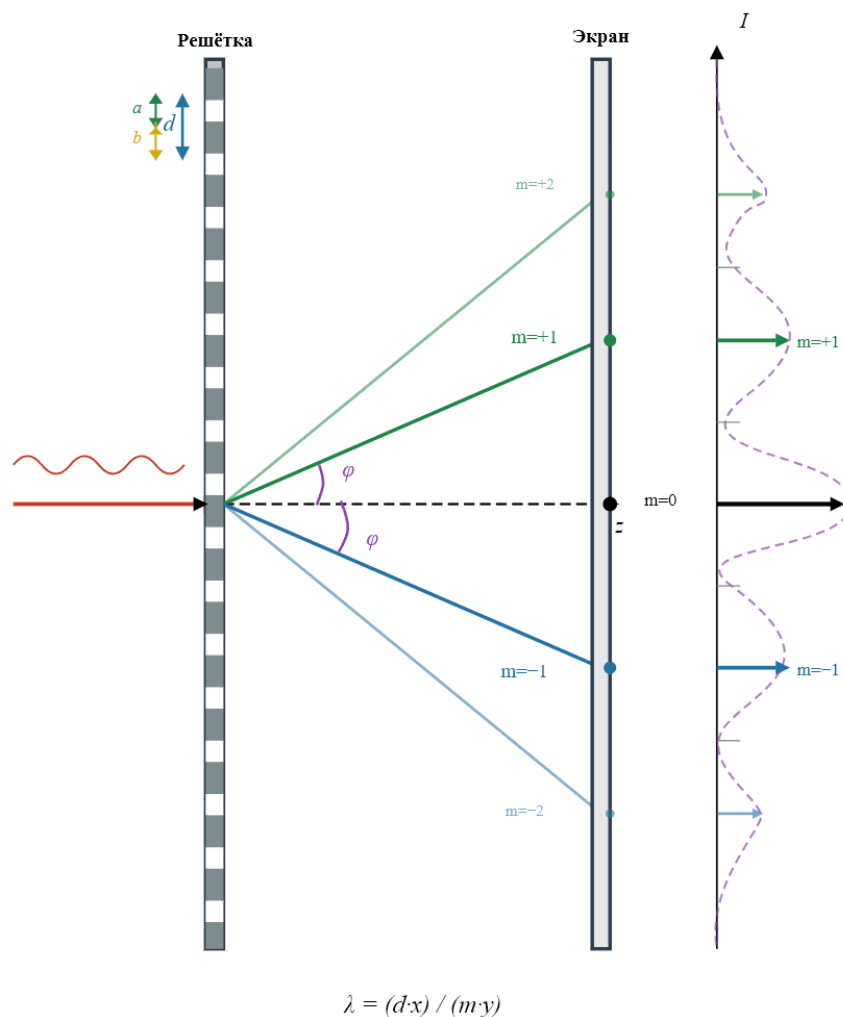


Рисунок 3.5. – Дифракционная решетка и распределение интенсивности света на экране

С помощью дифракционной решетки с известным периодом d можно определить длину световой волны λ , воспользовавшись условием максимума для малых углов:

$$\lambda = \frac{d}{m} \sin \varphi \approx \frac{d}{m} \operatorname{tg} \varphi = \frac{dx}{my},$$

где x – расстояние от центрального максимума ($m=0$) до максимума m -го порядка; y – расстояние от решетки до экрана.

Практические задания

Задание 1. Определение длины волны лазерного излучения при помощи дифракционной решетки

С помощью дифракционной решетки с известным периодом d определить длину волны излучения лазера λ . Для этого необходимо измерить расстояние x от центрального максимума ($m=0$) до максимума первого порядка ($m=1$) и расстояние y от решетки до экрана. Расчет выполняется по формуле

$$\lambda = \frac{d \cdot x}{m \cdot y}.$$

Измерения и расчеты повторить для красного и зеленого лазеров.

Задание 2. Определение угла расходимости лазерного излучения

1. Собрать экспериментальную установку согласно оптической схеме, приведенной в описании работы.

2. Установить диафрагму непосредственно перед лазером, экран – на расстоянии 30–50 м от лазера так, чтобы плоскость экрана была перпендикулярна пучку света.

3. Измерить штангенциркулем диаметр отверстия диафрагмы d и диаметр пучка на экране D в дальней зоне. Рулеткой измерить расстояние L между лазером и экраном. Измерения провести не менее трех раз.

4. Результаты измерений занести в таблицу. Вычислить значение угла расходимости θ по формуле

$$\theta = \frac{D-d}{L}.$$

Вычислить среднее значение угла расходимости и оценить абсолютную и относительную погрешности измерений.

5. Установить диафрагму с другим диаметром d отверстия и повторить измерения и вычисления для лазера с другой длиной волны λ .

Задание 3 (расчетно-графическое)

1. Построить график зависимости расходимости гауссова пучка θ_d от размера лазерного пучка в перетяжке w_0 устойчивого резонатора.

2. Построить график зависимости радиуса кривизны волновой поверхности лазерного пучка $R(z)$ от расстояния z при фиксированном размере перетяжки w_0 .

3. Построить график зависимости ширины лазерного пучка $w(z)$ от расстояния z при фиксированном размере перетяжки w_0 .

4. Построить график зависимости угла дифракции φ дифракционной решетки от длины волны λ падающего на решетку излучения для первого дифракционного максимума ($m=1$).

Отчет по работе

По результатам выполненных измерений составить отчет по выполненной работе. На титульном листе отчета указать название лабораторной работы, ФИО исполнителей, номер группы и дату выполнения. Содержание отчета: привести краткую теорию; выполнение заданий представить подробно; расписать вычисления с переводом всех величин в СИ; построить графики в линейном масштабе с указанием масштаба, величин и единиц измерения для каждой из осей.

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные свойства лазерного излучения.
2. Объясните физическую причину возникновения расходимости лазерного излучения.
3. Как определяется дифракционная расходимость монохроматического пучка?
4. Как связана направленность лазерного пучка с его пространственной когерентностью?
5. Докажите, что при одинаковых диаметрах расходимость гауссова пучка в два раза меньше расходимости плоского пучка.

Список использованной литературы

1. Савельев, И. В. Курс физики : учеб. пособие для вузов. В 3 т. / И. В. Савельев. – 9-е изд., стер. – СПб. : Лань, 2026. – Т. 2 : Электричество. Колебания и волны. Волновая оптика. – 446 с.
2. Сивухин, Д. В. Общий курс физики : учеб. пособие для вузов. В 5 т. / Д. В. Сивухин. – 3-е изд., стереот. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2005. – Т. IV : Оптика. – 792 с.

Лабораторная работа 4

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Цель работы

Целью настоящей работы является исследование поляризации лазерного излучения, экспериментальная проверка закона Малюса, получение и анализ света с круговой и эллиптической поляризацией с использованием излучения полупроводникового лазера, а также определение степени поляризации лазерного излучения и показателя преломления стекла с помощью закона Брюстера.

Теоретическая часть

1. Поляризация электромагнитных волн

Электромагнитные волны являются поперечными, вследствие чего свет обладает свойством поляризации. Поляризованными называются световые волны, в которых колебания вектора напряженности электрического поля $\vec{E}$ каким-либо образом упорядочены. Волны называются линейно поляризованными или плоскополяризованными, если колебания вектора $\vec{E}$ (и, соответственно, $\vec{H}$) происходят в одной плоскости, проходящей через луч.

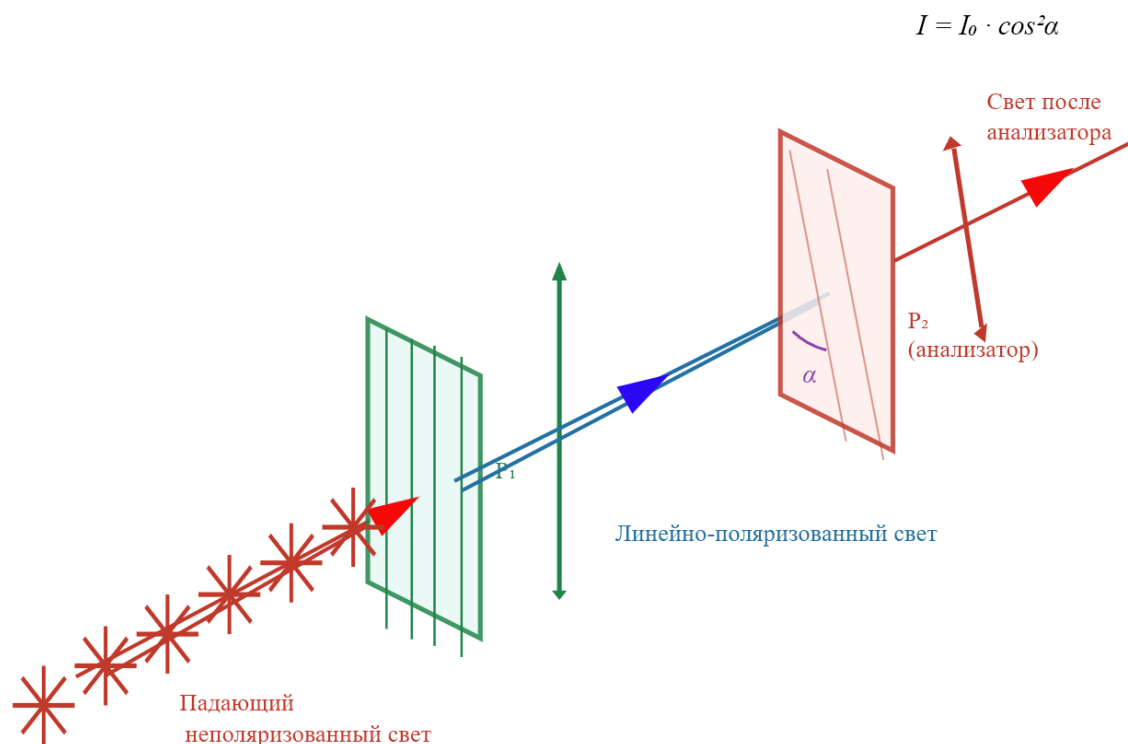


Рисунок 4.1. – Прохождение света через поляризаторы

Если вектор $\vec{E}$ совершает колебания, при которых проекция конца вектора $\vec{E}$ на любую плоскость, перпендикулярную лучу, описывает эллипс или круг, то такой свет называют эллиптически или циркулярно поляризованным соответственно. Прохождение света сквозь поляризаторы – см. рисунок 4.1.

