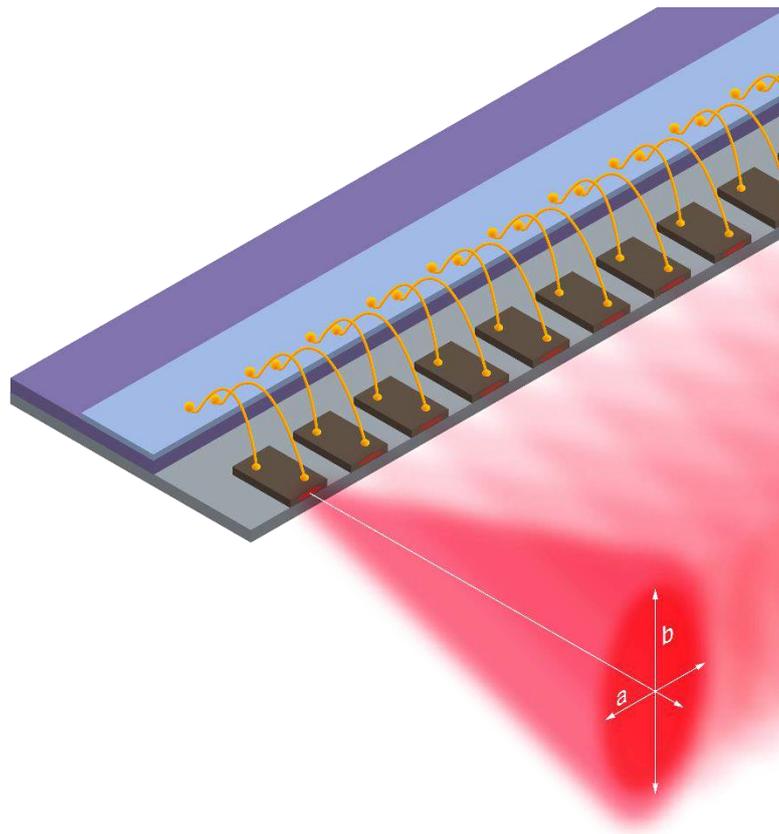


**ІІТМО**

**А.И. Бородкин, В.Е. Бугров, Л.Я. Карачинский,  
Е.С. Колодезный, А.А. Петренко, А.Е. Романов, С.С.  
Рочас, Е.О. Тиходеева**

**ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСТОЧНИКОВ  
ЛАЗЕРНОГО И СИНХРОТРОННОГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ**



**Санкт-Петербург  
2023**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

**А.И. Бородкин, В.Е. Бугров, Л.Я. Карачинский,  
Е.С. Колодезный, А.А. Петренко, А.Е. Романов, С.С.  
Рочас, Е.О. Тиходеева**

## **ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСТОЧНИКОВ ЛАЗЕРНОГО И СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО

по направлениям подготовки 16.03.01, 16.04.01 «Техническая физика»,  
12.03.05, 12.04.05 «Лазерная техника и лазерные технологии»  
в качестве Учебно-методического пособия для реализации основных  
профессиональных образовательных программ высшего образования  
бакалавриата и магистратуры

**ИТМО**

Санкт-Петербург  
2023

Бородкин А.И., Бугров В.Е., Карачинский Л.Я., Колодезный Е.С., Петренко А.А., Романов А.Е., Рочас С.С., Тиходеева Е.О., Характеристики источников лазерного и синхротронного излучения– СПб: Университет ИТМО, 2023. – 93 с.

Рецензент(ы):

Новиков Иннокентий Игоревич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории однофотонных детекторов и генераторов, Университета ИТМО.

Учебно-методическое пособие предназначено для использования при проведении лабораторных работ в рамках дисциплины «Синхротронные и рентгеновские лазерные установки и методы анализа био- и наноструктур» образовательной программы «Лазерные и синхротронные технологии магесайенс/Megascience laser and synchrotron technologies», дисциплины «Полупроводниковые лазеры и приборы на их основе» образовательной программы «Перспективные системы передачи данных», «Световые и лазерные коммуникационные технологии» образовательной программы «Лазерная фотоника и оптоэлектроника». В процессе выполнения лабораторных работ учащиеся образовательных программ бакалавриата овладевают навыками проведения комплексных исследований электрических характеристик полупроводниковых лазеров и спектральных, мощностных, поляризационных характеристик лазерного излучения; обучающиеся образовательных программ магистратуры знакомятся с алгоритмами исследования характеристических параметров полупроводниковых лазеров; сферами применения лазеров на примере исследования перемещения объекта методом лазерной интерферометрии; методами расчета спектральных характеристик синхротронного излучения на примере ондулятора.



**ИТМО**

**Университет ИТМО** – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня,

предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2023

© Бородкин А.И., Бугров В.Е., Карачинский Л.Я., Колодезный Е.С., Петренко А.А., Романов А.Е., Рочас С.С., Тиходеева Е.О., 2023

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
Лабораторная работа 1. Исследование электрических и энергетических характеристик полупроводниковых лазерных диодов .....	6
Лабораторная работа 2. Исследование спектральных характеристик излучения и характеристической температуры лазерных диодов различных спектральных диапазонов .....	17
Лабораторная работа 3. Исследование пространственного распределения интенсивности излучения линейки лазерных диодов .....	31
Лабораторная работа 4. Исследование параметров импульсного режима генерации линейки лазерных диодов .....	39
Лабораторная работа 5. Исследование поляризационных характеристик лазерного излучения .....	50
Лабораторная работа 6. Изучение способов контроля перемещений методом лазерной интерферометрии.....	58
Лабораторная работа 7. Источники синхротронного излучения. Конструктивные особенности и излучение ондулятора .....	66
Лабораторная работа 8. Источники синхротронного излучения. Моделирование излучения ондулятора .....	80
Приложение А Пример оформления отчета .....	88

## **ВВЕДЕНИЕ**

В процессе выполнения лабораторных работ учащиеся образовательных программ бакалавриата овладевают навыками проведения комплексных исследований электрических характеристик полупроводниковых лазеров и спектральных, мощностных, поляризационных характеристик лазерного излучения; обучающиеся образовательных программ магистратуры знакомятся с алгоритмами исследования характеристических параметров полупроводниковых лазеров; сферами применения лазеров на примере исследования перемещения объекта методом лазерной интерферометрии; методами расчета спектральных характеристик синхротронного излучения на примере ондулятора.

Учебное пособие разработано при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2021-1349).

# Лабораторная работа 1.

## Исследование электрических и энергетических характеристик полупроводниковых лазерных диодов

### 1.1. Цель

Исследовать вольт-амперную и ватт-амперную характеристики полупроводникового торцевого лазерного диода с полосковым контактом, работающего в режиме непрерывной генерации.

### 1.2. Краткие теоретические сведения

#### 1.2.1. Лазерный диод

Лазерный диод — это полупроводниковый прибор, преобразующий электрический сигнал в оптическое излучение (свет).

Лазерным диодом называется полупроводниковый лазер, активная область которого построена на базе диода. Работа лазерного диода основана на инверсии населенности в области  $p$ - $n$  перехода (активной области) вследствие токовой инжекции неосновных носителей заряда, поэтому лазерные диоды называют также инжекционными лазерами. Инверсия населенности достигается за счет инжекции носителей заряда из расположенных вблизи активной области эмиттеров, которые являются резервуарами для свободных носителей заряда, инжектируемых в активную область.

Для реализации устойчивой во времени лазерной генерации на базе лазерного диода требуется выполнение нескольких обязательных условий. На начальном этапе необходимо появление в активной области лазера первого спонтанно сгенерированного фотона, появившегося в результате электронно-дырочной рекомбинации, с длиной волны в пределах спектральной полосы усиления лазера. В результате спонтанной эмиссии фотон, имеющий направление распространения вдоль оптической оси резонатора, стимулирует развитие процесса лазерной генерации, а устойчивость генерации обеспечивается наличием положительной обратной связи с помощью оптического резонатора. Иными словами, если в активной области лазера создана инверсная населенность, то для определенных энергий фотонов (спектр длин волн света) вынужденное излучение преобладает над оптическим поглощением, т.е. имеет место оптическое усиление. Одной из наиболее простых конструкций резонатора является резонатор Фабри-Перо – расположенные друг напротив друга плоскопараллельные зеркала, одно из которых обладает более высоким коэффициентом отражения, чем второе. В качестве зеркал резонатора Фабри-Перо в полупроводниковых лазерах с боковым (торцевым) выводом излучения обычно выступают сколотые вдоль определенных кристаллографических направлений грани кристалла. Для изменения коэффициента отражения зеркал, полученных скалыванием, используются напыляемые покрытия (например, диэлектрические пленки).

Помимо положительной обратной связи, оптический резонатор выполняет еще и волноводную функцию – задает выделенное направление распространения света, обеспечивающее наибольшее усиление. Активная область окружена волноводными полупроводниковыми слоями, изготовленными из материала с меньшим показателем преломления, поэтому под влиянием эффекта полного внутреннего отражения большая часть излучения остается в активной области.

Конструкция инжекционного полупроводникового лазерного диода с торцевым выводом излучения представлена на рисунке 1.1.

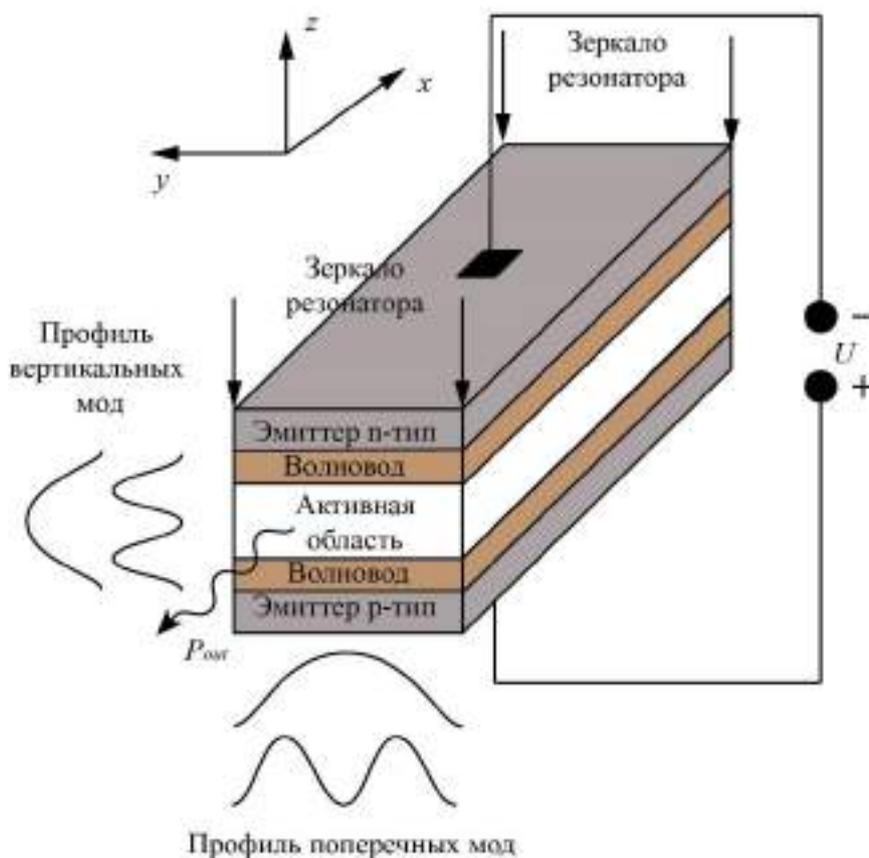


Рисунок 1.1 — Схематичное изображение конструкции инжекционного лазера с торцевым выводом излучения

Окружающие активную область слои полупроводникового материала выполняют как волноводную функцию, так и служат электрическими эмиттерами, обеспечивающими инжекцию носителей заряда в активную область. Сколотые грани с диэлектрическими покрытиями выступают в качестве зеркал резонатора Фабри-Перо, обеспечивающих стимуляцию процесса лавинного умножения в активной области и вывод части излучения за пределы лазерного резонатора.

Торцевой лазерный диод с полосковым контактом – это инжекционный лазер, в котором активная область выполнена в виде узкой полоски. Данное конструктивное решение позволяет обеспечить эффективную селекцию поперечных мод в направлении  $y$  (см. рисунок 1.1) и устойчивое функционирование лазера.

### 1.2.1.1. Вольт-амперная и ватт-амперная характеристики лазерного диода

Основной функцией инжекционного лазера является преобразование потребляемой электрической энергии в выходное когерентное оптическое излучение. Исходя из этого, зависимость выходной оптической мощности излучения от тока накачки, называемая также ватт-амперной характеристикой, может быть рассмотрена в качестве основной приборной характеристики лазера. Пример ватт-амперной характеристики инжекционного лазера представлен на рисунке 1.2.

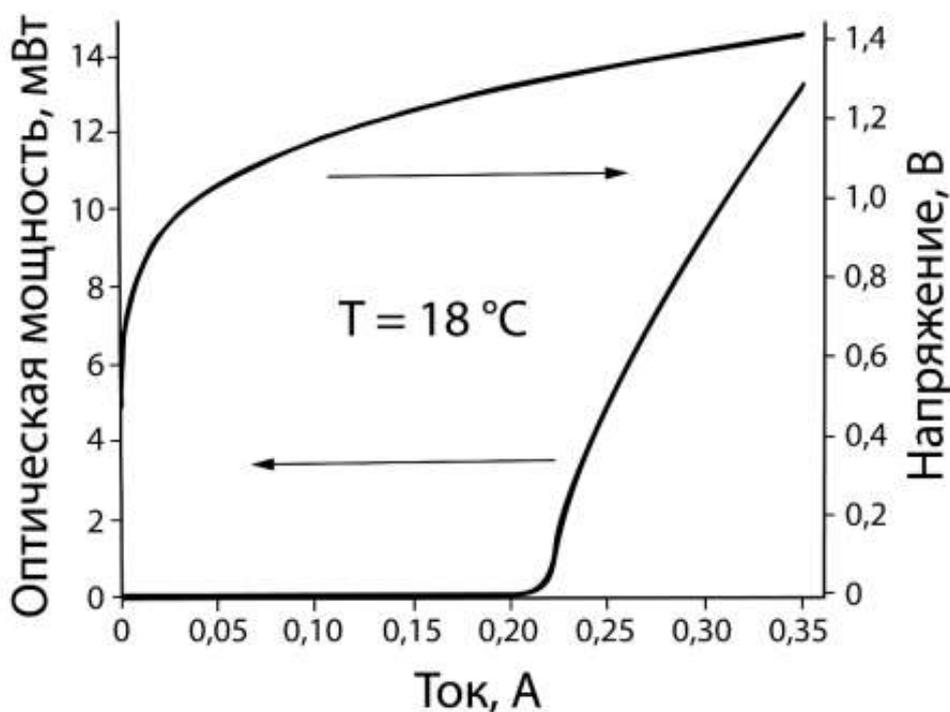


Рисунок 1.2 — Пример вольт-амперной и ватт-амперной характеристик лазерного диода при температуре  $T=18^{\circ}\text{C}$  [Колодезный Е.С. Полупроводниковые гетероструктуры со сверхтонкими напряженными квантовыми ямами и лазеры спектрального диапазона 1525-1565 нм на их основе: дис. к.ф.-м.н. СПб, 2018]

Выходная оптическая мощность лазера пропорциональна разнице между величиной тока накачки и пороговым током ( $I - I_{th}$ ). Пороговый ток ( $I_{th}$ ) – это наименьшее значение тока накачки, при котором выполняется пороговое условие лазерной генерации. Пороговое условие лазерной генерации может быть определено следующим образом: оптическое усиление лазера равно суммарным оптическим потерям. Под суммарными оптическими потерями понимается сумма внутренних оптических потерь (например, потерь, связанных с поглощением фотонов на свободных носителях заряда, рассеянием на шероховатостях поверхности и др.) и потерь на вывод излучения. Вследствие влияния потерь и процессов безызлучательной рекомбинации часть излучения теряется и приводит к разогреву активной области.

Построение ватт-амперной характеристики позволяет определить характер изменения выходной оптической мощности в зависимости от тока накачки лазерного диода. В общем виде ватт-амперная характеристика описывается выражением, основанным на предположении о преобразовании тока накачки в выходную мощность с не зависящей от тока внешней дифференциальной эффективностью:

$$P_{out} = \eta(I - I_{th}) \quad | \quad I > I_{th} \quad , \quad (1.1)$$

где  $P_{out}$  – выходная оптическая мощность лазерного излучения,  $\eta$  – внешняя дифференциальная эффективность лазерного диода. Таким образом, внешняя дифференциальная эффективность может быть определена как отношение приращения выходной оптической мощности излучения к приращению тока накачки.

При малых токах накачки (в так называемом *допороговом режиме*,  $I < I_{th}$ ) выходная оптическая мощность определяется преимущественно спонтанным излучением, и величина внешней дифференциальной эффективности, определяемая как тангенс угла наклона зависимости к оси тока накачки, принимает малые значения. Напротив, при  $I > I_{th}$  (в так называемом *надпороговом режиме*) величина внешней дифференциальной эффективности резко возрастает, выходная мощность обусловлена преимущественно вынужденным излучением. Ограничение на возможность бесконечного роста выходной оптической мощности с увеличением тока накачки определяется действием различных факторов, примером которых может служить катастрофическое разрушение зеркал резонатора или разогрев активной области.

Вольт-амперной характеристикой лазера называется зависимость тока, протекающего через устройство, от падения напряжения на нем. При достижении

напряжения открытия  $U_0$ , соответствующего  $I_{th}$ , в лазерном диоде, как и любом другом диоде, наблюдается резкий рост тока. Пример типичной вольт-амперной характеристики инжекционного лазера приведен на рисунке 1.2.

В области достаточно больших токов накачки вольт-амперная характеристика инжекционного лазера может быть аппроксимирована выражением:

$$U = U_0 + R_S I, \quad (1.2)$$

где  $U_0$  – приложенное к лазерному диоду напряжение смещения,  $I$  – ток накачки,  $R_S$  – последовательное сопротивление элементов конструкции лазера. Последовательное сопротивление представляет собой сумму последовательных сопротивлений слоев гетероструктуры и контактного сопротивления.

Приближенная оценка коэффициента полезного действия (КПД) инжекционного лазера определяется следующим выражением:

$$\eta_c = \frac{\eta(I - I_{th})}{I(U_0 + IR_S)}, \quad (1.3)$$

где  $\eta_c$  – коэффициент полезного действия.

Из выражения (1.3) следует, что величина КПД инжекционного лазера зависит от тока накачки. При этом, резко возрастая при превышении порога, КПД постепенно снижается с ростом тока при работе в области больших потребляемых электрических мощностей, поскольку рост оптической мощности пропорционален первой степени тока, тогда как рост потребляемой электрической мощности пропорционален квадрату тока накачки. Таким образом, может быть определена величина оптимального тока накачки инжекционного лазера, при котором КПД излучателя будет максимальным. Тогда максимальное значение КПД полупроводникового диодного лазера может быть описано выражением:

$$\eta_{cmax} = \frac{\eta}{I_{th} R_S \left(1 + \sqrt{1 + \frac{U_0}{I_{th} R_S}}\right)^2}. \quad (1.4)$$

### 1.3. Схема выполнения лабораторной работы

Схема измерительного стенда, используемого для выполнения лабораторной работы по измерению электрических и энергетических характеристик лазерных диодов, представлена на рисунке 1.3.

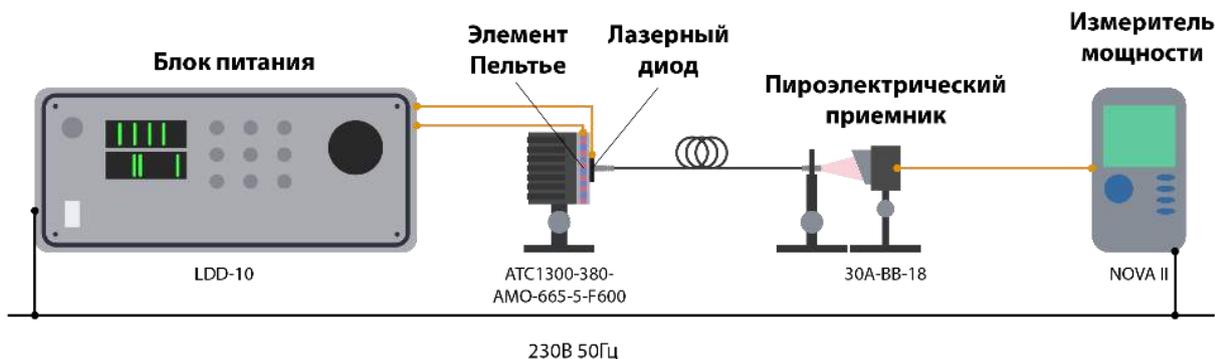


Рисунок 1.3 — Схематичное изображение измерительного стенда, используемого для выполнения лабораторной работы

### 1.4. Порядок выполнения лабораторной работы

Перед выполнением лабораторной работы необходимо ознакомиться с основными требованиями по электробезопасности, лазерной безопасности. Нарушение предъявляемых требований может привести к выходу из строя аппаратуры, поражению электрическим током, повреждению органов зрения.

#### 1.4.1. Подготовка

##### 1.4.1.1. Определение объекта испытаний

1.4.1.1.1. Получив у преподавателя указания о том, какой лазерный диод необходимо использовать для проведения измерений, необходимо визуально убедиться в целостности его элементов, записать название, изучить спецификацию и рабочие характеристики.

##### 1.4.1.2. Подготовка лазерной системы

1.4.1.2.1. Подключить блок питания и термостабилизации лазерных диодов LDD-10 (далее – блок питания) к полученному у преподавателя лазерному диоду, используя разъем «Laser Diode», расположенный на задней панели блока питания (рисунок 1.4);

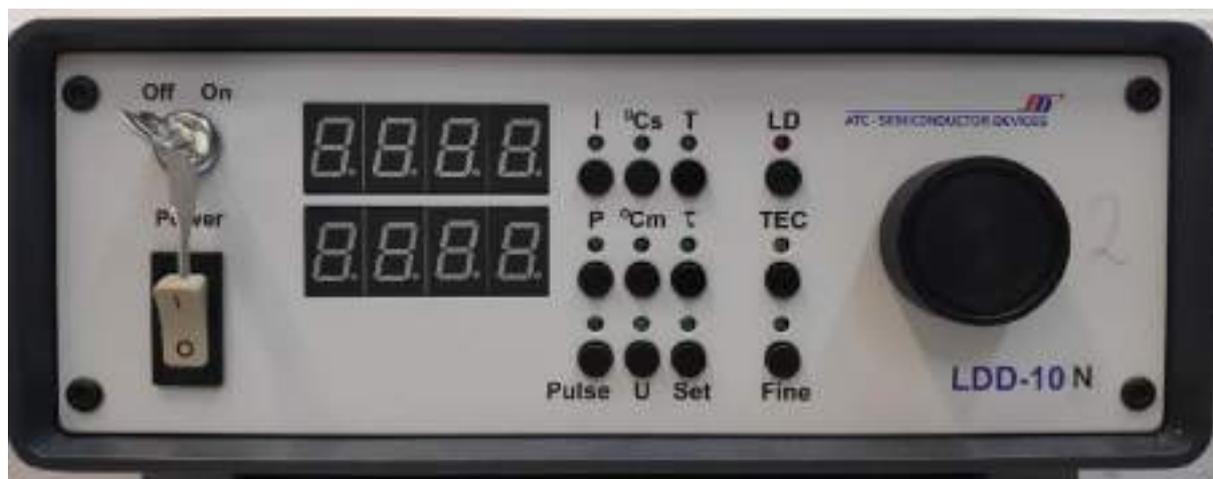


Рисунок 1.4 — Блок питания и термостабилизации лазерных диодов LDD-10. *I* – кнопка и индикатор «ток лазера»,  $^{\circ}\text{Cs}$  – кнопка и индикатор «заданная температура», *T* – кнопка и индикатор «период», *P* – кнопка и индикатор «мощность»,  $^{\circ}\text{Cm}$  – кнопка и индикатор «фактическая температура»,  $\tau$  – кнопка и индикатор «длительность импульса», *Pulse* – кнопка и индикатор «импульсный режим», *U* – кнопка и индикатор «напряжение», *Set* – кнопка и индикатор «установки», *LD* – кнопка и индикатор включения лазера, *TEC* – кнопка и индикатор «система термостабилизации», *Fine* – кнопка и индикатор «точная настройка», *On/Off* – положения ключа в замке блокировки, *Power* – тумблер включения блока питания и термостабилизации лазерных диодов LDD-10

**1.4.1.2.2.** Подключить блок питания к сети питания;

**1.4.1.2.3.** Подключить оптическое волокно к лазерному диоду, полученному у преподавателя;

**1.4.1.2.4.** Надежно закрепить оптическое волокно в держателе (рисунок 1.5) посредством вращения юстировочных винтов;



Рисунок 1.5 — Оптическое волокно в держателе

**1.4.1.2.5.** Включить блок питания с помощью кнопки включения на передней панели блока;

**1.4.1.2.6.** Повернуть ключ блокировки, расположенный на передней панели блока питания (рисунок 1.4), переходя от положения “Off” к положению “On”.