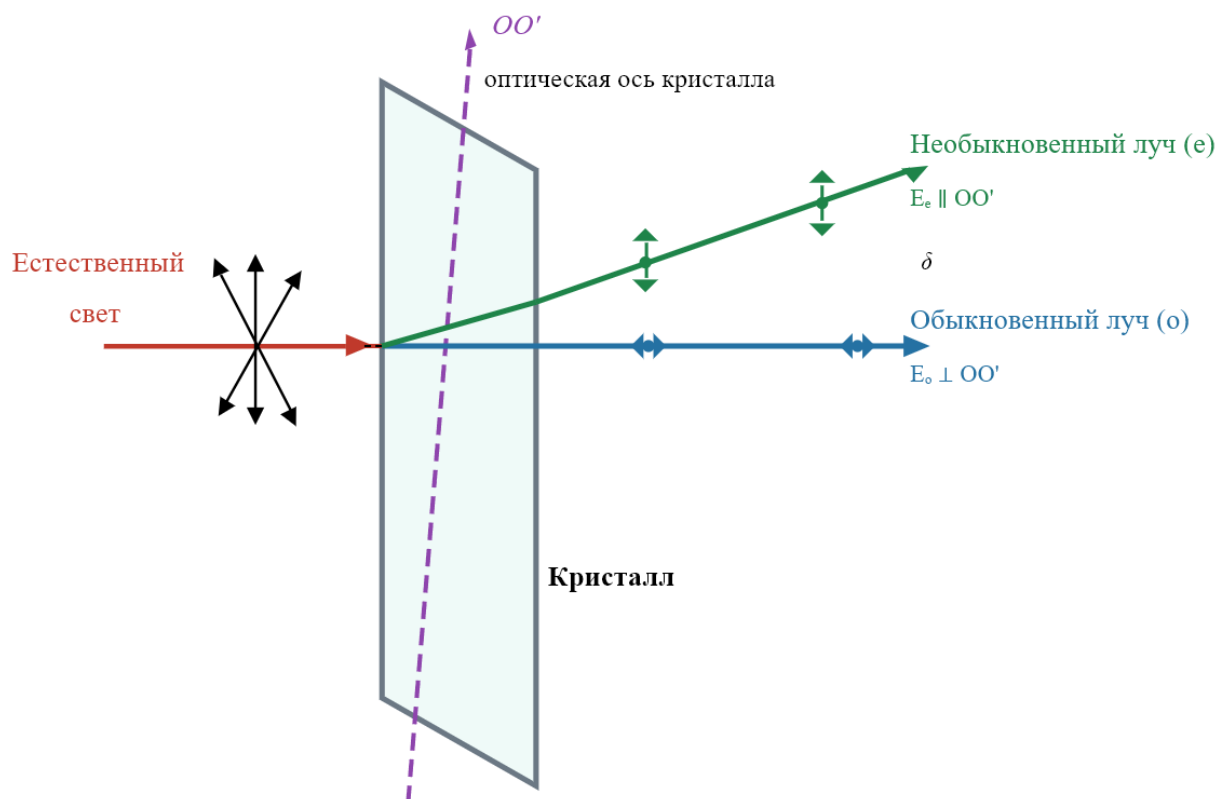
Свет, испускаемый отдельным излучателем (атомом или молекулой), всегда поляризован. Любой реальный источник света состоит из большого числа излучателей, поляризация излучения которых случайна, поэтому свет от такого источника имеет случайное распределение вектора $\vec{E}$ в пространстве и во времени. Такой свет называют неполяризованным или естественным. На практике часто имеют дело с частично поляризованным излучением, представляющим смесь поляризованного и неполяризованного света.

2. Двойное лучепреломление и поляризационные приборы

При прохождении света через анизотропные кристаллы наблюдается явление двойного лучепреломления. Во всех кристаллах существует хотя бы одно направление, для которого показатели преломления обыкновенного и необыкновенного лучей совпадают ($n_o = n_e$). Это направление называют оптической осью кристалла. Если такое направление одно, кристалл является одноосным.

Обыкновенный и необыкновенный лучи поляризованы во взаимно перпендикулярных плоскостях (рисунок 4.2). В обыкновенном луче вектор $\vec{E}$ лежит в плоскости, перпендикулярной оптической оси, а в необыкновенном луче колебания вектора $\vec{E}$ происходят в плоскости, содержащей оптическую ось и рассматриваемый луч. Таким образом, для обыкновенного и необыкновенного лучей различны как показатели преломления ($n_o \neq n_e$), так и направления колебаний вектора $\vec{E}$ ($\vec{E}_o \perp \vec{E}_e$).

Одноосные кристаллы используют либо в качестве поляризатора для получения плоскополяризованного света, либо в качестве анализатора для анализа поляризованного излучения. Поляризационные приборы подразделяются на два типа: составные призмы, в которых один из лучей уводится в сторону за счет преломления и отражения на гранях (например, призма Николя, интерференционный поляризатор), и поляризаторы, действие которых основано на явлении дихроизма – различного поглощения необыкновенного и обыкновенного лучей (например, поляроид).



Обозначения:

- Обыкновенный луч (o): не преломляется, $E_o \perp$ оптической оси
- Необыкновенный луч (e): отклоняется, $E_e \parallel$ оптической оси

Рисунок 4.2. – Двойное лучепреломление в одноосном кристалле при нормальном падении

3. Закон Малюса

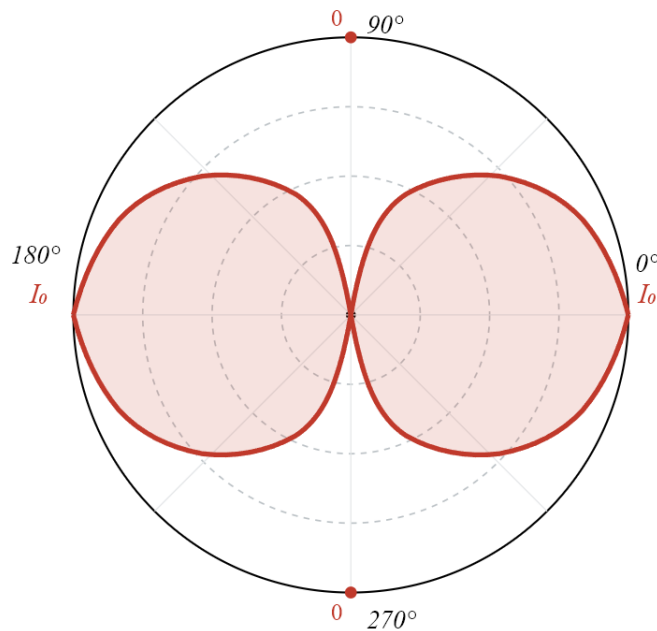
Если плоскость колебаний вектора $\vec{E}$ в падающей световой волне составляет угол α с плоскостью поляризатора (осью PP), то амплитуда колебаний, пропускаемых поляризатором, определяется выражением

$$E_{\parallel} = E \cos \alpha.$$

Интенсивность света пропорциональна квадрату амплитуды, поэтому

$$I_{\parallel} = I \cos^2 \alpha.$$

Данное соотношение называется законом Малюса (рисунок 4.3).



$$I(\alpha) = I_0 \cdot \cos^2 \alpha$$

Рисунок 4.3. – Закон Малюса:
зависимость интенсивности от угла в полярных координатах

4. Прохождение плоскополяризованного света через анизотропный кристалл

Пусть световая волна падает нормально на плоскопараллельную кристаллическую пластинку толщиной d , вырезанную параллельно оптической оси. Если направление колебаний вектора $\vec{E}$ в падающей волне составляет угол β с плоскостью главного сечения, то амплитуды колебаний вектора $\vec{E}$ в обыкновенной и необыкновенной волнах будут:

$$E_o = E \sin \beta, \quad E_e = E \cos \beta.$$

Пройдя через пластинку толщиной d , обыкновенный и необыкновенный лучи приобретут оптическую разность хода $\Delta = (n_e - n_o)d$ и, соответственно, разность фаз φ :

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta = \frac{2\pi}{\lambda} (n_o - n_e) d.$$

Характер колебаний вектора $\vec{E}$ на выходе из кристаллической пластинки определяется как результат сложения взаимно перпендикулярных колебаний

векторов $\vec{E}_o$ и $\vec{E}_e$. Обозначив направления колебаний через оси x и y , получим:

$$E_x = E_o \cos \omega t, \quad E_y = E_e \cos(\omega t - \varphi).$$

Уравнение траектории, которую описывает конец вектора $\vec{E} = \vec{E}_x + \vec{E}_y$ в плоскости xy , имеет вид эллипса:

$$\frac{E_x^2}{E_o^2} + \frac{E_y^2}{E_e^2} - \frac{2E_x E_y}{E_o E_e} \cos \varphi = \sin^2 \varphi.$$

5. Пластинка в четверть волны

Если толщина кристаллической пластинки такова, что оптическая разность хода двух лучей составляет $\lambda / 4$:

$$(n_o - n_e)d = \frac{\lambda}{4}, \quad \varphi = \frac{\pi}{2},$$

то такую пластинку называют пластинкой в четверть волны. Уравнение траектории в этом случае принимает вид:

$$\frac{E_x^2}{E_o^2} + \frac{E_y^2}{E_e^2} = 1$$

и свет становится эллиптически поляризованным, причем одна из осей эллипса совпадает с направлением оптической оси пластинки.

При $\beta = \pi / 4$ имеем $E_o = E_e$, и эллипс вырождается в окружность – свет поляризован по кругу. При $\beta = 0, \pi / 2, \pi, 3\pi / 2, \dots$ эллипс вырождается в прямую, и излучение остается линейно поляризованным.

Интенсивность света, прошедшего последовательно пластинку $\lambda / 4$ и поляризатор, определяется соотношением

$$I = E_e^2 \cos^2 \alpha + E_o^2 \sin^2 \alpha,$$

где α – угол между плоскостью поляризатора и оптической осью пластинки $\lambda / 4$. Толщина пластинки $\lambda / 4$ рассчитывается по формуле

$$d = \frac{\lambda}{4(n_o - n_e)}.$$

Практически используют более толстые пластинки, для которых оптическая разность хода составляет $\lambda/4 + k\lambda$ ($k=1,2,\dots$), при этом разность фаз равна $\pi/2 + 2\pi k$.

6. Степень поляризации

Степень поляризации лазерного излучения определяется выражением

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}},$$

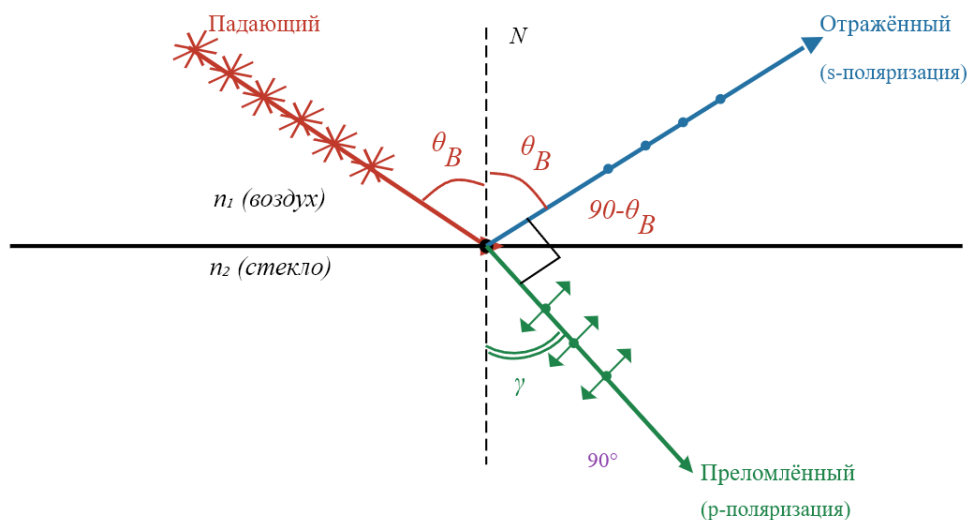
где $I_{\max}$ и $I_{\min}$ – максимальная и минимальная интенсивности света, прошедшего через анализатор, соответственно.

7. Закон Брюстера

При падении света на границу раздела двух диэлектриков под углом Брюстера θ_B отраженный луч полностью поляризован в плоскости, перпендикулярной плоскости падения (рисунок 4.4). Закон Брюстера имеет вид:

$$\operatorname{tg} \theta_B = n,$$

где n – относительный показатель преломления второй среды относительно первой.



$$\operatorname{tg} \theta_B = n_2 / n_1$$

Отражённый и преломлённый лучи взаимно перпендикулярны: $\theta_B + \gamma = 90^\circ$

- — колебания перпендикулярно плоскости рисунка (s-компонента)
- ↑ — колебания в плоскости рисунка (p-компонента)

Рисунок 4.4. – Закон Брюстера:
поляризация света при отражении и преломлении

Практические задания

Задание 1. Проверка закона Малюса

1. Включить полупроводниковый лазер (красный или зеленый).
2. Установить на оптическую скамью (рисунок 4.5) поляроид с лимбом и фотоприемник с микроамперметром. Добиться соосности лазерного луча, поляроида и входного отверстия фотоприемника.
3. Вращая поляроид вокруг оптической оси, определить значение угла, соответствующее максимальной величине электрического сигнала. Принять это значение за начало отсчета.
4. Измерить зависимость электрического сигнала от угла поворота поляроида через каждые 10° на протяжении 180° сначала в одном направлении (I_1), а затем в противоположном (I_2). Результаты занести в таблицу.
5. Построить на одном графике экспериментальную зависимость I_{cp} / I_{max} и теоретическую $\cos^2 \alpha$. Повторить измерения для двух полупроводниковых лазеров (красного и зеленого).