### **1.4.1.3. Подготовка измерителя мощности излучения**

**1.4.1.3.1.** Подключить блок управления измерителя мощности NOVA II (далее – блок управления измерителя мощности) к измерительной головке 30A-BB-18 (рисунок 1.6), используя разъем, расположенный на боковой панели блока управления измерителя мощности (рисунок 1.6);



Рисунок 1.6 — Блок управления измерителя мощности NOVA II с измерительной головкой 30A-BB-18

- 1.4.1.3.2.** Подключить блок управления измерителя мощности к сети питания;
- 1.4.1.3.3.** Включить блок управления измерителя мощности, используя кнопку включения, расположенную на передней панели прибора (рисунок 1.6);
- 1.4.1.3.4.** Выбрать на блоке управления измерителя мощности требуемый диапазон длин волн излучения, используя кнопки управления, расположенные на передней панели прибора. Для подтверждения выбора необходимо нажать круглую кнопку, расположенную на передней панели прибора;
- 1.4.1.3.5.** Выбрать на блоке управления измерителя мощности требуемый диапазон измеряемой мощности, используя кнопки управления, расположенные на передней панели прибора. Для подтверждения выбора необходимо нажать круглую кнопку, расположенную на передней панели прибора;
- 1.4.1.3.6.** Расположить измерительную головку 30А-ВВ-18 измерителя мощности излучения перед оптическим волокном таким образом, чтобы максимальная доля излучения лазерного диода приходилась на приемную площадку измерительной головки 30А-ВВ-18, при этом торец оптического волокна не должен соприкасаться с приемной площадкой измерительной головки, чтобы избежать повреждения приемной площадки (рисунок 1.7).

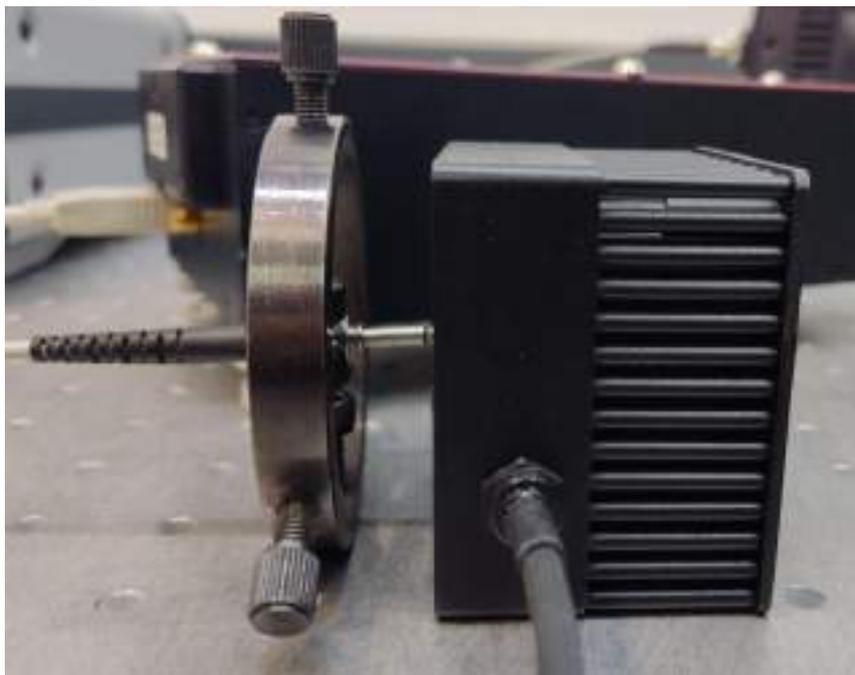


Рисунок 1.7 — Расположение измерительной головки 30А-ВВ-18 измерителя мощности и оптического волокна излучателя

#### **1.4.1.4. Установка исходных параметров системы**

- 1.4.1.4.1.** Установить температуру термостабилизации лазерного диода (температуру грани элемента Пельтье), удерживая в течение 2–3 секунд кнопку

«заданная температура» °C<sub>s</sub> блока питания, расположенную на передней панели прибора (рисунок 1.4);

**1.4.1.4.2.** При мигании индикатора кнопки и отображении на верхнем индикаторе текущего значения выбранного параметра вращением регулятора величины параметров установить значение температуры термостабилизации лазерного диода, равное 20°C для лазерного диода АТС1300-380-АМО-665-5-F600, либо 25°C для лазерного диода АТС-С2000-100-АМО-810-5-F600;

**1.4.1.4.3.** Установить на индикаторе блока питания ток накачки лазерного диода, равный 0 А, кратковременно нажав кнопку «ток лазера» *I*, расположенную на передней панели блока питания, а затем повернув регулятор величины параметров.

## **1.4.2. Проведение измерений**

**1.4.2.1. Исследование вольт-амперной и ватт-амперной характеристики лазерного диода**

**1.4.2.1.1.** Надеть средства индивидуальной защиты органов зрения – очки;

**1.4.2.1.2.** Убедиться, что индикатор кнопки «система термостабилизации» *TEC*, расположенной на передней панели блока питания, горит. В противном случае активировать режим термостабилизации лазерного диода кратковременным нажатием на кнопку «система термостабилизации» *TEC*;

**1.4.2.1.3.** Включить накачку торцевого лазерного диода кратковременным нажатием на кнопку включения *LD*, расположенную на передней панели блока питания (рисунок 1.4). При этом индикатор кнопки будет гореть непрерывно;

**1.4.2.1.4.** Установить ток накачки лазерного диода, равный 50 мА, нажав последовательно кнопку «ток лазера» *I* и кнопку «точная настройка» *Fine*, расположенные на передней панели блока питания, а затем плавно поворачивая регулятор величины параметра;

**1.4.2.1.5.** Зафиксировать установленный ток накачки лазерного диода, отображенный на цифровом табло на передней панели блока питания;

**1.4.2.1.6.** Зафиксировать значение прямого падения напряжения, нажав на кнопку «падение напряжения» *U*, расположенную на передней панели блока питания. Значение параметра отобразится в нижней части цифрового табло;

**1.4.2.1.7.** Зафиксировать значение выходной оптической мощности, отображенное на экране блока управления измерителя мощности;

**1.4.2.1.8.** Занести полученные результаты в протокол измерений;

**1.4.2.1.9.** Повторить действия п. 1.4.2.1.4–1.4.2.1.8 с шагом 50 мА до достижения значения выходной оптической мощности 1 Вт. При этом кнопки *I* и *Fine* при каждом изменении величины тока накачки нажимать не требуется;

**1.4.2.1.10.** После завершения измерений плавным постепенным поворотом регулятора величины параметра установить значение тока накачки 0 мА;

**1.4.2.1.11.** Выключить накачку нажатием кнопки *LD*, расположенной на передней панели блока питания.

### **1.4.3. Обработка результатов**

#### **1.4.3.1. Обработка полученных данных**

**1.4.3.1.1.** Обработать полученные результаты в программном обеспечении, позволяющем работать с двумерными массивами данных (Microsoft Excel, Origin, MathCad, MATLAB, Wolfram Mathematica и т.д.) с целью описания и графического представления зависимостей тока накачки от прямого падения напряжения и выходной оптической мощности от тока накачки, т.е. построить по измеренным точкам вольт-амперную и ватт-амперную характеристики лазерного диода, соответственно;

**1.4.3.1.2.** Определить значение порогового тока накачки по построенной зависимости выходной оптической мощности от тока накачки, отобразить полученное значение на графике зависимости выходной оптической мощности от тока накачки;

**1.4.3.1.3.** Определить значение коэффициента полезного действия лазерной системы, используемой в качестве измерительного стенда в лабораторной работе, как отношение полезной мощности лазерной системы к потребляемой.

### **1.5. Форма отчета**

Форма отчета должна соответствовать предъявляемым в Приложении А требованиям к отчету.

### **1.6. Рекомендуемый список литературы**

- ГОСТ 24714-81 Лазеры. Методы измерения параметров излучения. Общие положения;
- Жуков А. Е. Лазеры на основе полупроводниковых наноструктур. – Элмор. – 2007;
- Жуков А. Е., Максимов М. В. Современные инжекционные лазеры. – Издательство Политехнического университета. – 2009;
- Кейси Х., Паниш М. Лазеры на гетероструктурах. – перевод с англ. А.Е. Дракина, в 2-х т. – М.: Мир, 1981;
- Зи С. Физика полупроводниковых приборов. – перевод с англ. В.А. Гергеля, под ред. Р.А. Суриса, в 2-х кн. – М.: Мир, 1984.

### **1.7. Контрольные вопросы**

- Конструкция лазерного диода с полосковым контактом;
- Вольт-амперная и ватт-амперная характеристики полупроводникового лазера;
- Внешняя дифференциальная эффективность и коэффициент полезного действия лазерного диода;
- Устройство и принцип работы измерителя лазерной мощности.

## Лабораторная работа 2. Исследование спектральных характеристик излучения и характеристической температуры лазерных диодов различных спектральных диапазонов

### 2.1 Цель

Исследовать спектральные характеристики излучения торцевых лазерных диодов видимого и ближнего инфракрасного диапазонов при различных токах и температурах термостабилизации, исследовать характеристическую температуру торцевых лазерных диодов.

### 2.2 Краткие теоретические сведения

#### 2.2.1 Спектр лазерного излучения

Спектром, в общем случае, называется распределение значений какой-либо физической величины, характеризующей или описывающей процесс или систему. В данной работе под термином «спектр» подразумевается электромагнитный спектр, то есть распределение интенсивности электромагнитного излучения по частотам или по длинам волн (рисунок 2.1).

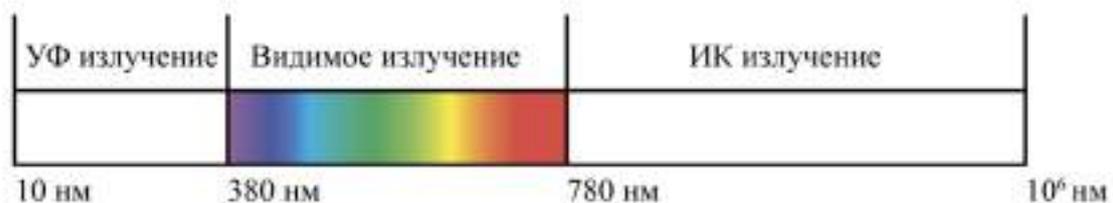


Рисунок 2.1 — Оптическая область спектра электромагнитных волн

Длина волны лазерного излучения зависит как от особенностей конструкции лазера (в том числе от частотных характеристик резонатора), так и от материалов активной области лазера (в том числе от положения максимума спектральной области усиления). В лабораторной работе под длиной волны излучения лазера понимается длина волны, соответствующая максимальной выходной оптической мощности.

Примеры спектральных характеристик многомодовых и одномодовых лазерных диодов представлены на рисунке 2.2. Как видно из рисунка, спектр излучения лазерного диода составлен из относительно узких линий, соответствующих правилам отбора лазерного резонатора. Спектральная ширина  $\Delta\lambda$  (ширина спектра излучения) может быть оценена, например, как интервал длин волн, в котором спектральная мощность будет составлять половину от

максимальной – полная ширина на уровне половины высоты (от англ. FWHM, full width at half maximum).

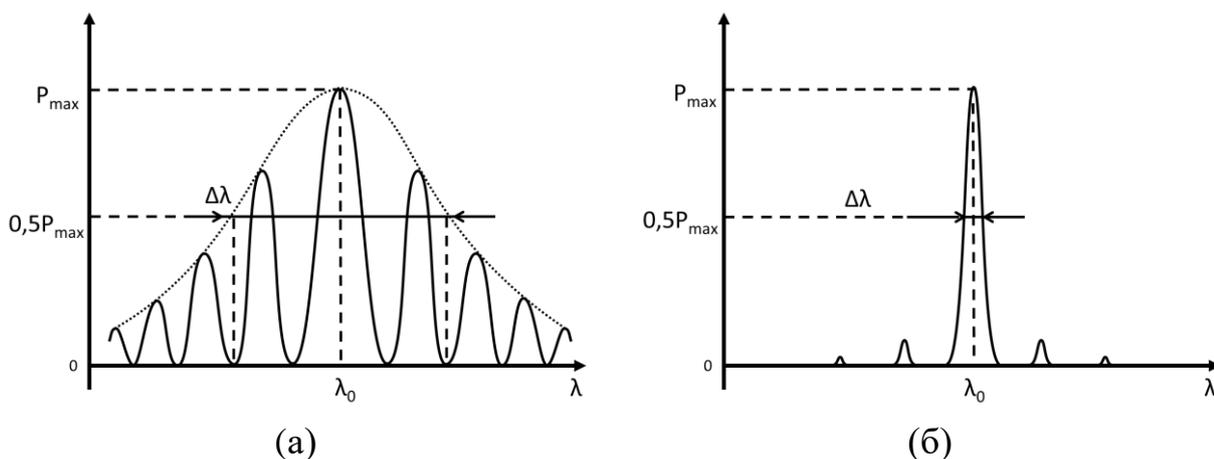


Рисунок 2.2 – Примеры спектральных характеристик многомодовых (а) и одномодовых (б) лазерных диодов.  $\lambda_0$  – длина волны излучения лазера,  $\Delta\lambda$  – ширина спектра излучения,  $P_{max}$  – максимальная выходная оптическая мощность

### 2.2.2 Спектрометр

Спектрометром называется устройство, предназначенное для измерения спектральных компонент исследуемого физического явления. Использование различных спектрометров позволяет исследовать различные физические процессы. Так, например, масс-спектрометр измеряет отношения массы к заряду ионов, электрон-спектроскопия включает анализ энергии электронов. Оптические спектрометры позволяют исследовать зависимость интенсивности излучения от длины волны (частоты). Одной из наиболее распространенных оптических схем, лежащих в основе конструкции спектрометров, является схема монохроматора Черни Тернера, включающая входную спектральную щель, коллиматорный объектив, диспергирующий элемент (например, дифракционная решетка, призму), фокусирующий объектив и выходную спектральную щель, выделяющую излучение узкого интервала длин волн. Схематическое изображение оптического спектрометра на основе дифракционной решетки представлено на рисунке 2.3.

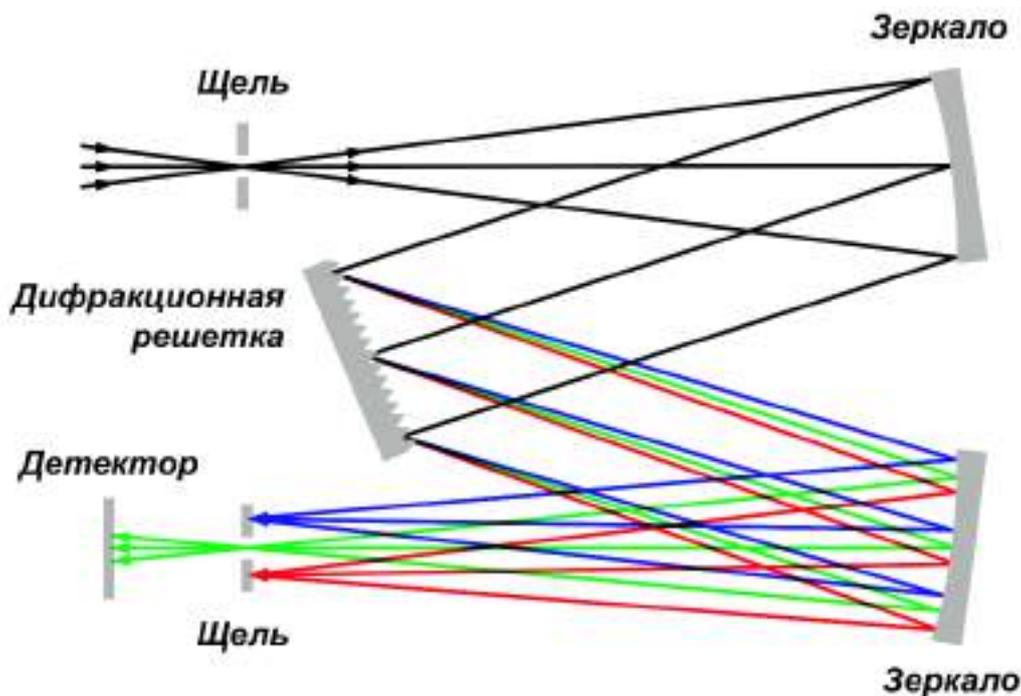


Рисунок 2.3 — Схематическое изображение устройства монохроматора Черни-Тернера

Функциональные характеристики спектрометра связаны с совокупностью его конструктивных элементов. Оптическая щель спектрометра, определяющая такие рабочие характеристики спектрометра, как оптическое разрешение (минимально разрешимая длина волны, регистрируемая спектрометром), пропускная способность (минимальный уровень сигнала, регистрируемый спектрометром), угол расходимости излучения (максимально допустимый угол ввода излучения в спектрометр), пропускает и визуализирует излучение, поступающее в анализатор устройства. Размер апертуры входной щели может варьироваться (от 5 мкм до 1 мм), но преимущественно используются щели, размер которых не превышает 0,5 мм. В случае, если для ввода излучения в спектрометр используется оптическое волокно, размер щели совпадает с размером волокна для повышения пропускной способности спектрометра и снижения рассеяния входящего излучения.

Прошедшее через входную щель излучение отражается от зеркала и попадает на дифракционную решетку. Попавшее на дифракционную решетку излучение раскладывается на отдельные пучки когерентного света в зависимости от периода штрихов дифракционной решетки и угла, под которым они расположены.

Разделенное по длинам волн излучение после отражения от зеркала проходит через выходную щель, обычно сопоставимую по размерам с входной щелью, и регистрируется детектором. Дифракционная решетка поворачивается

вокруг своей оси для сканирования спектрального интервала, поэтому можно измерять интенсивность света как функцию от длины волны.

При исследовании лазерного излучения достаточно высокой мощности избежать повреждения элементов оптической системы спектрометра можно при использовании оптических аттенюаторов (например, светофильтров).

### 2.2.3 Термостабилизация лазерного излучения

Для достижения стабильности режимов работы лазера необходимым условием является контроль температуры устройства, поскольку длина волны излучения полупроводникового лазерного диода имеет сильную зависимость не только от тока накачки, но и от температуры активной области. При неизменных токе накачки и температуре можно добиться постоянства выходной оптической мощности (соответственно, при изменении температуры при постоянном токе оптическая мощность будет изменяться). В свою очередь, отсутствие температурного контроля ввиду нежелательных теплообразующих процессов ведет к ухудшению таких характеристик лазера, как пороговый ток и выходная мощность, а также снижению срока службы лазерных излучателей.

Наиболее частым решением проблемы охлаждения лазерного диода является размещение его кристалла на активном теплоотводящем элементе, в качестве которого может выступать элемент Пельтье. Обычно данный элемент соединён с радиатором, обладающим достаточной теплоемкостью и площадью поверхности для осуществления теплоотвода, и элементами воздушного/жидкостного охлаждения (рисунок 2.4).

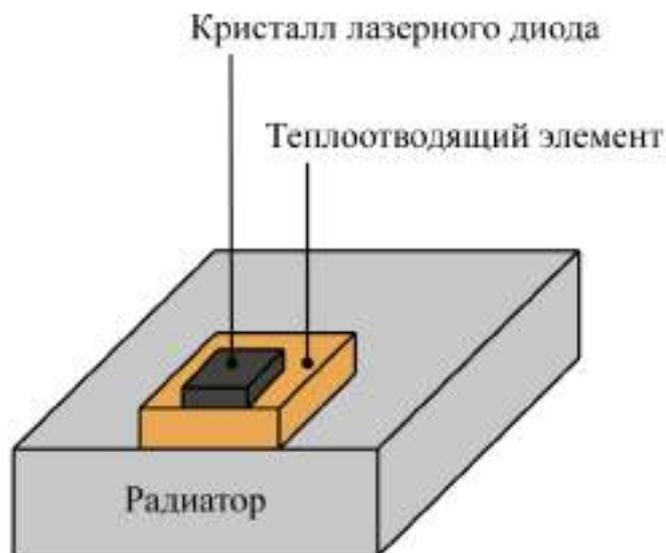


Рисунок 2.4 — Схема расположения кристалла лазерного диода на теплоотводящем элементе

Элемент Пельтье – это термоэлектрический преобразователь, основанный на эффекте Пельтье, конструктивно представляет собой совокупность термопар, через которые протекает электрический ток, изменяя величину и полярность которого, можно контролировать разность температур на рабочих поверхностях. Его основными параметрами являются рабочий ток, напряжение и максимальная холодопроизводительность, измеряемая в ваттах. Пример размещения кристалла лазерного диода на элементах системы теплоотвода представлен на рисунке 2.5. При разогреве кристалла происходит изменение сопротивления термистора, расположенного вблизи излучателя. Изменение сопротивления термистора влияет на усилительный каскад элемента Пельтье, и проходящий через элемент Пельтье ток изменяется для компенсации изменения температуры кристалла лазерного диода в процессе работы.

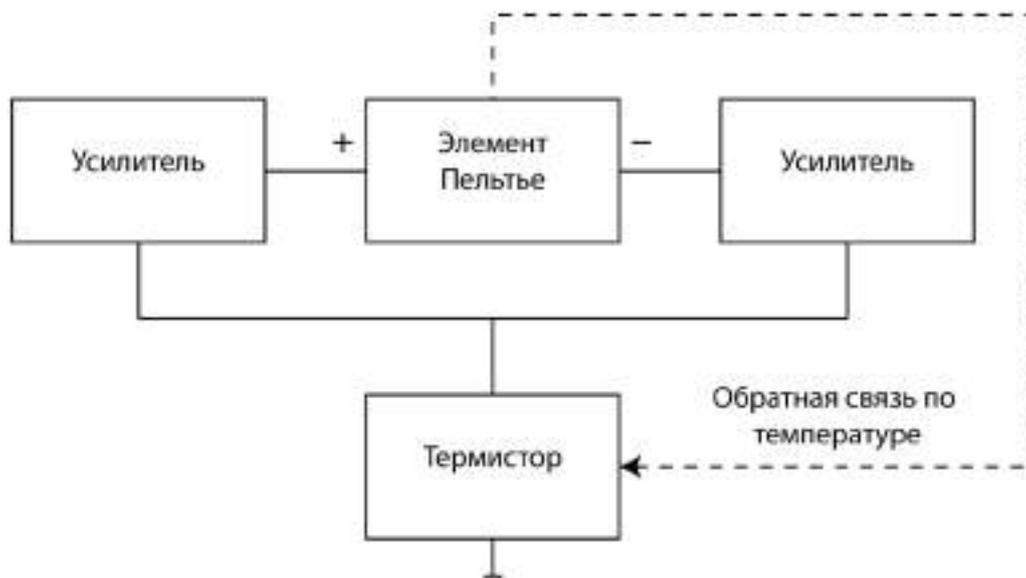


Рисунок 2.5 — Схема системы охлаждения, основанной на элементе Пельтье

#### 2.2.4 Характеристическая температура порогового тока

Для полупроводниковых лазеров характерно изменение порогового тока (плотности порогового тока) при изменении температуры. Зависимость может быть описана следующим выражением:

$$J_{th}(T + \Delta T) = J_{th}(T)e^{\frac{\Delta T}{T_0}}, \quad (2.1)$$

где  $J_{th}$  – пороговая плотность тока,  $T$  – температура,  $\Delta T$  – приращение температуры внутри интервала изменения,  $T_0$  – характеристическая температура.