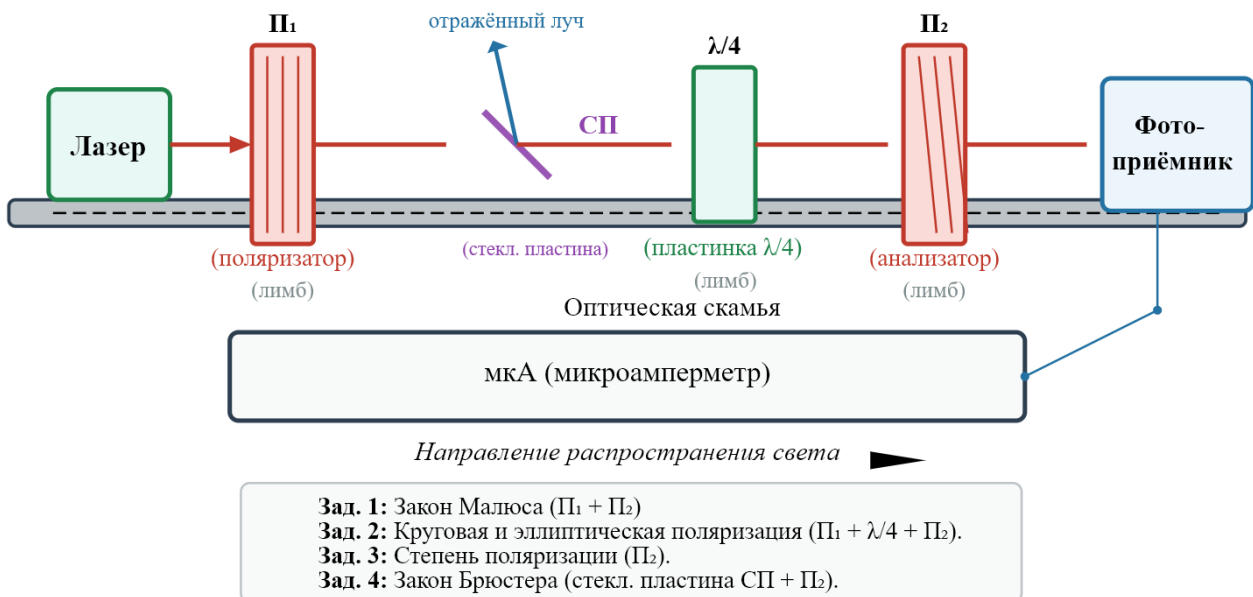


Рисунок 4.5. – Схема расположения элементов на оптической скамье

Задание 2. Получение и исследование света, поляризованного по кругу

1. Повернуть поляроид до минимальных показаний измерительного прибора и закрепить его в этом положении.
2. Перед поляроидом установить пластинку в четверть волны и, поворачивая ее на один полный оборот, найти значения четырех углов (с точностью $1-2^\circ$),

при которых интенсивность прошедшего через систему света минимальна. Записать значения углов.

3. Повернуть пластинку $\lambda/4$ относительно одного из найденных углов на 45° и закрепить ее в этом положении.

4. Провести анализ получившегося света: поворачивать поляроид через 10° на протяжении одного полного оборота и измерять сигнал. Результаты записать в таблицу.

5. Построить в полярных координатах график распределения интенсивности света.

Задание 3. Получение и исследование эллиптически поляризованного света

1. Изменить ориентацию пластинки $\lambda/4$ на 10° , 20° или 30° (по указанию преподавателя).

2. Для заданной ориентации пластинки провести анализ прошедшего света (аналогично п. 4 задания 2).

3. Построить в полярных координатах экспериментальный и теоретический графики распределения интенсивности света $I(\alpha)$. При построении считать, что $\alpha = 0$ соответствует $I_{\max}$.

4. Определив $E_e \sim I_{\max}$ и $E_o \sim I_{\min}$, вычислить значения $E_x = E_o \cos \omega t$ и $E_y = E_e \sin \omega t$ для различных значений $\theta = \omega t$ в интервале $0-360^\circ$, построить эллипс в координатах (x, y) $I_{\max}$ и $I_{\min}$.

5. Вычислить степень поляризации лазерного излучения по формуле:

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}.$$

6. Повторить измерения для красного и зеленого лазеров.

Задание 4. Определение показателя преломления стекла с помощью закона Брюстера

1. На пути лазерного луча установить оправу с лимбом, в которой закреплена стеклянная пластина.

2. Вращая лимб, добиться, чтобы отраженный от пластины луч был совмещен с падающим на нее лучом (отраженный луч должен возвращаться в лазер). Записать значение угла по лимбу, соответствующее начальному угловому отсчету.

3. Вращая лимб и связанную с ним стеклянную пластину, получить отраженный лазерный луч на потолке лаборатории. Найти такой угол падения, при котором интенсивность отраженного луча минимальна (или равна нулю). Записать соответствующее значение угла по лимбу.

4. Разность между начальным угловым отсчетом и значением при нулевой интенсивности отраженного луча равна углу Брюстера θ_B . Найти значение этого угла для данной стеклянной пластины и по закону Брюстера определить показатель преломления стекла как среднее значение из четырех измерений:

$$\operatorname{tg} \theta_B = n.$$

Задание 5. Расчетные задачи

Задача 1

Естественный свет падает на систему из двух поляроидов, плоскости пропускания которых повернуты на угол 30° относительно друг друга. После их прохождения свет отражается от зеркала и проходит систему в обратном направлении. Во сколько раз уменьшится интенсивность света, если в каждом из поляроидов дополнительно теряется 7% света?

Задача 2

Чему будет равна разность фаз обыкновенного и необыкновенного лучей зеленого света, прошедших в кристалле исландского шпата расстояние $l = 10$ мм? Показатели преломления для них известны.

Задача 3

Определить концентрацию неизвестного полисахарида в водном растворе. Трубка длиной 10 мм, заполненная данным раствором, поворачивает плоскость поляризации света на 2° , а трубка длиной 20 мм – на 4° .

Отчет по работе

По результатам выполненных измерений составить отчет по выполненной работе. На титульном листе отчета указать название лабораторной работы, ФИО исполнителей, номер группы и дату выполнения. Содержание отчета: привести краткую теорию; выполнение заданий представить подробно; расписать вычисления с переводом всех величин в СИ; построить графики в линейном масштабе с указанием масштаба, величин и единиц измерения для каждой из осей.

Контрольные вопросы

1. Что такое поляризованный свет? На каких физических явлениях основано получение линейно поляризованного света?
2. Что такое пластинка $\lambda / 4$? Что произойдет с линейно поляризованным светом при прохождении через пластинку $\lambda / 4$?
3. Как отличить с помощью поляризатора и пластинки $\lambda / 4$ естественный свет от света, поляризованного по кругу?
4. Что такое пластинка $\lambda / 2$? Дайте определение по аналогии с пластинкой в четверть волны. Что произойдет с линейно поляризованным светом при прохождении через пластинку $\lambda / 2$?

Список использованной литературы

1. Савельев, И. В. Курс физики : учеб. пособие для вузов. В 3 т. / И. В. Савельев. – 9-е изд., стер. – СПб. : Лань, 2026. – Т. 2 : Электричество. Колебания и волны. Волновая оптика. – 446 с.
2. Сивухин, Д. В. Общий курс физики : учеб. пособие для вузов. В 5 т. / Д. В. Сивухин. – 3-е изд., стереот. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2005. – Т. IV : Оптика. – 792 с.
3. Физика лазеров : учеб.-метод. пособие / под ред. Е. Н. Котликова. — СПб. : ГУАП, 2019. – 171 с.

Лабораторная работа 5 (расчетно-графическая) ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРИНЦИПОВ РАБОТЫ ЛАЗЕРНЫХ РЕЗОНАТОРОВ

Цель работы

Целью настоящей работы является изучение теории устройства лазерных резонаторов, особенностей их работы, параметров и характеристик. В ходе выполнения заданий обучающийся производит вычисления параметров резонатора, а также определяет геометрические характеристики генерируемого лазерного пучка для некоторых простейших случаев.

Теоретическая часть

1. Оптический резонатор. Волновое уравнение

Простейший оптический резонатор представляет собой систему из двух зеркал, расположенных друг против друга. Для описания распространения электромагнитной волны в пустом резонаторе используются уравнения Максвелла. В вакууме, при отсутствии зарядов и токов ($\rho = 0$, $\vec{j} = 0$), волновое уравнение для напряженности электрического поля имеет вид:

$$\nabla^2 \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0.$$

Решение, описывающее распространение волны вдоль оси z записывается как

$$\vec{E} = \frac{1}{2} A(r, z) e^{i\omega_0 t - ik_0 z}.$$

Параболическое приближение (приближение геометрической оптики) основано на предположении о медленном изменении амплитуды A на масштабах длины волны:

$$\left| \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} \right| \ll \left| k_0 \frac{\partial A}{\partial z} \right|.$$

Подстановка в волновое уравнение приводит к параболическому уравнению

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{i}{2k_0} \left(\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} \right) A = 0.$$

С помощью преобразования Фурье общее решение записывается через функцию Грина в свободном пространстве.

2. Распространение гауссова пучка

Параболическое уравнение имеет аналитическое решение для гауссова пучка, у которого зависимость амплитуды от поперечных координат задана функцией Гаусса:

$$A_0(r) = A_0 \exp\left(-\frac{r^2}{2\rho_0^2}\right).$$

Здесь ρ_0 – полуширина интенсивности по уровню $1/e$. Решение для гауссова пучка в свободном пространстве имеет вид:

$$A(r, z) = \frac{A_0}{1 + iz/z_R} \exp\left(-\frac{r^2}{w_0^2(1 + iz/z_R)}\right),$$

где $z_R = \pi w_0^2 / \lambda$ – рэлеевская длина; w_0 – радиус перетяжки пучка.

Размер пучка и радиус кривизны волнового фронта зависят от расстояния z от перетяжки:

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2},$$

$$R(z) = z \left[1 + \left(\frac{z_R}{z}\right)^2 \right].$$

При $z=0$ фронт волны плоский ($R \rightarrow \infty$). При $z=z_R$ радиус пучка увеличивается в $\sqrt{2}$ раз, а интенсивность в перетяжке падает в два раза. В пределах рэлеевской длины интенсивность изменяется слабо, и волновой фронт можно считать приблизительно плоским.