Исходя из выражения (2.1), изменение величины порогового тока лазера обратно пропорционально определяющей его характеристической температуре –

чем ниже характеристическая температура, тем сильнее увеличивается пороговый ток при увеличении температуры на  $\Delta T$ . Предельным случаем данной зависимости можно считать полупроводниковый лазер, пороговый ток которого не зависит от температуры. Подобное поведение может наблюдаться в том случае, если характеристическая температура стремится к бесконечности.

На практике для описания параметров лазеров наиболее часто используются характеристические температуры для ограниченных диапазонов температур измерения, поскольку экспериментально установленная зависимость величины порогового тока от температуры несколько отличается от идеального экспоненциального распределения – описание параметров лазера с помощью одного фиксированного значения характеристической температуры не является возможным. Заданная температурными зависимостями внутренних потерь и тока прозрачности аналитическая модель для определения характеристической температуры, в достаточной степени справедливая для всех типов полупроводниковых лазеров, может быть представлена в следующем виде:

$$\frac{1}{T_0} = \frac{1}{T_{0tr}} + \frac{1}{G_0} \frac{d\alpha_{in}}{dT}, \quad (2.2)$$

где  $T_{0tr}$  – характеристическая температура тока прозрачности,  $G_0$  – произведение параметра материального оптического усиления и фактора оптического ограничения,  $\alpha_{in}$  – внутренние оптические потери.

Методика, используемая для экспериментальной оценки характеристической температуры, включает в себя серию измерений величины порогового тока при различных температурах, лежащих внутри определенных замкнутых диапазонов.

### **2.3 Схема выполнения лабораторной работы**

Схема измерительного стенда, используемого для выполнения части лабораторной работы по измерению спектральных характеристик лазерного диода представлена на рисунке 2.6, а по измерению характеристической температуры лазерного диода представлена на рисунке 2.7.

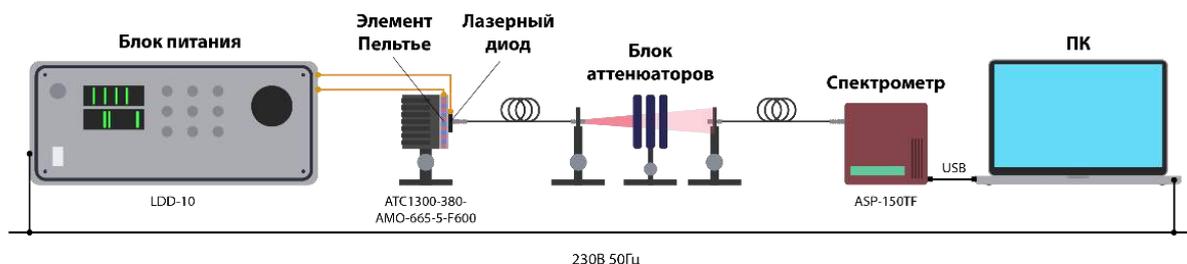


Рисунок 2.6 — Схематичное изображение измерительного стенда, используемого для выполнения части лабораторной работы по измерению спектральных характеристик лазерного диода

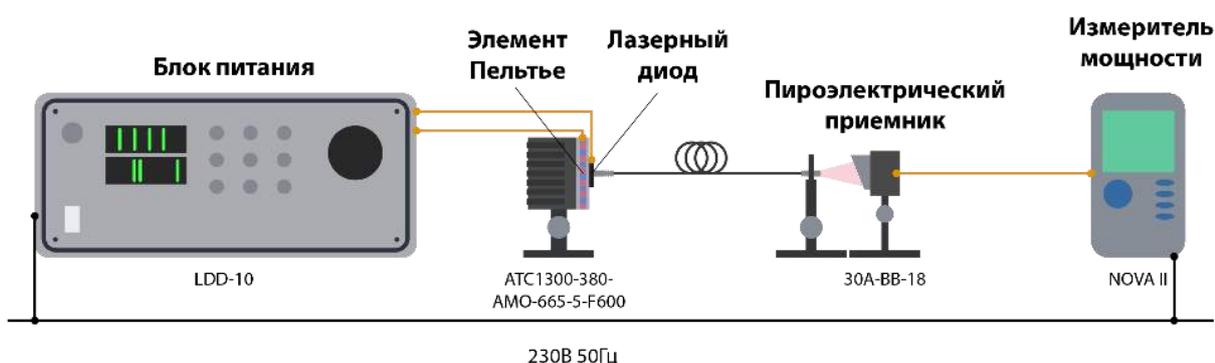


Рисунок 2.7 — Схематичное изображение измерительного стенда, используемого для выполнения части лабораторной работы по измерению характеристической температуры лазерного диода

## 2.4 Порядок выполнения лабораторной работы

Перед выполнением лабораторной работы необходимо ознакомиться с основными требованиями по электробезопасности, лазерной безопасности. Нарушение предъявляемых требований может привести к выходу из строя аппаратуры, поражению электрическим током, повреждению органов зрения.

### 2.4.1 Подготовка

#### 2.4.1.1. Определение объекта испытаний

2.4.1.1.1. Получив у преподавателя указания о том, какой лазерный диод необходимо использовать для измерений, необходимо визуально убедиться в

целостности его элементов, записать название, изучить спецификацию, рабочие характеристики.

#### 2.4.1.2. Подготовка лазерной системы

2.4.1.2.1. Подключить блок питания и термостабилизации лазерных диодов LDD-10 (далее – блок питания) к полученному у преподавателя лазерному диоду, используя разъем, расположенный на задней панели блока питания (рисунок 2.8);

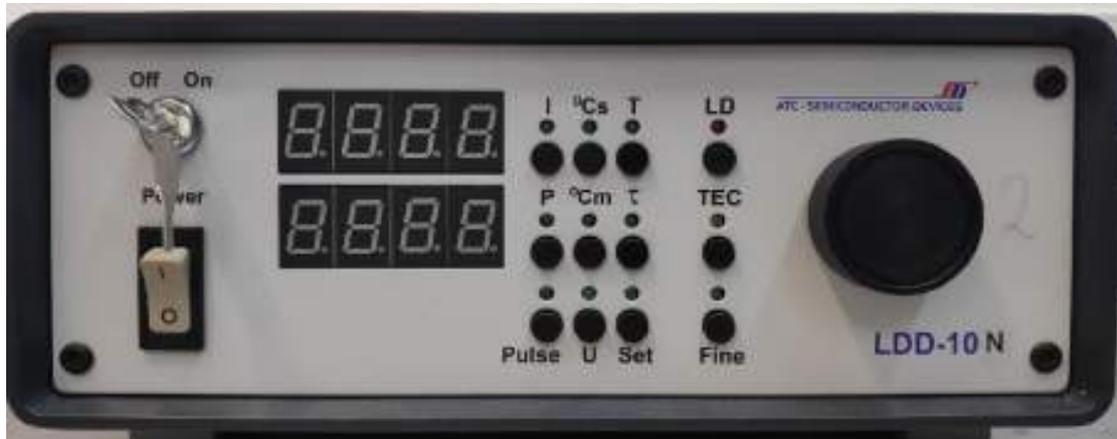


Рисунок 2.8 — Блок питания и термостабилизации лазерных диодов LLD-10. *I* – кнопка и индикатор «ток лазера»,  $^{\circ}Cs$  – кнопка и индикатор «заданная температура», *T* – кнопка и индикатор «период», *P* – кнопка и индикатор «мощность»,  $^{\circ}Cm$  – кнопка и индикатор «фактическая температура»,  $\tau$  – кнопка и индикатор «длительность импульса», *Pulse* – кнопка и индикатор «импульсный режим», *U* – кнопка и индикатор «напряжение», *Set* – кнопка и индикатор «установки», *LD* – кнопка и индикатор включения лазера, *TEC* – кнопка и индикатор «система термостабилизации», *Fine* – кнопка и индикатор «точная настройка», *On/Off* – положения ключа в замке блокировки, *Power* – тумблер включения блока питания и термостабилизации лазерных диодов LDD-10

- 2.4.1.2.2. Подключить блок питания к сети питания;
- 2.4.1.2.3. Подключить оптическое волокно к лазерному диоду, полученному у преподавателя;
- 2.4.1.2.4. Надежно закрепить оптическое волокно в держателе посредством вращения юстировочных винтов;
- 2.4.1.2.5. Включить блок питания с помощью кнопки включения на передней панели блока (рисунок 2.8);
- 2.4.1.2.6. Повернуть ключ блокировки, расположенный на передней панели блока питания (рисунок 2.8), переходя от положения “Off” к положению “On”.

### **2.4.1.3. Подготовка спектрометра и персонального компьютера с установленным специализированным программным обеспечением**

- 2.4.1.3.1. Установить и надежно закрепить оптическое волокно спектрометра в держателе напротив оптического волокна лазерной системы посредством вращения юстировочных винтов;
- 2.4.1.3.2. Расположить перед оптическим волокном спектрометра по ходу лазерного пучка светофильтры для снижения интенсивности излучения (рисунок 2.9);

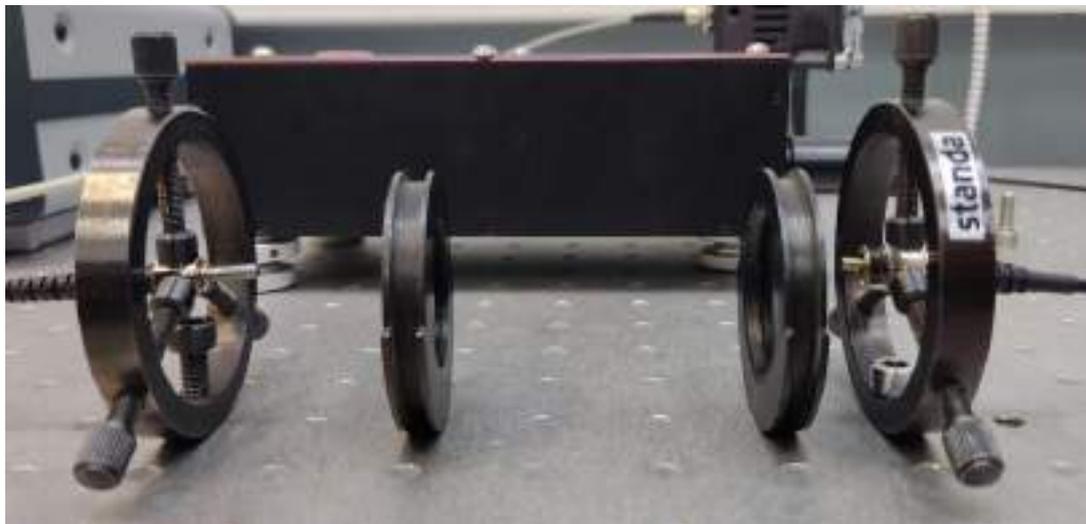


Рисунок 2.9 — Схема расположения оптического волокна спектрометра ASP-150TF, оптического волокна торцевого лазерного диода и светофильтров

- 2.4.1.3.3. Подключить спектрометр (рисунок 2.10) к персональному компьютеру (далее - ПК) с помощью USB-кабеля;



Рисунок 2.10 — Спектрометр ASP-150TF

**2.4.1.3.4.** Открыть на ПК специализированное программное обеспечение ReSpect, предназначенное для визуализации и обработки результатов измерений;

**2.4.1.3.5.** Загрузить файлы спектральной калибровки для требуемого диапазона измерения длин волн, выбрав в меню “Settings” пункт “Hot list” и выделив требуемый диапазон из представленных.

#### **2.4.1.4. Установка исходных параметров системы**

**2.4.1.4.1.** Установить температуру термостабилизации лазерного диода (температуру грани элемента Пельтье), удерживая в течение 2–3 секунд кнопку «заданная температура» °C<sub>s</sub> блока питания, расположенную на передней панели прибора (рисунок 2.8);

**2.4.1.4.2.** При мигании индикатора кнопки и отображении на верхнем индикаторе текущего значения выбранного параметра вращением регулятора величины параметров установить значение температуры термостабилизации лазерного диода, равное 20°C для лазерного диода АТС1300-380-АМО-665-5-F600, либо 25°C для лазерного диода АТС-С2000-100-АМО-810-5-F600;

**2.4.1.4.3.** Установить на индикаторе блока питания ток накачки лазерного диода, равный 0 А, кратковременно нажав кнопку «ток лазера» *I*, расположенную на передней панели блока питания, а затем повернув регулятор величины параметров.

### **2.4.2 Проведение измерений**

**2.4.2.1. Проведение измерений спектра торцевого лазерного диода при различных токах накачки**

**2.4.2.1.1.** Надеть средства индивидуальной защиты органов зрения – очки;

**2.4.2.1.2.** Убедиться, что индикатор кнопки «система термостабилизации» *ТЕС*, расположенной на передней панели блока питания, горит. В противном случае

активировать режим термостабилизации лазерного диода кратковременным нажатием на кнопку «система термостабилизации» *TEC*;

**2.4.2.1.3.** Включить накачку торцевого лазерного диода кратковременным нажатием на кнопку включения *LD*, расположенную на передней панели блока питания (рисунок 2.8). При этом индикатор кнопки будет гореть непрерывно;

**2.4.2.1.4.** Установить ток накачки лазерного диода, равный 100 мА, нажав предварительно кнопку «ток лазера» *I*, расположенную на передней панели блока питания, а затем плавно поворачивая регулятор величины параметра;

**2.4.2.1.5.** Зафиксировать наблюдаемое спектральное распределение излучения торцевого лазерного диода посредством экспорта полученного массива данных (меню File – пункт Export ASCII) в предварительно созданную на рабочем столе ПК папку учебной группы;

**2.4.2.1.6.** Повторить действия п. 2.4.2.1.4 и 2.4.2.1.5 с шагом 100 мА до достижения величины тока накачки 2 А. При этом кнопку *I* повторно нажимать при каждом измерении не требуется;

#### **2.4.2.2. Проведение измерений спектра торцевого лазерного диода при различной температуре термостабилизации**

**2.4.2.2.1.** Установить ток накачки лазерного диода, равный 2 А, нажав кнопку «ток лазера» *I*, расположенную на передней панели блока питания, а затем плавно поворачивая регулятор величины параметра;

**2.4.2.2.2.** Установить температуру термостабилизации лазерного диода, равную 15°C, руководствуясь инструкциями п. 2.4.1.4.1 и 2.4.1.4.2;

**2.4.2.2.3.** Зафиксировать наблюдаемое спектральное распределение излучения торцевого лазерного диода посредством экспорта полученного массива данных (меню File – пункт Export ASCII) в папку учебной группы;

**2.4.2.2.4.** Повторить действия п. 2.4.2.2.1, 2.4.2.2.3 с шагом 100 мА до достижения величины тока накачки 0 А. При этом кнопку *I* повторно нажимать при каждом измерении не требуется.

**2.4.2.2.5.** Повторить измерения спектрального распределения излучения торцевого лазерного диода при температурах 20°C, 25°C, 30°C (для лазерного диода АТС1300-380-АМО-665-5-F600 не требуется измерение при 20°C, для лазерного диода АТС-С2000-100-АМО-810-5-F600 не требуется измерение при 25°C) для диапазона токов накачки от 0 до 2 А с шагом 100 мА;

**2.4.2.2.6.** После завершения измерений плавным постепенным поворотом регулятора величины параметра установить значение тока накачки 0 мА;

**2.4.2.2.7.** Выключить ток накачки нажатием кнопки *LD* на передней панели блока питания.

### 2.4.2.3. Проведение исследования характеристической температуры

2.4.2.3.1. Установить температуру термостабилизации лазерного диода, равную 15°C;

2.4.2.3.2. Подключить блок управления измерителя мощности NOVA II (далее – блок управления измерителя мощности) к измерительной головке 30А-ВВ-18, используя разъем, расположенный на боковой панели блока управления (рисунок 2.11);



Рисунок 2.11 — Блок управления измерителя мощности NOVA II с измерительной головкой 30А-ВВ-18

2.4.2.3.3. Подключить блок управления измерителя мощности к сети питания;

2.4.2.3.4. Включить блок управления измерителя мощности, используя кнопку включения, расположенную на передней панели прибора (рисунок 2.11);

2.4.2.3.5. Выбрать на блоке управления измерителя мощности требуемый диапазон длин волн излучения, используя кнопки управления, расположенные на передней панели прибора. Для подтверждения выбора необходимо нажать круглую кнопку, расположенную на передней панели прибора;

2.4.2.3.6. Выбрать на блоке управления измерителя мощности требуемый диапазон измеряемой мощности, используя кнопки управления, расположенные на передней панели прибора. Для подтверждения выбора необходимо нажать круглую кнопку, расположенную на передней панели прибора;

2.4.2.3.7. Расположить измерительную головку 30А-ВВ-18 измерителя мощности излучения перед оптическим волокном таким образом, чтобы максимальная доля излучения лазерного диода приходилась на приемную площадку измерительной

головки 30A-BB-18, при этом не допускать соприкосновения торца оптического волокна с площадкой измерительной головки, чтобы избежать повреждения измерительной площадки;

**2.4.2.3.8.** Включить накачку торцевого лазерного диода кратковременным нажатием на кнопку включения лазера *LD*, расположенную на передней панели блока питания. При этом индикатор кнопки будет гореть непрерывно;

**2.4.2.3.9.** Установить пороговый ток накачки лазерного диода, плавно поворачивая регулятор величины параметра. В случае необходимости использовать прецизионное изменение величины параметра, нажав кнопку *Fine* на передней панели блока питания. Порог начала лазерной генерации фиксировать по показаниям измерителя мощности излучения (пороговый критерий – 50 мВт);

**2.4.2.3.10.** Зафиксировать в протоколе измерений величину порогового тока при заданной температуре термостабилизации;

**2.4.2.3.11.** Повторить измерения п. 2.4.2.3.9 и 2.4.2.3.10 для диапазона температур от 15 °С до 30 °С с шагом 1 °С.

### 2.4.3 Обработка результатов

#### 2.4.3.1. Обработка полученных данных

**2.4.3.1.1.** Обработать полученные результаты в программном обеспечении, позволяющем работать с двумерными массивами данных (Microsoft Excel, Origin, MathCad, MATLAB, Wolfram Mathematica и т.д.) с целью описания и графического представления зависимостей центральной длины волны и ширины спектра на полувысоте от тока накачки при температурах 15 °С, 20 °С, 25 °С, 30°С;

**2.4.3.1.2.** Рассчитать характеристическую температуру исследуемого торцевого лазерного диода для установленных преподавателем диапазонов температур, используя соотношение:

$$T_0 = \left( \frac{\Delta \ln I_{th}}{\Delta T} \right)^{-1}, \quad (2.3)$$

где  $I_{th}$  – пороговый ток,  $\Delta T$  – диапазон температур.

**2.4.3.1.3.** Рассчитать температурный коэффициент смещения центральной длины волны излучения лазера, используя соотношение:

$$T_\lambda = \frac{\Delta \lambda}{\Delta T}, \quad (2.4)$$

где  $T_\lambda$  – температурный коэффициент смещения центральной длины волны излучения лазера,  $\Delta \lambda$  – разность величин центральной длины волны излучения лазера при различных температурах.

## **2.5 Форма отчета**

Форма отчета должна соответствовать предъявляемым в Приложении А требованиям к отчету.

## **2.6 Рекомендуемый список литературы**

— ГОСТ Р МЭК 61140-2000 Защита от поражения электрическим током. Общие положения по безопасности, обеспечиваемой электрооборудованием и электроустановками в их взаимосвязи;

— ГОСТ 24714-81 Лазеры. Методы измерения параметров излучения. Общие положения;

— Жуков А. Е. Лазеры на основе полупроводниковых наноструктур. – Элмор. – 2007;

— Жуков А. Е., Максимов М. В. Современные инжекционные лазеры. – Издательство Политехнического университета. – 2009;

— Пихтин А. Н. Оптическая и квантовая электроника. – Издательство "Высшая Школа". – 2001;

— Кейси Х., Паниш М. Лазеры на гетероструктурах. – перевод с англ. А.Е. Дракина, в 2-х т. – М.: Мир, 1981;

— Зи С. Физика полупроводниковых приборов. – перевод с англ. В.А. Гергеля, под ред. Р.А. Сурица, в 2-х кн. – М.: Мир, 1984.

## **2.7 Контрольные вопросы**

— Спектр электромагнитного излучения;

— Спектр излучения лазерного диода;

— Влияние температуры на спектральное распределение излучения лазерного диода;

— Характеристическая температура порогового тока полупроводникового лазера;

— Устройство и принцип работы элемента Пельтье.

### **Лабораторная работа 3.**

## **Исследование пространственного распределения интенсивности излучения линейки лазерных диодов**

### **3.1. Цель**

Исследовать неоднородность пространственного распределения интенсивности лазерного излучения линейки лазерных диодов в дальнем поле.

### **3.2. Краткие теоретические сведения**

#### **3.2.1. Линейка лазерных диодов**

Выходные оптические мощности инжекционных лазеров в многомодовом непрерывном режиме генерации достигают 10 Вт. Дальнейшее повышение выходной оптической мощности, необходимое для ряда областей применения, к числу которых можно отнести, к примеру, промышленность и медицину, возможно за счет объединения единичных излучателей в линейки, массивы, решетки, модули. Полупроводниковая лазерная линейка состоит из ряда активных областей, представляющих собой группу параллельно расположенных полосковых лазеров.

Доля площади, занимаемая активными областями, называется фактором заполнения и может варьироваться от 10 до 100% в зависимости от особенностей конструкции и области применения лазерной линейки. Эффективность лазерных линеек по современным оценкам превышает 30% и может возрастать до 50% в случае использования структур с раздельным оптическим и электронным ограничением.

При использовании лазерных линеек одним из наиболее важных аспектов, влияющих на ее функциональность, является вопрос охлаждения. Радиатор прикрепляется под монтажной подложкой, а его функция заключается в отводе тепла от кристаллов лазеров. Дополнительно радиатор используется в качестве механической основы, причем иногда он совмещен с монтажной подложкой. Также, в ряде случаев, в дополнение к радиатору используется жидкостное, воздушное или термоэлектрическое охлаждение.

Типичная лазерная линейка открытого типа, состоящая из нескольких излучателей, показана на рисунке 3.1. Здесь множество полосковых лазерных диодов, имеющих металлизацию со стороны подложки, размещается с использованием пайки на металлической пластине, которая обеспечивает теплоотвод и является общим катодом для лазерной линейки. В свою очередь, на металлическую пластину наносится изоляционный слой и дополнительный слой металлизации, который является общим анодом лазерной линейки за счет индивидуальной разварки проволочными контактами с каждым из представленных полосковых диодов.