3. Моды пустого резонатора

Для простой модели резонатора в виде прямоугольного параллелепипеда размерами $a \times b \times c$ с идеально отражающими стенками устойчивые моды описываются стоячими волнами (рисунок 5.1):

$$U(x,y,z) = U_0 \sin(k_x x) \sin(k_y y) \sin(k_z z),$$

$$k_x = \frac{\pi l}{a}, \quad k_y = \frac{\pi m}{b}, \quad k_z = \frac{\pi n}{c}, \quad l, m, n \in \mathbb{Z}.$$

Длина волны собственной моды резонатора:

$$\lambda_{lmn} = \frac{2}{\sqrt{\frac{l^2}{a^2} + \frac{m^2}{b^2} + \frac{n^2}{c^2}}}.$$

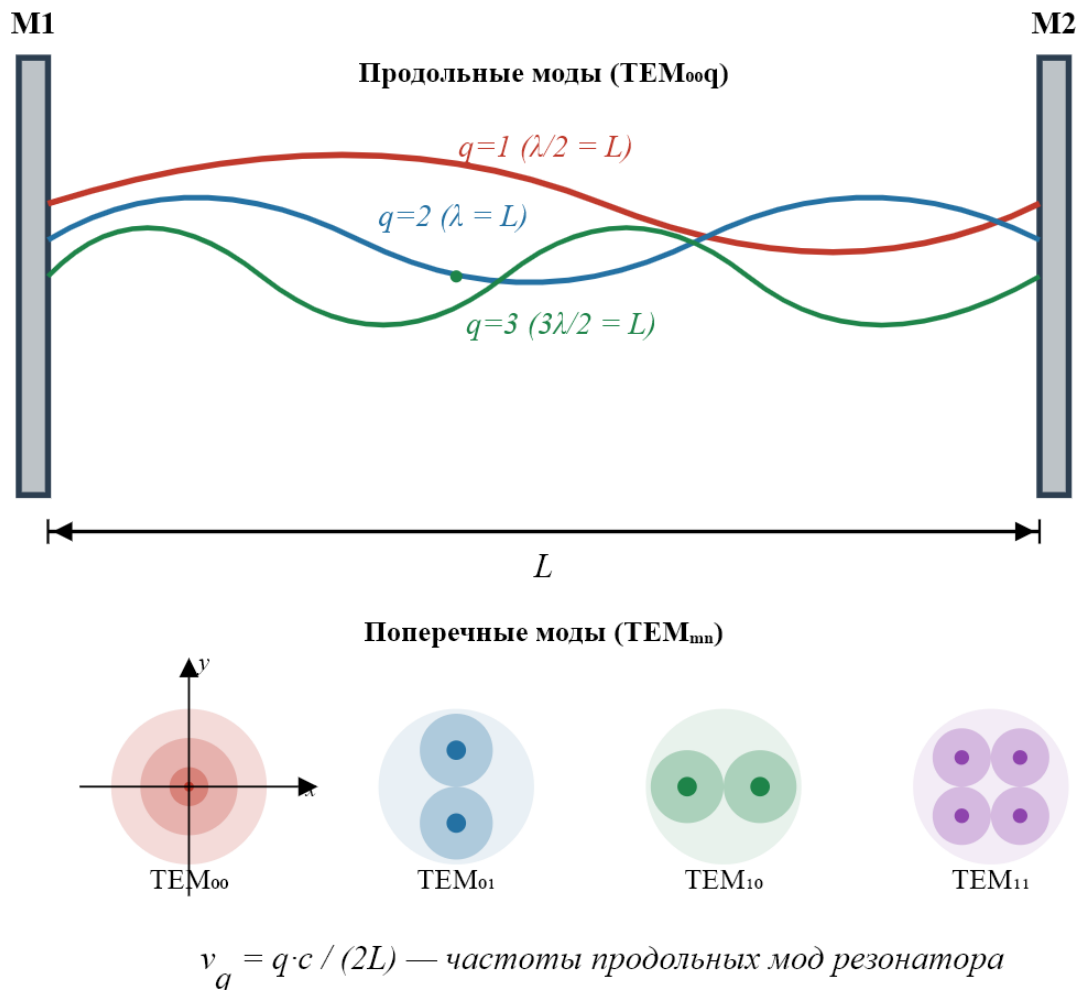


Рисунок 5.1. – Продольные и поперечные моды пустого оптического резонатора

Продольные моды определяются индексом n , поперечные – индексами l и m . В реальных резонаторах с зеркалами только на оси z граничные условия на остальных осях заменяются требованием стремления поля к нулю на бесконечности. Профиль моды (см. рисунок 5.1) определяется симметрией резонатора: для круглых зеркал распределение интенсивности описывается полиномами

Лагерра, для квадратных – полиномами Эрмита. Основная мода ($l=0, m=0$) всегда является гауссовым пучком.

4. Расходимость и устойчивость резонатора

Угловая расходимость пучка оценивается как $\Delta\theta \sim \lambda/D$, где D – диаметр пучка. Для резонатора из двух плоских зеркал размером a , расположенных на расстоянии L , максимальное число проходов, при котором диаметр пучка не превышает размер зеркал, составляет:

$$N_{max} = \frac{ad}{2L\lambda},$$

где d – начальный диаметр пучка. Для типичных параметров ($L=1$ м, $a=1$ см, $d=1$ мм) получаем $N_{max} \approx 5$, что меньше необходимых 16 проходов для значительного усиления в твердотельных лазерах. Это означает, что плоский резонатор неустойчив. Гауссов пучок расходится медленнее пучков другого профиля.

5. Метод ABCD-матриц

Метод ABCD-матриц основан на геометрической оптике и позволяет описывать распространение луча через оптическую систему. Для параксиальных лучей преобразование радиус-вектора r и угла r' задается матрицей

$$\begin{pmatrix} r_2 \\ r_2' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 \\ r_1' \end{pmatrix}.$$

Для свободного пространства длиной L :

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Для тонкой линзы с фокусным расстоянием f :

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix}.$$

Последовательное применение матриц позволяет описать сложную оптическую систему. Метод Когельника и Ли обобщает данный подход на распространение гауссовых пучков: комплексный параметр пучка $q(z)$ преобразуется по закону

$$q_2 = \frac{Aq_1 + B}{Cq_1 + D},$$

где $\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{R(z)} - i \frac{\lambda}{\pi w^2(z)}.$

Детальные пояснения можно увидеть на рисунке 5.2.

Общая форма преобразования:

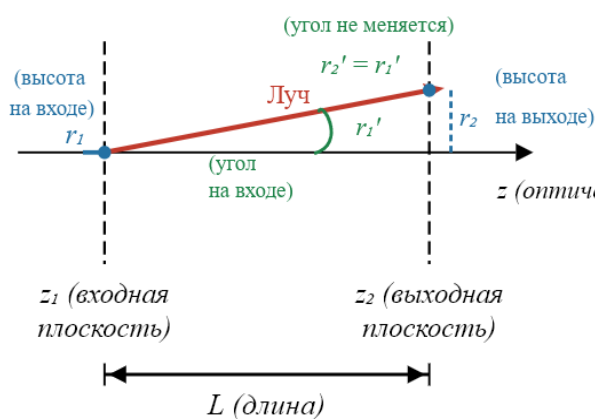
а) Свободное пространство

$$\begin{bmatrix} r_2 \\ r_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_1 \\ r_1' \end{bmatrix}$$

б) Тонкая линза

$$r_2 = A r_1 + B r_1'$$

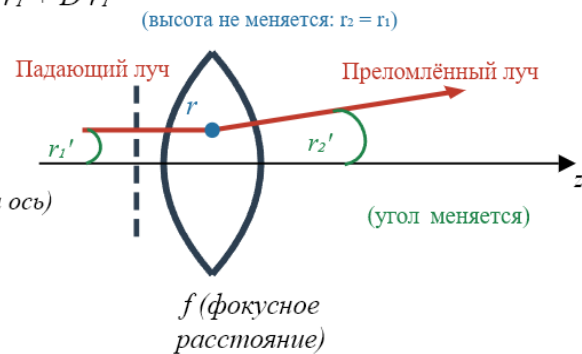
$$r_2' = C r_1 + D r_1'$$



$$r_2 = r_1 + L r_1'$$

$$r_2' = r_1'$$

$$M_{\text{прост}} = \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$



$$r_2 = r_1 \text{ (высота неизменна)}$$

$$r_2' = r_1' - r_1/f \text{ (угол меняется)}$$

$$M_{\text{линза}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix}$$

в) Последовательность: линза + свободное пространство

$$M = M_{\text{прост}} \cdot M_{\text{линза}} \text{ (умножение справа налево по ходу луча)}$$

$$M = \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - L/f & L \\ -1/f & 1 \end{bmatrix}$$

Применение к гауссову пучку (метод Когельника и Ли):

$$q_2 = (A \cdot q_1 + B) / (C \cdot q_1 + D); \quad 1/q = 1/R - i\lambda/(\pi w^2)$$

q — комплексный параметр пучка, R — радиус кривизны фронта, w — радиус пятна

Рисунок 5.2. – Метод ABCD-матриц для расчета оптических систем

6. Обобщенный сферический резонатор и диаграмма устойчивости

Для резонатора из двух сферических зеркал с радиусами кривизны R_1 и R_2 , расположенных на расстоянии L , вводятся g -параметры:

$$g_1 = 1 - \frac{L}{R_1}, \quad g_2 = 1 - \frac{L}{R_2}.$$

Условие устойчивости резонатора имеет вид:

$$0 \leq g_1 g_2 \leq 1.$$

На диаграмме устойчивости (рисунок 5.3) в координатах (g_1, g_2) область устойчивости ограничена двумя ветвями гиперболы $g_1 g_2 = 1$ и осями координат. Основные типы резонаторов соответствуют точкам на диаграмме: плоский ($R_1, R_2 \rightarrow \infty$, $g_1 = g_2 = 1$), конфокальный ($R_1 = R_2 = L$, $g_1 = g_2 = 0$), концентрический ($R_1 = R_2 = L/2$, $g_1 = g_2 = -1$). Практически используемые резонаторы находятся внутри зоны устойчивости для обеспечения стабильной генерации.

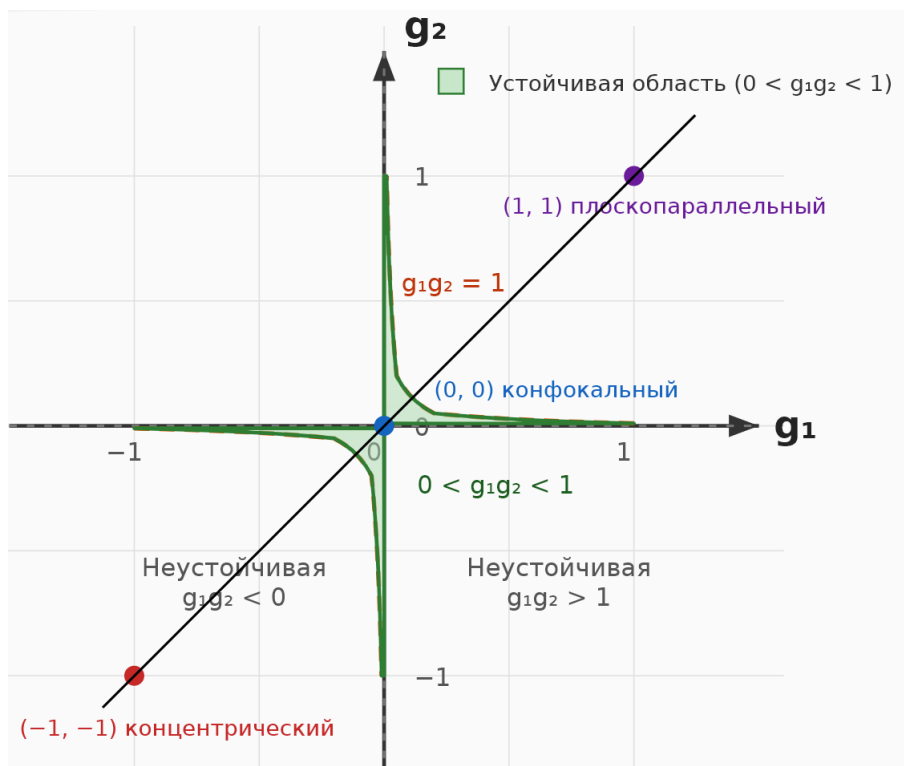


Рисунок 5.3. – Диаграмма устойчивости лазерного резонатора

7. Параметры гауссова пучка в устойчивом резонаторе

Для устойчивого резонатора с известными R_1 , R_2 и L параметры основной моды определяются следующими выражениями.

Радиусы пятна на зеркалах:

$$w_1^2 = \frac{\lambda L}{\pi} \sqrt{\frac{g_2}{g_1(1-g_1g_2)}}, \quad w_2^2 = \frac{\lambda L}{\pi} \sqrt{\frac{g_1}{g_2(1-g_1g_2)}}.$$

Положение перетяжки относительно зеркала 1:

$$z_1 = \frac{g_2(1-g_1)}{g_1 + g_2 - 2g_1g_2} L.$$

Положение перетяжки относительно зеркала 2: $z_2 = L - z_1$.

Радиус перетяжки:

$$w_0^2 = \frac{\lambda L}{\pi} \frac{\sqrt{g_1g_2(1-g_1g_2)}}{|g_1 + g_2 - 2g_1g_2|}.$$

Угловая расходимость пучка в дальней зоне:

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi w_0}.$$

Рэлеевская длина:

$$z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}.$$

Конфокальный параметр: $b = 2z_R$.

Практические задания

Задание 1. Расчет параметров резонатора и гауссова пучка

Для заданной конфигурации лазерного резонатора (вариант задания из таблицы вариантов) выполнить следующие расчеты:

1. Проверить условие устойчивости резонатора. Рассчитать g -параметры (g_1 , g_2) и их произведение. Сделать вывод об устойчивости.

2. Рассчитать радиус пятна гауссова пучка на каждом из зеркал (w_1 и w_2).
3. Определить положение перетяжки пучка относительно зеркала 1 (z_1) и зеркала 2 (z_2).
4. Найти радиус перетяжки пучка (w_0).
5. Рассчитать угловую расходимость пучка (θ) в миллирадианах.
6. Определить рэлеевскую длину (z_R).

Формулы для расчетов:

$$g_1 = 1 - L/R_1, \quad g_2 = 1 - L/R_2,$$

$$0 \leq g_1 g_2 \leq 1,$$

$$w_1^2 = \frac{\lambda L}{\pi} \sqrt{\frac{g_2}{g_1(1 - g_1 g_2)}},$$

$$w_2^2 = \frac{\lambda L}{\pi} \sqrt{\frac{g_1}{g_2(1 - g_1 g_2)}},$$

$$z_1 = \frac{g_2(1 - g_1)}{g_1 + g_2 - 2g_1 g_2} L,$$

$$w_0^2 = \left(\frac{\lambda L}{\pi} \right)^2 \frac{g_1 g_2 (1 - g_1 g_2)}{(g_1 + g_2 - 2g_1 g_2)^2},$$

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi w_0},$$

$$z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}.$$

Таблица. – Варианты заданий

Вариант	Лазер / Длина волны λ	L	R_1	R_2
1	He-Ne / 632.8 нм	25 см	0,8 м	0,6 м
2	Nd:YAG / 1064 нм	150 см	∞	0,5 м
3	Ar+ / 488 нм	1,2 м	3,0 м	2,0 м
4	CO2 / 10.6 мкм	2,5 м	2,5 м	1,5 м
5	He-Ne / 632.8 нм	80 см	1,0 м	0,4 м
6	Полупроводниковый / 850 нм	2,0 мм	1,0 мм	1,5 мм
7	Nd:YAG / 1064 нм	30 см	1,2 м	∞
8	Er:YAG / 2.94 мкм	20 см	0,5 м	0,3 м
9	He-Cd / 442 нм	80 см	2,0 м	1,0 м
10	Рубиновый / 694.3 нм	15 см	0,5 м	0,25 м

Примечание: для варианта 6 все линейные размеры указаны в миллиметрах, необходимо перевести их в метры для согласованности с длиной волны.

Задание 2. Построение графиков зависимостей характеристик резонатора и пучка

Исходные данные: He-Ne лазер, $\lambda = 632,8$ нм, $L = 0,5$ м, R_1 и R_2 изменяются в диапазоне от 0,4 м до 5,0 м.

1. Рассчитать и построить график зависимости g -параметра выходного зеркала (g_2) от радиуса кривизны R_2 .
2. На этом же графике отобразить произведение $g_1 g_2$.
3. Построить на отдельном графике (или на той же координатной сетке с правой осью Y) зависимость радиуса пятна на выходном зеркале (w_2) от R_2 .
4. Рассчитать и построить на одном графике зависимости радиуса перетяжки (w_0) и положения перетяжки от плоского зеркала (z_1) от радиуса кривизны R_2 .

Задание 3. Построение графиков зависимостей от радиуса кривизны выходного зеркала

Исходные данные: $L = 0,3$ м, $R_1 = \infty$, $\lambda = 632,8$ нм, R_2 изменяется в диапазоне от 0,35 м до 5,0 м.

Для случая $R_1 = \infty$ формулы упрощаются:

$$w_0^2 = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{L(R_2 - L)},$$

$$w_2^2 = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{LR_2^2}{R_2 - L}},$$

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi w_0}.$$

Перетяжка при $R_1 = \infty$ всегда находится на плоском зеркале ($z_1 = 0$).

1. Рассчитать и построить на одном графике зависимости радиуса перетяжки (w_0), радиуса пятна на выходном зеркале (w_2) и расходимости пучка (θ) от радиуса кривизны R_2 .
2. К каким значениям стремятся w_0 , w_2 и θ при $R_2 \rightarrow \infty$? Дать физическое объяснение.

Задание 4. Контур устойчивости для общего резонатора

Исходные данные: конфигурация резонатора — планарно-вогнутая ($R_1 = \infty$, $R_2 = 0,5$ м). Длина резонатора L варьируется в диапазоне от 0,1 м до 0,9 м.

1. Рассчитать и построить график зависимости g -параметра выходного зеркала (g_2) от длины резонатора L . На этом же графике отобразить произведение $g_1 g_2$.

2. Рассчитать и построить зависимость радиуса пятна на выходном зеркале (w_2) от L .

3. Отметить на графике зоны устойчивой и неустойчивой работы резонатора. Построение контурного графика:

1. Рассчитать и построить контурный график в координатах (g_1, g_2). Заштриховать область устойчивости ($0 \leq g_1 g_2 \leq 1$).

2. Нанести на график изолинии постоянного радиуса перетяжки (w_0).

3. Отметить на графике точки, соответствующие основным типам резонаторов: симметричный конфокальный ($R_1 = R_2 = L$), концентрический ($R_1 = R_2 = L/2$), плоский ($R_1 = R_2 = \infty$), полуконфокальный ($R_1 = \infty, R_2 = L$).

Отчет по работе

По результатам выполненных измерений составить отчет по выполненной работе. На титульном листе отчета указать название лабораторной работы, ФИО исполнителей, номер группы и дату выполнения. Содержание отчета: привести краткую теорию; выполнение заданий представить подробно; расписать вычисления с переводом всех величин в СИ; построить графики в линейном масштабе с указанием масштаба, величин и единиц измерения для каждой из осей.

Контрольные вопросы

1. Что такое перетяжка гауссова пучка?
2. Дайте определение ближней и дальней зоны.
3. Что такое рэлеевское расстояние для гауссова пучка?
4. Каковы критерии устойчивости оптического резонатора?
5. Что такое ABCD-матрица и как она применяется для описания оптических систем?
6. Сформулируйте определение моды резонатора.
7. В чем отличие поперечных и продольных мод?
8. Какие моды определяют пространственную структуру лазерного пучка? Поясните ответ.
9. Какие моды определяют спектральную структуру лазерного излучения? Поясните ответ.

Список использованной литературы

1. Айрапетян, В. С. Описание практических работ по дисциплине «Физика лазеров» : учебно-методическое пособие / В. С. Айрапетян. — Новосибирск : СГГА, [б. г.]. — Текст электронный.
2. Звелто, О. Принципы лазеров : [пер. с англ.] / О. Звелто. — 4-е изд. — СПб. : Лань, 2008. — 720 с.
3. Когельник, Г. Лазерные пучки и резонаторы / Г. Когельник, Т. Ли // ТИИЭР. — 1966. — Т. 54, № 10. — С. 95–113.
4. Тарасов, Л. В. Физика процессов в генераторах когерентного оптического излучения / Л. В. Тарасов. — М. : Радио и связь, 1981. — 440 с.

Лабораторная работа 6 (расчетно-графическая)

ИЗУЧЕНИЕ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТЬЮ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

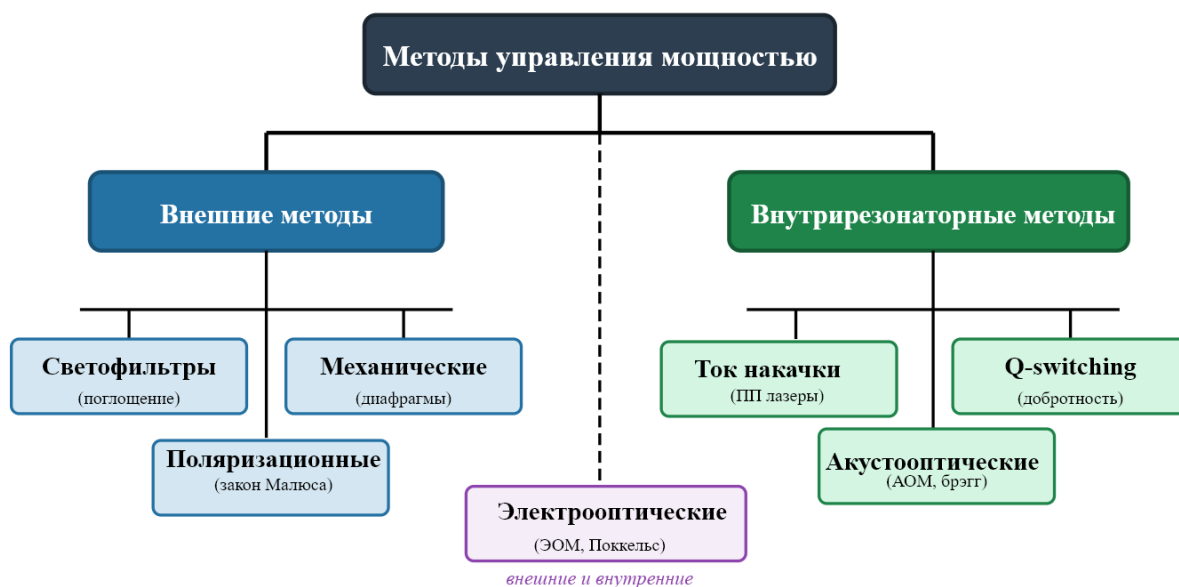
Цель работы

Целью настоящей работы является исследование методов управления мощностью лазерного излучения, включая изучение вольт-амперной характеристики полупроводникового лазера и зависимости выходной мощности от тока накачки, определение порогового тока и расчет ключевых параметров эффективности лазера, а также изучение принципа широтно-импульсной модуляции для регулировки средней выходной мощности лазера.

Теоретическая часть

1. Классификация методов управления мощностью

Управление мощностью лазерного излучения является одной из центральных задач лазерной физики и техники. Все методы регулировки систематизируются по критерию места их применения в оптической системе (рисунок 6.1).



Сравнение методов

Метод	Быстродействие	Диапазон	Сложность	Применение
Светофильтры	статическое	средний	низкая	измерения
Поляризационные	мс	высокий	средняя	фотолитография
Электрооптические	нс	очень высокий	высокая	телекоммуникации

Рисунок 6.1. – Классификация методов управления мощностью лазерного излучения

Внешние методы осуществляют управление мощностью после выхода излучения из резонатора и воздействуют на готовый лазерный пучок. Внутррезонаторные методы реализуют регулировку внутри оптического резонатора лазера путем воздействия на процесс генерации, например, через изменение добротности или параметров активной среды.

Выбор конкретного метода определяется совокупностью требований: динамическим диапазоном регулировки, быстродействием, необходимой точностью, допустимым влиянием на пространственно-временные характеристики пучка, а также стоимостью и сложностью реализации.

2. Ослабление с помощью поглощающих светофильтров

Метод основан на законе Бугера–Ламберта–Бера. При прохождении через вещество интенсивность света экспоненциально убывает вследствие поглощения и рассеяния. Интенсивность прошедшего излучения I связана с интенсивностью падающего излучения I_0 соотношением

$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha l},$$

где α – показатель поглощения среды; l – толщина светофильтра.

На практике используют безразмерную величину оптической плотности D , связанную с коэффициентом пропускания $T = I / I_0$:

$$D = -\lg(T) = -\lg\left(\frac{I}{I_0}\right).$$

Подстановка закона Бугера–Ламберта–Бера дает связь оптической плотности с параметрами материала:

$$D = \frac{\alpha l}{\ln(10)} \approx 0.434 \cdot \alpha l.$$

Итоговая формула для расчета ослабления:

$$I = I_0 \cdot 10^{-D}.$$

Преимуществами метода являются простота, низкая стоимость и слабое влияние на пространственную структуру пучка. Недостатками – дискретный или ограниченно плавный характер регулировки, преобразование поглощенной мощности в тепло, что может привести к термическому повреждению фильтра при высоких мощностях, а также к тепловой линзе и искажению пучка.