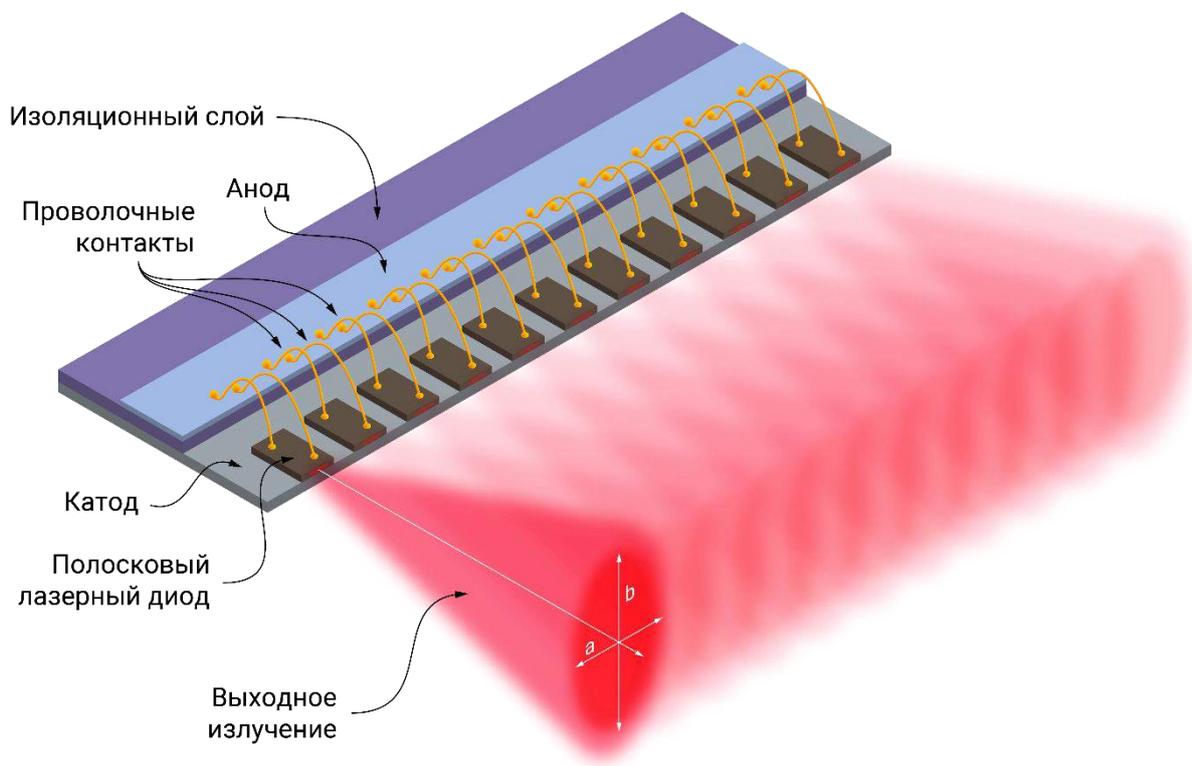


Рисунок 3.1 — Устройство линейки лазерных диодов

### 3.2.2. Ближняя и дальняя зона излучения

Выходной луч лазера образуется фотонами, покинувшими резонатор через выходное зеркало, а по мере распространения и удаления от выходного зеркала выходной луч расширяется в пространстве. Угловой характер распределения интенсивности лазерного излучения и его расходимость определяют возможности практического применения полупроводниковых лазеров. Для исследования распределения интенсивности лазерного излучения обычно изучаются картины распределения интенсивности, получаемые в двух пространственных областях излучения – ближнем и дальнем поле.

Картинами дальнего поля называются угловые профили интенсивности излучения лазера, наблюдаемые в области, достаточно удаленной от выходного зеркала лазера. Таким образом, при наблюдении в дальнем поле лазерный диод может быть рассмотрен в качестве точечного источника излучения, характеризующегося диаграммой направленности. Можно определить, что областью дальнего поля лазерного излучения будет являться область, расположенная на расстоянии от выходного зеркала лазера, намного превышающем длину Рэлея. Длина Рэлея определяется как

$$z_R = \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda}, \quad (2.1)$$

где  $z_R$  – длина Рэлея,  $\omega_0$  – радиус лазерного пучка в перетяжке (перетяжкой луча называется координата такого сечения, в котором лазерный луч имеет наименьший радиус, применительно к излучению лазерного диода можно полагать, что перетяжка луча находится на выходном зеркале),  $\lambda$  – длина волны излучения лазера.

Получаемые в дальнем поле картины распределения интенсивности отличаются в случае сканирования перпендикулярно плоскости р-п перехода – вертикальное распределение, и в плоскости р-п перехода – латеральное распределение. Вид картины ближнего поля определяет вид распределения интенсивности в дальнем поле при сканировании вдоль соответствующих направлений. Картины дальнего поля используются для оценки модового состава излучения лазера.

Областью ближнего поля лазерного излучения будет называться область, расположенная на расстоянии от выходного зеркала лазера менее рэлеевской длины. Профиль распределения интенсивности излучения в ближнем поле будет близок к профилю распределения интенсивности непосредственно на выходном зеркале.

### 3.2.3. Особенности излучения линейки лазерных диодов

Рисунок 3.2 показывает картину дальнего поля для каждого излучателя в лазерной линейке, а профиль интенсивности позволяет количественно определить относительное распределение интенсивности. Из рисунка видно, что профиль распределения интенсивности излучения линейки лазерных диодов в дальнем поле носит неоднородный характер ввиду действия ряда факторов, к числу которых можно отнести, например, неравномерное растекание тока, приводящее к неравномерному разогреву лазерных диодов в пределах линейки.

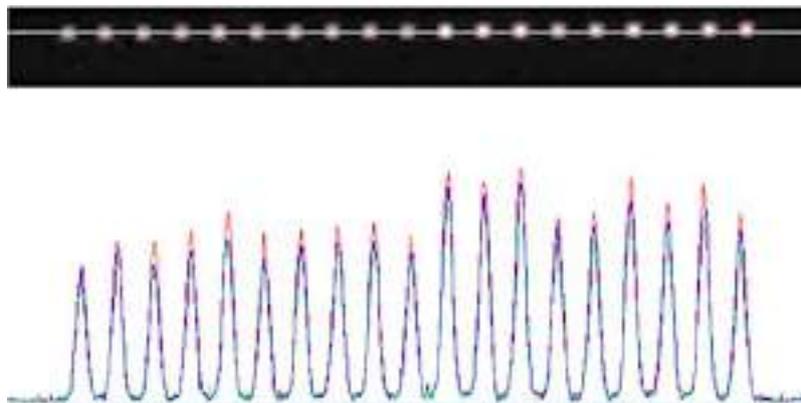


Рисунок 3.2 — Распределение интенсивности в дальнем поле линейки лазерных диодов

Используя диаграмму поля в ближней зоне излучения линейки лазерных диодов и особенно профиль интенсивности, можно найти разницу между отдельными излучателями линейки лазерных диодов, что является одним из подходов для оценки свойств линеек лазерных диодов, а также позволяет найти наиболее недолговечные его части. Знание распределения интенсивности линейки лазерных диодов в ближней зоне является важным для определения параметров лазерного излучения и уровня накачки.

### 3.3. Схема выполнения лабораторной работы

Схема измерительного стенда, используемого для выполнения лабораторной работы по исследованию пространственного распределения интенсивности излучения линейки лазерных диодов, представлена на рисунке 3.3.

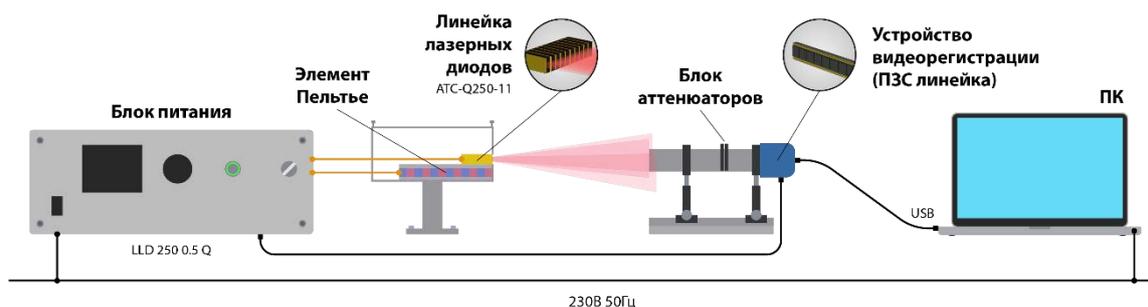


Рисунок 3.3 — Схематичное изображение измерительного стенда, используемого для выполнения лабораторной работы

### 3.4. Порядок выполнения лабораторной работы

Перед выполнением лабораторной работы необходимо ознакомиться с основными требованиями по электробезопасности, лазерной безопасности. Нарушение предъявляемых требований может привести к выходу из строя аппаратуры, поражению электрическим током, повреждению органов зрения.

#### 3.4.1. Подготовка

##### 3.4.1.1. Определение объекта испытаний

**3.4.1.1.1.** Получив у преподавателя указания о том, какая лазерная линейка используется для измерений, необходимо визуально убедиться в целостности элементов установки, записать название, изучить спецификацию, рабочие характеристики.

### 3.4.1.2. Подготовка лазерной системы и измерительного оборудования

3.4.1.2.1. Подключить устройство видеорегистрации и обработки сигналов к (рисунок 3.4) к персональному компьютеру (далее – ПК) при помощи USB-кабеля;



Рисунок 3.4 — Устройство видеорегистрации и обработки сигналов

3.4.1.2.2. Открыть на ПК специализированное программное обеспечение Diagram2007;

3.4.1.2.3. Подключить устройство видеорегистрации и обработки сигналов при помощи кабеля синхронизации к блоку управления линейкой лазерных диодов LLD-250-0,5Q (рисунок 3.5);



Рисунок 3.5 — Блок управления LLD-250-0,5Q. *БЛОКИРОВКА* – положения *ВКЛ/ВЫКЛ* ключа в замке блокировки, *СТАРТ/СТОП* – кнопка включения и выключения накачки линейки лазерных диодов, *УСТАНОВКА* – регулятор величины параметра

- 3.4.1.2.4.** Разместить оптические фильтры с номерами 1, 2 во вспомогательном тубусе устройства видеорегистрации и обработки сигналов (рисунок 3.4);
- 3.4.1.2.5.** Подключить блок управления линейкой лазерных диодов LLD-250-0,5Q (далее – блок управления лазерной линейкой) к сети питания;
- 3.4.1.2.6.** Включить блок управления лазерной линейкой с помощью кнопки включения, расположенной на задней панели устройства;
- 3.4.1.2.7.** Перевести ключ блокировки блока управления лазерной линейкой, расположенный на передней панели устройства, в положение “ВКЛ” (рисунок 3.5).