3. Поляризационные методы регулировки

Метод основан на управлении состоянием поляризации излучения. Стандартная схема включает линейный поляризатор, фазовую пластинку (чаще всего $\lambda/2$) и анализатор (второй поляризатор). Поляризатор создает линейно поляризованное излучение с интенсивностью I_0 . Полуволновая пластинка поворачивает плоскость поляризации на угол 2φ , где φ – угол между осью пластинки и плоскостью поляризации падающего на нее света. Анализатор пропускает только ту компоненту электрического вектора, которая параллельна его оси. Если анализатор зафиксирован, результирующий угол между новой плоскостью поляризации и осью анализатора равен $\theta = 2\varphi$. Интенсивность на выходе системы определяется законом Малюса:

$$I = I_0 \cdot \cos^2(2\varphi).$$

Максимумы передачи ($I = I_0$) достигаются при $\varphi = \pi n / 2$, минимумы (полное гашение, $I = 0$) – при $\varphi = \pi / 4 + \pi n / 2$, где n – целое число.

Преимущества метода: плавная регулировка в широком динамическом диапазоне, высокая точность и воспроизводимость, безынерционность, возможность работы с высокими мощностями. Недостатки: чувствительность к поляризации исходного излучения лазера, более высокая стоимость и сложность юстировки.

4. Механические методы

Диафрагмирование пучка основано на установке в оптический тракт апертурной диафрагмы переменного или фиксированного диаметра, которая отсекает периферийную часть пучка. Для гауссова пучка с радиусом перетяжки w мощность P , прошедшая через диафрагму радиусом a , описывается выражением

$$P = P_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{2a^2}{w^2}\right) \right],$$

где P_0 – полная мощность пучка.

Метод прост в реализации, однако приводит к существенным потерям полной мощности и искажению волнового фронта.

5. Электрооптические методы

Данные методы основаны на управляемом изменении поляризации света с помощью электрического поля. В кристаллах, не имеющих центра симметрии (KDP, KD*P, LiNbO₃), приложение внешнего электрического поля вызывает линейное изменение показателей преломления – эффект Поккельса. Кристалл, помещенный между скрещенными поляризаторами, работает как управляемый фазовый модулятор.

При подаче напряжения U на электроды кристалла возникает управляемое фазовое запаздывание Γ между ортогональными компонентами электрического вектора:

$$\Gamma = \frac{\pi U}{U_{\lambda/2}},$$

где $U_{\lambda/2}$ – полуволновое напряжение, характерное для данного кристалла и геометрии.

Интенсивность на выходе системы со скрещенными поляризаторами описывается выражением

$$I = I_0 \sin^2\left(\frac{\Gamma}{2}\right) = I_0 \sin^2\left(\frac{\pi U}{2U_{\lambda/2}}\right).$$

Преимущества: очень высокое быстродействие (вплоть до наносекундного диапазона), широкий динамический диапазон. Недостатки: высокая стоимость, необходимость точной юстировки, чувствительность к поляризации.

6. Управление мощностью через ток накачки

Для полупроводниковых лазеров зависимость выходной мощности от тока накачки выше порога генерации хорошо аппроксимируется линейной функцией. Уравнение баланса мощностей имеет вид:

$$P_{\text{вых}} = \eta_{\text{вн}} \cdot \frac{\nu}{\nu_{\text{нак}}} \cdot (I - I_{\text{пор}}),$$

где $\eta_{\text{вн}}$ – внутренний квантовый выход; ν – частота лазерного излучения; $\nu_{\text{нак}}$ – частота квантов накачки; I – ток накачки; $I_{\text{пор}}$ – пороговый ток генерации.

В практическом виде уравнение записывается как

$$P_{\text{вых}} = \eta_d \cdot (I - I_{\text{пор}}),$$

где η_d – дифференциальная эффективность (КПД над порогом), являющаяся константой для конкретного лазера в определенном диапазоне токов.

Преимущества метода: высокая скорость, простота реализации, плавная регулировка. Недостатки: изменение тока накачки может приводить к сдвигу длины волны генерации, уширению спектральной линии, изменению модовой структуры пучка.

17. Акустооптическая модуляция

В акустооптической среде с помощью пьезопреобразователя возбуждается высокочастотная ультразвуковая волна, создающая периодическую модуляцию показателя преломления – фазовую решетку. Падающий лазерный пучок дифрагирует на этой решетке. В режиме Брэгга эффективность дифракции определяется выражением:

$$\eta = \frac{P_1}{P_{\text{пад}}} = \sin^2 \left(\frac{\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{M_2 P_a L}{2h}} \right),$$

где P_1 – мощность в пучке первого порядка; $P_{\text{пад}}$ – мощность падающего пучка; λ – длина волны лазера в вакууме; M_2 – акустооптическая добротность материала; P_a – акустическая мощность; L – длина акустооптического взаимодействия; h – высота акустического пучка.

Плавно изменяя мощность ВЧ-генератора P_a , можно регулировать мощность в дифрагированном пучке от нуля до почти ста процентов.

8. Модуляция добротности

Метод генерации гигантских импульсов наносекундной длительности основан на искусственном задерживании начала генерации для накопления избыточной инверсии населенностей. В это время добротность резонатора искусственно занижена, и генерация не возникает, несмотря на интенсивную накачку. Когда инверсия достигает максимального значения, добротность резонатора резко восстанавливается, и запасенная энергия высвечивается в виде короткого мощного импульса.

Энергия импульса и его длительность оцениваются из упрощенной модели скоростных уравнений:

$$E \approx \frac{h\nu A}{2\sigma\gamma} \ln\left(\frac{N_i}{N_f}\right),$$

$$\tau_{\text{имп}} \approx \frac{t_c}{\ln(N_i / N_f)},$$

где N_i, N_f – начальная и конечная инверсия населенностей; σ – сечение вынужденного перехода; γ – параметр вывода энергии; t_c – время обхода резонатора; A – площадь поперечного сечения моды.

Практические задания

Часть 1. Управление мощностью постоянным током

1. Построить график вольт-амперной характеристики (ВАХ) $U = f(I)$.
2. Построить график зависимости выходной оптической мощности от тока накачки $P_{\text{opt}} = f(I)$.
3. По графику $P_{\text{opt}} = f(I)$ определить пороговый ток накачки $I_{\text{порог}}$. Обосновать метод определения.
4. Выбрать линейный участок ватт-амперной характеристики выше порога и рассчитать тангенс угла его наклона $\Delta P_{\text{opt}} / \Delta I$ (в Вт/А).
5. Рассчитать энергию фотона E_ϕ для заданной в варианте (см. таблицу 6.1) длины волны:

$$E_\phi = \frac{hc}{\lambda},$$

где $h = 6.626 \times 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка; $c = 3 \times 10^8$ м/с — скорость света.

6. Рассчитать внешнюю дифференциальную квантовую эффективность η_d :

$$\eta_d = \frac{q}{E_\phi} \cdot \frac{\Delta P_{\text{opt}}}{\Delta I},$$

где $q = 1.6 \times 10^{-19}$ Кл – заряд электрона.

Результат выразить в процентах.

7. Для последнего значения тока в таблице (90 мА) рассчитать подводимую электрическую мощность и КПД лазера:

$$P_{эл} = I \cdot U,$$

$$\eta = \frac{P_{opt}}{P_{эл}} \cdot 100\%.$$

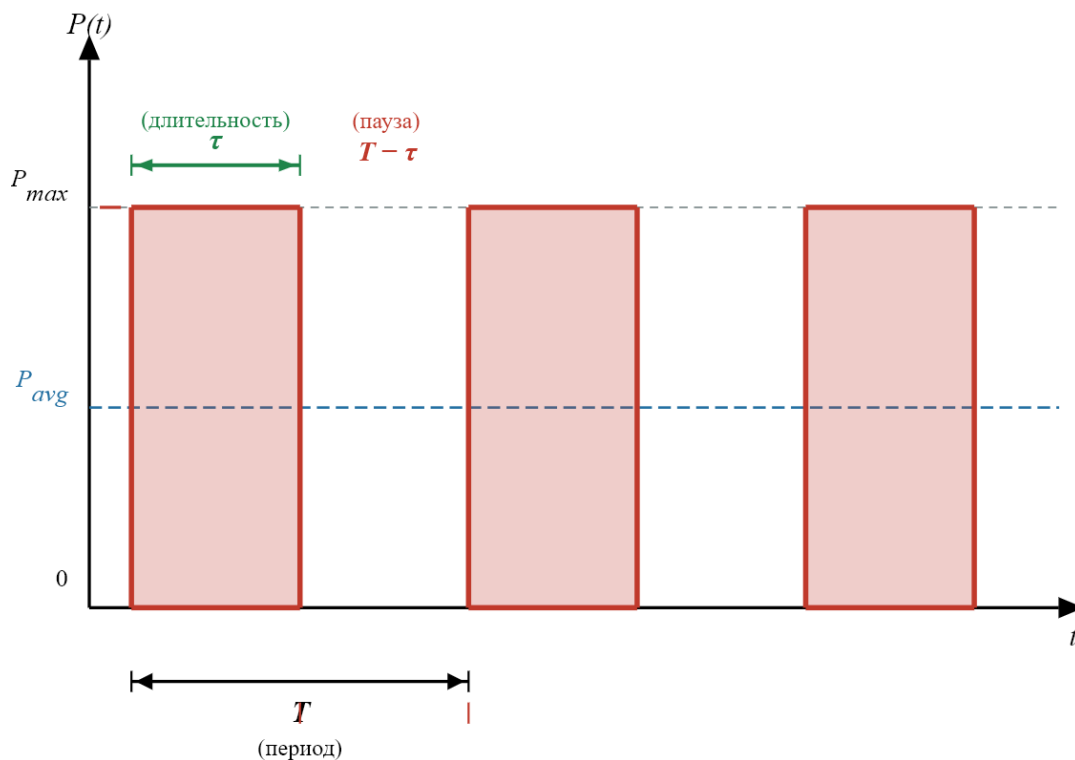
Часть 2. Управление мощностью с помощью ШИМ

Средняя выходная мощность лазера P_{cp} при управлении прямоугольными импульсами тока рассчитывается как

$$P_{cp} = P_{imp} \cdot D,$$

где P_{imp} – оптическая мощность в импульсе; $D = \tau / T$ – скважность (коэффициент заполнения); τ – длительность импульса; T – период следования импульсов.

Иллюстрация представлена на рисунке 6.2.



Скважность (коэффициент заполнения): $D = \tau / T$

$$P_{avg} = P_{max} \cdot D$$

$$D = \tau / T$$

Рисунок 6.2. – Параметры широтно-импульсной модуляции

1. Используя данные варианта, определить оптическую мощность P_{imp} , соответствующую амплитудному току ШИМ $I_a = 80$ мА.
2. Рассчитать среднюю выходную мощность P_{cp} для скважностей $D = 0,25; 0,5; 0,75$.
3. Построить график зависимости $P_{cp} = f(D)$.
4. Рассчитать среднюю мощность при $D = 1$ (100%). Сравнить с мощностью при DC-токе 80 мА.
5. Объяснить, почему установка амплитудного тока ШИМ ниже порогового значения неэффективна для регулировки мощности.

Часть 3. Исследование тепловых эффектов

1. Используя данные таблицы тепловых эффектов (таблица 6.2), рассчитать электрическую мощность, рассеиваемую на лазере в режиме нагрева:

$$P_{эл.нагр} = I \cdot U.$$

2. Рассчитать снижение выходной оптической мощности из-за нагрева:

$$\Delta P = P_{исх} - P_{нагр}.$$

3. Рассчитать долю тепловых потерь в подводимой мощности:

$$\eta_{тепл} = \frac{P_{эл.нагр} - P_{нагр}}{P_{эл.нагр}}.$$

4. Построить совмещенную диаграмму, показывающую исходную и сниженную мощность до и после нагрева.
5. Объяснить физическую природу сдвига длины волны излучения при нагреве лазерного диода.
6. Проанализировать, как тепловые эффекты влияют на КПД лазерного диода и стабильность его параметров.

Часть 4. Сравнительный анализ и выводы

1. Сравнить полученные значения $I_{порог}$ и η_d для разных вариантов. Сделать вывод о влиянии длины волны на эти параметры.
2. Сравнить эффективность методов регулировки мощности: изменение постоянного тока и ШИМ. Указать преимущества и недостатки каждого метода.

3. Проанализировать влияние тепловых эффектов на работу лазера. Предложить методы борьбы с перегревом.

4. Сформулировать общий вывод по работе, отразив взаимосвязь между током накачки, выходной мощностью, эффективностью и тепловым режимом лазерного диода.

Таблицы вариантов заданий

Таблица 6.1. – Экспериментальные данные для режима постоянного тока (DC)

Вариант	Лазер, λ (нм)	I , мА	U , В	P_{opt} , мВт
1	ЛД-450	0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90	0,00, 3,55, 3,60, 3,62, 3,65, 3,68, 3,70, 3,72, 3,74, 3,76	0,00, 0,01, 0,02, 0,04, 0,10, 1,00, 5,00, 9,00, 13,00, 17,00
2	ЛД-520	0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90	0,00, 2,95, 3,00, 3,02, 3,05, 3,08, 3,10, 3,12, 3,14, 3,16	0,00, 0,01, 0,02, 0,03, 0,06, 0,40, 3,20, 6,00, 8,80, 11,60
3	ЛД-650	0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90	0,00, 1,75, 1,78, 1,80, 1,82, 1,84, 1,86, 1,88, 1,90, 1,92	0,00, 0,01, 0,02, 0,03, 0,07, 0,70, 4,50, 8,30, 12,10, 15,90
4	ЛД-808	0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90	0,00, 1,42, 1,45, 1,47, 1,49, 1,51, 1,53, 1,55, 1,57, 1,59	0,00, 0,01, 0,01, 0,02, 0,04, 0,50, 4,00, 7,50, 11,00, 14,50
5	ЛД-980	0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90	0,00, 1,35, 1,36, 1,37, 1,38, 1,39, 1,40, 1,41, 1,42, 1,43	0,00, 0,00, 0,01, 0,01, 0,02, 0,35, 2,90, 5,45, 8,00, 10,55
6	ЛД-1550	0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90	0,00, 0,90, 0,91, 0,92, 0,93, 0,94, 0,95, 0,96, 0,97, 0,98	0,00, 0,00, 0,00, 0,01, 0,01, 0,20, 1,70, 3,20, 4,70, 6,20

Таблица 6.2. – Данные для исследования тепловых эффектов

Вариант	$T_{исх}$, °С	$I_{раб}$, мА	$P_{исх}$, мВт	$P_{нагр}$, мВт	$U_{нагр}$, В	$\Delta\lambda$, нм
1	25	80	13,00	11,20	3,78	+1,2
2	25	80	8,80	7,45	3,18	+1,5
3	25	80	12,10	10,15	1,94	+2,1
4	25	80	11,00	9,10	1,61	+2,8
5	25	80	8,00	6,40	1,46	+3,5
6	25	80	4,70	3,55	1,01	+5,2

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные методы управления мощностью лазерного излучения и классифицируйте их по месту применения в оптической системе.

2. Запишите закон Малюса. Объясните принцип действия поляризационного метода регулировки мощности с использованием полуволновой пластинки.
3. Опишите принцип работы электрооптического модулятора на эффекте Поккельса. Что такое полуволновое напряжение?
4. Объясните физический принцип акустооптической модуляции. От каких параметров зависит эффективность дифракции в режиме Брэгга?
5. В чем заключается метод модуляции добротности? Какие способы реализации данного метода вам известны?
6. Запишите уравнение баланса мощностей для полупроводникового лазера. Дайте определение дифференциальной квантовой эффективности.
7. Каким образом широтно-импульсная модуляция (ШИМ) позволяет регулировать среднюю выходную мощность лазера?
8. Объясните физическую природу тепловых эффектов в лазерных диодах и их влияние на выходные характеристики излучения.
9. Проведите сравнительный анализ различных методов управления мощностью по критериям быстродействия, диапазона регулировки и сложности реализации.

Отчет по работе

По результатам выполненных измерений составить отчет по выполненной работе. На титульном листе отчета указать название лабораторной работы, ФИО исполнителей, номер группы и дату выполнения. Содержание отчета: привести краткую теорию; выполнение заданий представить подробно; расписать вычисления с переводом всех величин в СИ; построить графики в линейном масштабе с указанием масштаба, величин и единиц измерения для каждой из осей.

Список использованной литературы

1. Андреев, А. Ф. Оптика лазеров / А. Ф. Андреев, В. С. Витко, Ф. А. Майоров. — Л. : Изд-во Ленинградского ун-та, 1988. — 392 с.
2. Ахманов, С. А. Физическая оптика / С. А. Ахманов, С. Ю. Никитин. — М. : Изд-во МГУ, 1998. — 656 с.
3. Звелто, О. Принципы лазеров : [пер. с англ.] / О. Звелто. — 4-е изд. — СПб. : Лань, 2008. — 720 с.
4. Ландсберг, Г. С. Оптика / Г. С. Ландсберг. — 6-е изд. — М. : Физматлит, 2003. — 848 с.
5. Тарасов, Л. В. Физика процессов в генераторах когерентного оптического излучения / Л. В. Тарасов. — М. : Радио и связь, 1981. — 440 с.

Лабораторная работа 7 (расчетно-графическая) РАСЧЕТ ЗЕРКАЛЬНЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Цель работы

Целью настоящей работы является освоение матричного метода расчета оптических характеристик многослойных диэлектрических систем, получение практических навыков проектирования просветляющих покрытий, интерференционных фильтров и диэлектрических зеркал, а также исследование влияния параметров слоев на спектральные характеристики покрытий.

Теоретическая часть

1. Введение в электромагнитную теорию диэлектриков

Матричный метод анализа многослойных диэлектрических покрытий представляет собой строгий математический аппарат для расчета коэффициентов отражения и пропускания сложных оптических систем. Основой метода являются уравнения Максвелла для монохроматической электромагнитной волны:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad \nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}.$$

Для диэлектрических сред без поглощения материальные уравнения имеют вид:

$$\vec{D} = \epsilon_0 n^2 \vec{E}, \quad \vec{B} = \mu_0 \vec{H},$$

где n — действительный показатель преломления.

2. ТЕ и ТМ волны: определение и свойства

При падении плоской волны на границу раздела сред удобно разделить рассмотрение на два независимых случая. Для ТЕ-волны (s-поляризация) вектор $\vec{E}$ перпендикулярен плоскости падения, компоненты поля: $E_y \neq 0$, $H_x \neq 0$, $H_z \neq 0$. Уравнение для электрического поля:

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} + k_0^2 n^2 E_y = 0.$$

Для ТМ-волны (р-поляризация) вектор $\vec{H}$ перпендикулярен плоскости падения, компоненты поля: $H_y \neq 0$, $E_x \neq 0$, $E_z \neq 0$ (рисунок 7.1). В данной работе рассматривается только нормальное падение, где различие между ТЕ и ТМ волнами исчезает.

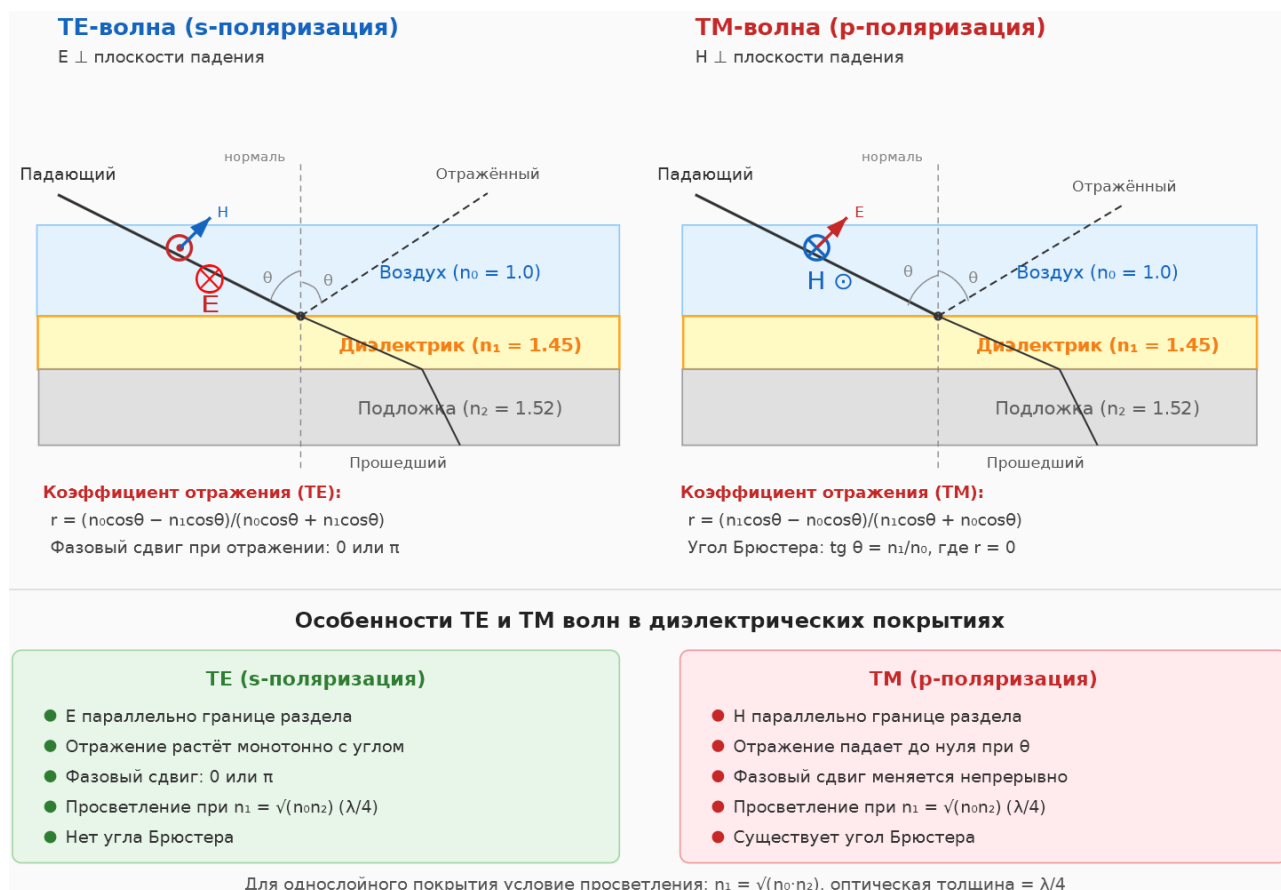


Рисунок 7.1. – ТЕ и ТМ волны

3. Волновое сопротивление и импеданс сред

Волновое сопротивление вакуума определяется выражением:

$$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \approx 377 \text{ Ом}.$$

Для диэлектрической среды с показателем преломления n волновое сопротивление (импеданс) составляет:

$$\eta = \frac{\eta_0}{n}.$$

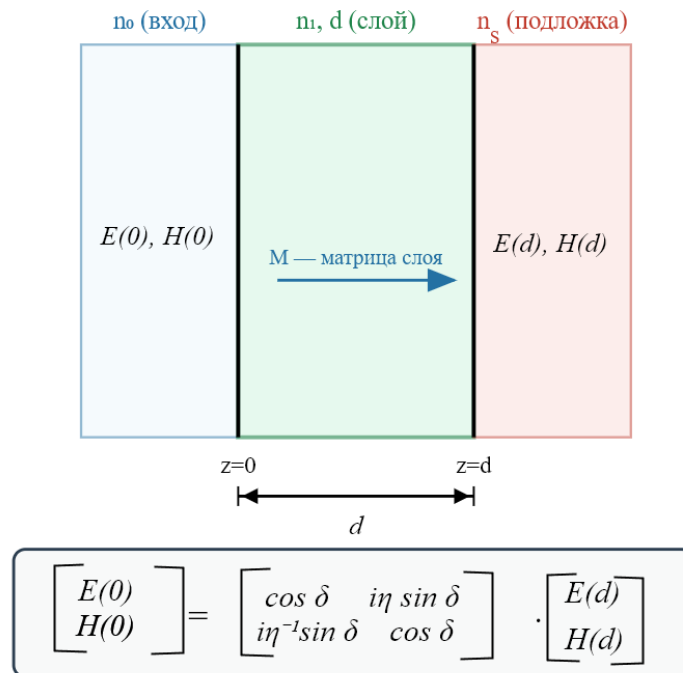
В расчетах часто используют нормированный импеданс, полагая $\eta_0 = 1$, тогда для среды с показателем n импеданс равен $\eta = 1/n$.

4. Матричный формализм для одного слоя

Для слоя толщиной d с показателем преломления n характеристическая матрица имеет вид:

$$M = \begin{pmatrix} \cos \delta & i\eta \sin \delta \\ i\eta^{-1} \sin \delta & \cos \delta \end{pmatrix},$$

где $\delta = k_0 n d = \frac{2\pi n d}{\lambda}$ – фазовая толщина слоя.



Физический смысл элементов характеристической матрицы

$m_{11} = \cos \delta$ — коэффициент передачи электрического поля E при условии $H(d) = 0$ (магнитное замыкание)

$m_{12} = i\eta \sin \delta$ — входное оптическое сопротивление при условии $E(d) = 0$ (электрическое замыкание)

$m_{21} = i\eta^{-1} \sin \delta$ — входная оптическая проводимость при условии $H(d) = 0$ (магнитное замыкание)

$m_{22} = \cos \delta$ — коэффициент передачи магнитного поля H при условии $E(d) = 0$ (электрическое замыкание)

Рисунок 7.2. – Характеристическая матрица одного диэлектрического слоя и смысл ее элементов

Физический смысл элементов матрицы:

$M_{11} = M_{22} = \cos \delta$ характеризуют изменение амплитуды;

$M_{12} = i\eta \sin \delta$ связан с импедансом среды;

$M_{21} = i\eta^{-1} \sin \delta$ представляет обратную величину импеданса.

Характеристическая матрица j -го слоя связывает тангенциальные компоненты полей на верхней ($z=0$) и нижней ($z=d_j$) границах слоя:

$$\begin{pmatrix} E_j(0) \\ H_j(0) \end{pmatrix} = M_j \begin{pmatrix} E_j(d_j) \\ H_j(d_j) \end{pmatrix},$$

где E и H – нормированные амплитуды тангенциальных компонент электрического и магнитного полей.

Элементы матрицы имеют прямой физический смысл функций передачи и импеданса для двух фундаментально различных типов граничных условий (см. рисунок 7.2). Элемент m_{11} – коэффициент передачи по электрическому полю при условии отсутствия магнитного поля на выходе. Элемент m_{12} – входное оптическое сопротивление при условии отсутствия электрического поля на выходе. Элемент m_{21} – входная оптическая проводимость при условии отсутствия магнитного поля на выходе. Элемент m_{22} – коэффициент передачи по магнитному полю при условии отсутствия электрического поля на выходе.

5. Многослойные системы

Для системы из m слоев результирующая матрица определяется произведением матриц отдельных слоев в порядке их расположения:

$$M = \prod_{j=1}^m M_j = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix}.$$

Связь с коэффициентами отражения и пропускания по амплитуде:

$$r = \frac{\eta_s m_{11} + \eta_0 \eta_s m_{12} - m_{21} - \eta_0 m_{22}}{\eta_s m_{11} + \eta_0 \eta_s m_{12} + m_{21} + \eta_0 m_{22}},$$

$$t = \frac{2\eta_s}{\eta_s m_{11} + \eta_0 \eta_s m_{12} + m_{21} + \eta_0 m_{22}}.$$

Энергетические коэффициенты:

$$R = |r|^2, \quad T = \frac{n_s}{n_0} |t|^2.$$

6. Частные случаи и специальные толщины

Для четвертьволнового слоя ($\delta = \pi/2$) матрица принимает вид:

$$M_{\lambda/4} = \begin{pmatrix} 0 & i\eta \\ i/\eta & 0 \end{pmatrix}.$$

Для полуволнового слоя ($\delta = \pi$):

$$M_{\lambda/2} = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

7. Просветляющие покрытия

Условие идеального просветления для однослойного покрытия:

$$n_1 = \sqrt{n_0 n_s}, \quad d_1 = \frac{\lambda_0}{4n_1}.$$

Для типичного стекла ($n_s = 1.5$) в воздухе ($n_0 = 1.0$) требуемый показатель преломления просветляющего слоя составляет $n_1 = \sqrt{1.0 \cdot 1.5} \approx 1.225$. Типы просветляющих покрытий: однослойные для монохроматического излучения, двухслойные для расширения спектрального диапазона, трехслойные и более для широкополосного просветления.

8. Брэгговские отражатели

Брэгговские отражатели представляют собой многослойные системы с чередованием слоев высокого и низкого показателя преломления. Центральная длина волны отражения:

$$\lambda_0 = 2(n_H d_H + n_L d_L).$$

Для четвертьволновых зеркал толщины слоев составляют:

$$d_H = \frac{\lambda_0}{4n_H}, \quad d_L = \frac{\lambda_0}{4n_L}.$$

Применение брэгговских отражателей включает лазерные резонаторы, интерференционные фильтры, волоконно-оптические брэгговские решетки.

9. Интерференционные фильтры

На основе многослойных диэлектрических систем создают полосовые фильтры, длинноволновые и коротковолновые фильтры отсеки, нотч-фильтры (режекторные).

Практические задания

Задание 1. Однослойное покрытие

Рассчитать коэффициент отражения R на указанной длине волны и построить график $R(\lambda)$ в диапазоне 400–800 нм. Диапазон разбить равномерно, чтобы получить 10 точек графика.

Варианты задания 1

Вариант	n_0	n_s	n_1	d_1 , нм	λ , нм
1	1,0	1,7	1,45	100	600
2	1,0	2,0	1,70	80	500
3	1,0	1,9	1,35	120	650
4	1,0	2,2	1,55	90	550
5	1,0	1,8	1,35	110	700
6	1,0	2,1	1,65	85	450
7	1,0	1,6	1,45	95	580
8	1,0	2,3	1,55	75	520
9	1,0	1,7	1,32	105	620
10	1,0	2,4	1,65	70	480

Задание 2. Двухслойное покрытие

Рассчитать $R(\lambda)$ для двухслойного покрытия в диапазоне 400–800 нм. Толщины слоев принять равными $d_1 = 60$ нм, $d_2 = 60$ нм.

Варианты задания 2

Вариант	n_0	n_s	n_1	n_2	λ_0 , нм
1	1,0	1,5	1,8	1,38	550
2	1,0	1,6	1,9	1,45	600
3	1,0	1,7	2,0	1,5	500
4	1,0	1,55	1,85	1,4	580
5	1,0	1,65	1,95	1,48	520
6	1,0	1,45	1,75	1,35	620
7	1,0	1,75	2,1	1,52	480
8	1,0	1,58	1,88	1,42	560
9	1,0	1,68	2,05	1,55	540
10	1,0	1,52	1,82	1,38	590

Задание 3. Оптимизация однослойного покрытия

Найти оптимальные значения n_1 и d_1 для наилучшего просветления и построить график $R(n_1)$ для четвертьволнового слоя.

Варианты задания 3

Вариант	n_0	n_s	λ_0 , нм
1	1,0	1,60	550
2	1,0	1,80	600
3	1,0	2,00	500
4	1,0	1,70	650
5	1,0	1,90	550
6	1,0	2,10	480
7	1,0	1,55	580
8	1,0	1,85	520
9	1,0	2,20	450
10	1,0	1,72	620

Задание 4. Брэгговские отражатели

Рассчитать $R(\lambda)$ в диапазоне 1000–2000 нм.

Варианты задания 4

Вариант	Количество периодов	n_H	n_L	λ_0 , нм
1	4	2,30	1,45	1550
2	6	2,40	1,46	1300
3	5	2,35	1,44	1650
4	7	2,50	1,47	1200
5	4	2,25	1,43	1450
6	6	2,45	1,48	1350
7	5	2,30	1,42	1580
8	8	2,6	1,49	1100
9	4	2,2	1,41	1620
10	7	2,55	1,5	1250

Задание 5. Влияние толщины слоя

Исследовать зависимость $R(d_1)$ для диапазона толщин $0 \leq d_1 \leq 200$ нм и найти минимум отражения.

Варианты задания 5

Вариант	n_0	n_1	n_2	n_s	d_2 , нм	λ_0 , нм
1	1.0	2,10	1,46	1,52	95	650
2	1.0	1,90	1,44	1,58	105	600
3	1.0	2,20	1,48	1,62	85	550
4	1.0	1,80	1,42	1,55	115	700
5	1.0	2,30	1,50	1,65	75	500
6	1.0	2,00	1,47	1,60	100	580
7	1.0	2,40	1,52	1,68	70	480
8	1.0	1,85	1,43	1,53	110	620
9	1.0	2,15	1,49	1,57	90	540
10	1.0	2,25	1,51	1,63	80	520

Отчет по работе

По результатам выполненных измерений составить отчет по выполненной работе. На титульном листе отчета указать название лабораторной работы, ФИО исполнителей, номер группы и дату выполнения. Содержание отчета: привести краткую теорию; выполнение заданий представить подробно; расписать вычисления с переводом всех величин в СИ; построить графики в линейном масштабе с указанием масштаба, величин и единиц измерения для каждой из осей.

Контрольные вопросы

1. Выведите матрицу переноса для однородного диэлектрического слоя.
2. Объясните физический смысл элементов матрицы переноса.
3. Как связано волновое сопротивление среды с ее показателем преломления?
4. Сформулируйте условие идеального просветления для однослойного покрытия.
5. Объясните принцип работы брэгговского отражателя.
6. В чем преимущества диэлектрических зеркал перед металлическими?
7. Как зависит коэффициент отражения от числа периодов в брэгговском зеркале?

8. Каковы особенности расчета многослойных систем при наклонном падении?
9. Объясните различие между ТЕ и ТМ поляризациями.
10. Какие факторы ограничивают практическую реализацию идеальных просветляющих покрытий?

Список использованной литературы

1. Борн, М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф ; пер. с англ. С.Н. Бреус, А. И. Головашкина, А. А. Шубина. – Изд. 2-е, испр. – М. : Наука, 1973. – 720 с.
2. Зверев, В. А. Расчет оптических покрытий / В. А. Зверев, А. Н. Морозов. – СПб. : СПбГУ, 1998. – 184 с.
3. Кноттл, Г. Оптические тонкопленочные покрытия : [пер. с англ.] / Г. Кноттл. – М. : Мир, 1981. – 388 с.
4. Козлов, Г. В. Матричные методы в теории тонких пленок / Г. В. Козлов. – М. : Физматлит, 2001. – 312 с.
5. Крылов, К. И. Диэлектрические многослойные системы / К. И. Крылов. – М. : Наука, 1989. – 296 с.
6. Маклеод, Х. А. Тонкопленочные оптические фильтры : [пер. с англ.] / Х. А. Маклеод. – М. : Мир, 1988. – 432 с.
7. Рыбакин, В. И. Интерференционные покрытия / В. И. Рыбакин. – М. : Машиностроение, 1988. – 264 с.
8. Тиходеев, С. Г. Оптика тонкослойных покрытий / С. Г. Тиходеев. – Л. : ЛГУ, 1975. – 248 с.
9. Ярив, А. Оптические волны в кристаллах / А. Ярив, П. Юх ; пер. с англ. С. Г. Кривошлыкова, Н. И. Петрова – М. : Мир, 1987. – 616 с.