### **3.4.2. Проведение измерений**

#### **3.4.2.1. Исследование однородности распределения интенсивности лазерного излучения линейки торцевых лазерных диодов**

- 3.4.2.1.1.** Надеть средства индивидуальной защиты органов зрения – очки;
- 3.4.2.1.2.** Установить на экране блока управления лазерной линейкой рабочую температуру термостабилизации, равную 25 °С, нажав на поле ввода «Температура» и плавно, постепенно повернув регулятор величины параметра;
- 3.4.2.1.3.** Установить на экране блока управления лазерной линейкой длительность импульса лазерного излучения, равную 250 мкс, нажав на поле ввода «Длительность импульса» и плавно, постепенно повернув регулятор величины параметра;
- 3.4.2.1.4.** Установить на экране блока управления лазерной линейкой частоту следования импульсов 20 Гц, нажав на поле ввода «Частота генерации» и плавно, постепенно повернув регулятор величины параметра;
- 3.4.2.1.5.** Установить устройство видеорегистрации и обработки сигналов на расстоянии 16–25 см от выходного окна герметичного бокса линейки лазерных диодов;
- 3.4.2.1.6.** Отрегулировать по высоте устройство видеорегистрации и обработки сигналов для расположения на одной высоте центров выходного окна герметичного бокса линейки лазерных диодов и входного окна устройства видеорегистрации и обработки сигналов;
- 3.4.2.1.7.** Установить в программном обеспечении Diagram2007 режим измерения “Осциллограф”;
- 3.4.2.1.8.** Включить накачку линейки лазерных диодов нажатием на кнопку СТАРТ/СТОП, расположенную на передней панели блока управления лазерной линейкой;
- 3.4.2.1.9.** Нажать на поле ввода «Ток нагрузки» и плавным постепенным поворотом регулятора величины параметра блока управления лазерной линейкой установить ток накачки 25 А;
- 3.4.2.1.10.** Ослабить винт крепления вспомогательного тубуса устройства видеорегистрации и обработки сигналов;
- 3.4.2.1.11.** Плавным перемещением передней части вспомогательного тубуса устройства видеорегистрации и обработки сигналов добиться максимальной

интенсивности входного оптического сигнала, отображаемого в программном обеспечении Diagram2007;

**3.4.2.1.12.** Зажать винт крепления вспомогательного тубуса устройства видеорегистрации и обработки сигналов;

**3.4.2.1.13.** Установить на экране блока управления лазерной линейкой рабочую температуру термостабилизации, равную 15 °С, нажав на поле ввода «Температура» и плавно, постепенно повернув регулятор величины параметра;

**3.4.2.1.14.** Удалить оптический фильтр под номером 2 из вспомогательного тубуса устройства видеорегистрации и обработки сигналов;

**3.4.2.1.15.** Произвести расчет в программном обеспечении Diagram2007 диаграмм распределения интенсивности излучения в дальнем поле для значений тока от 25 А до 50 А с шагом 5 А;

**3.4.2.1.16.** Повторить п. 3.4.2.1.15 для значений температуры 20 °С и 25 °С;

**3.4.2.1.17.** Установить оптический фильтр под номером 2 во вспомогательный тубус устройства видеорегистрации и обработки сигналов;

**3.4.2.1.18.** Произвести расчет в программном обеспечении Diagram2007 диаграмм распределения интенсивности излучения в дальнем поле для значений тока от 50 А до 150 А с шагом 10 А;

**3.4.2.1.19.** Повторить п. 3.4.2.1.18 для значений температуры термостабилизации 15 °С, 20 °С, 25 °С;

**3.4.2.1.20.** Выключить накачку линейки лазерных диодов.

### **3.4.3. Методика расчета**

#### **3.4.3.1. Расчет диаграмм распределения интенсивности излучения в дальнем поле**

**3.4.3.1.1.** В программном обеспечении Diagram2007 остановить измерение и перейти в режим обработки результатов нажатием на красную кнопку “Stop measurement”. На экране ПК зафиксируется последнее распределение интенсивности, наблюдаемое в режиме “Осциллограф”, содержащее 16 точек, соответствующих темновому уровню сигнала фотоприемной линейки, и 3648 точек, содержащих информацию о распределении интенсивности лазерного излучения в дальнем поле. Оставшиеся точки – неинформативны;

**3.4.3.1.2.** Установить курсоры N1 и N2 в двух произвольных точках минимумов распределения интенсивности в ближнем поле (промежутках между излучающими элементами лазерной линейки). Большее расстояние между курсорами повышает точность проведения расчетов;

**3.4.3.1.3.** Определить число N наблюдаемых минимумов между курсорами и зафиксировать его в окне “Intervals”, расположенном в верхней части окна программного обеспечения Diagram2007;

**3.4.3.1.4.** Выбрать уровень отсечки сигнала в процентах в окне “CutOff Level” программного обеспечения Diagram2007, выше которого сигнал соответствует наличию излучения лазера;

**3.4.3.1.5.** Построить результирующую диаграмму распределения интенсивности излучения в ближнем поле посредством нажатия кнопки “Draw Histogram”, расположенной в верхней части окна программного обеспечения Diagram2007.

#### **3.4.4. Обработка результатов**

**3.4.4.1.** Обработать полученные результаты в программном обеспечении, позволяющем работать с двумерными массивами данных (Microsoft Excel, Origin, MathCad, MATLAB, Wolfram Mathematica и т.д.), и привести результирующие диаграммы распределения интенсивности излучения в ближнем поле.

**3.4.4.2.** Произвести расчет количества излучателей в линейке лазерных диодов согласно построенным результирующим диаграммам распределения интенсивности.

#### **3.5. Форма отчета**

Форма отчета должна соответствовать предъявляемым в Приложении А требованиям к отчету.

#### **3.6.Рекомендуемый список литературы**

— ГОСТ Р МЭК 61140-2000 Защита от поражения электрическим током. Общие положения по безопасности, обеспечиваемой электрооборудованием и электроустановками в их взаимосвязи;

— ГОСТ 24714-81 Лазеры. Методы измерения параметров излучения. Общие положения;

— Жуков А. Е. Лазеры на основе полупроводниковых наноструктур. – Элмор. – 2007;

— Пихтин А. Н. Оптическая и квантовая электроника. – Издательство "Высшая Школа". – 2001;

— Liu X. et al. Packaging of High Power Semiconductor Lasers. – Springer New York. – 2015.

#### **3.7.Контрольные вопросы**

— Устройство и принцип работы лазерных линеек;

— Расходимость лазерного пучка;

— Основные параметры и характеристики пучков излучения полупроводниковых лазеров;

— Температурные зависимости параметров полупроводниковых лазеров;

— Ближнее и дальнее поле.

## Лабораторная работа 4. Исследование параметров импульсного режима генерации линейки лазерных диодов

### 4.1. Цель

Исследовать длительность, частоту следования и скважность импульсов линейки лазерных диодов ближнего инфракрасного диапазона.

### 4.2. Краткие теоретические сведения

#### 4.2.1. Режимы генерации лазерного излучения

Существуют два основных режима генерации лазерного излучения: непрерывный и импульсный.

Режимом непрерывной генерации лазерного излучения называется режим, при котором постоянно поддерживается инверсия населенностей на возбужденном уровне и достигается ее критическое значение  $N_c$ , причем усиление компенсирует полные потери в лазере. Генерация лазерного излучения возможна при соблюдении следующего условия:

$$N_1 < N_2, \quad (4.1)$$

где  $N_1$  – населенность основного уровня,  $N_2$  – населенность возбужденного уровня, а генерация в непрерывном режиме возможна при соблюдении неравенства:

$$\tau_1 < \tau_{21}, \quad (4.2)$$

где  $\tau_1$  – время жизни частицы на первом уровне, а  $\tau_{21}$  – время жизни перехода.

Обеспечение непрерывной накачки источника лазерного излучения, где соблюдены неравенства (4.1, 4.2), позволяет лазеру генерировать в непрерывном режиме. Отметим, что при достижении  $N_c$  увеличение скорости накачки не приводит к увеличению инверсии населенности, а ведет к увеличению числа фотонов в резонаторе.

Одним из возможных режимов работы лазера является режим импульсной генерации. Между отдельными импульсами может быть произвольный временной промежуток, также произвольный промежуток может быть между сериями регулярных импульсов. Первые лазеры осуществляли свою работу исключительно в импульсном режиме и были не способны работать в непрерывном режиме. В дальнейшем, достижение импульсной генерации лазерных источников, способных работать в непрерывном режиме, осуществлялось за счет импульсной накачки, либо за счет изменения добротности резонатора.

Согласно неравенству (4.2), для достижения импульсной генерации время жизни перехода должно быть меньше либо равно времени жизни частицы на первом уровне:

$$\tau_1 \geq \tau_{21}. \quad (4.3)$$

С помощью модуляции рабочего тока накачки возможно осуществлять амплитудную модуляцию инжекционных лазеров. В том случае, если время нарастания прямоугольного токового импульса накачки меньше времени жизни носителей в активной области, возникает задержка лазерного импульса, а в самом импульсе наблюдаются затухающие релаксационные колебания. Внешний вид таких колебаний показан на рисунке 4.1.

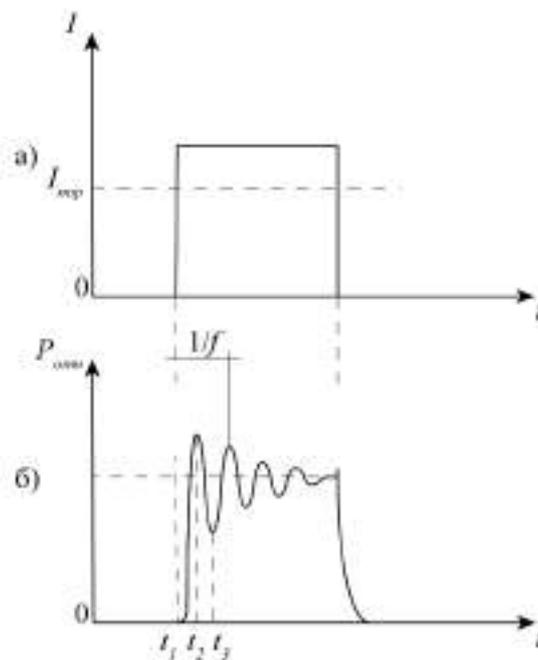


Рисунок 4.1 — Импульсная модуляция излучения инжекционного лазера: а) токовый импульс; б) оптический отклик

#### 4.2.2. Пространственно-временные характеристики импульсного лазерного излучения

Длительность импульса (ширина импульса) наиболее часто характеризуют как время, в течение которого мощность импульса лазерного излучения превышает значение, соответствующее его половине, или же полная ширина на половине максимума (от англ. full width at half maximum (FWHM)) оптической мощности в зависимости от времени. Частота повторения импульсов лазерного излучения показывает, сколько импульсов формируется за одну секунду, и связана с периодом следования импульсов следующим выражением:

$$T_{\text{имп}} = \frac{1}{f}, \quad (4.4)$$

где  $f$  – частота повторения импульсов,  $T_{\text{имп}}$  – период следования импульсов.

Отношение периода следования импульсов к длительности импульса называют скважностью (рисунок 4.2). Скважность является безразмерной величиной и характеризует любую импульсную систему. Данная величина показывает, во сколько раз период следования импульсов превосходит длительность импульса.

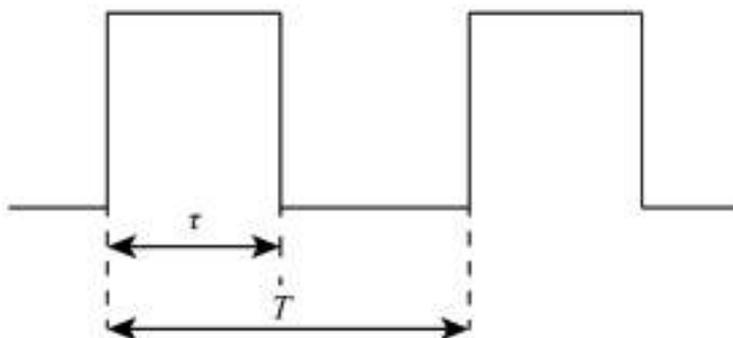


Рисунок 4.2 — Схематическое изображение последовательности импульсов.  $T$  – период следования импульсов,  $\tau$  – длительность импульса

#### 4.2.3. Фотоприемник

Фотоприемником называется прибор, принимающий оптический сигнал на входе и преобразующий его в электрический сигнал на выходе. Полупроводниковые фотоприемники основаны на использовании  $p$ - $n$  перехода. В качестве полупроводниковых фотоприемников могут быть использованы фоторезисторы, фотодиоды, фототиристоры и т. д.

Рассмотрим устройство и принцип действия фотодиода. В основе его работы лежит внутренний фотоэффект. При попадании света на  $p$ - $n$  переход происходит поглощение квантов света, и возникают неравновесные носители заряда: электроны и дырки. Дырки перемещаются в зону  $p$ , а электроны собираются в зоне  $n$  или около границы  $p$ - $n$  перехода (рисунок 4.3). Дырки стремятся к отрицательному потенциалу и заряжают  $p$ -область положительно, в то время как электроны к положительному потенциалу и заряжают  $n$ -зону отрицательно, что ведет к образованию разности потенциалов между  $p$  и  $n$ -областями. Чем больше излучения попадает на обедненную область фотодиода, тем больше обратный ток. При отсутствии внешней засветки ток в цепи не наблюдается, однако за счет тепловых генераций электронов и дырок в  $p$ - $n$  переходе наблюдается темновой ток, являющийся одним из основных источников шумов фотодиода.

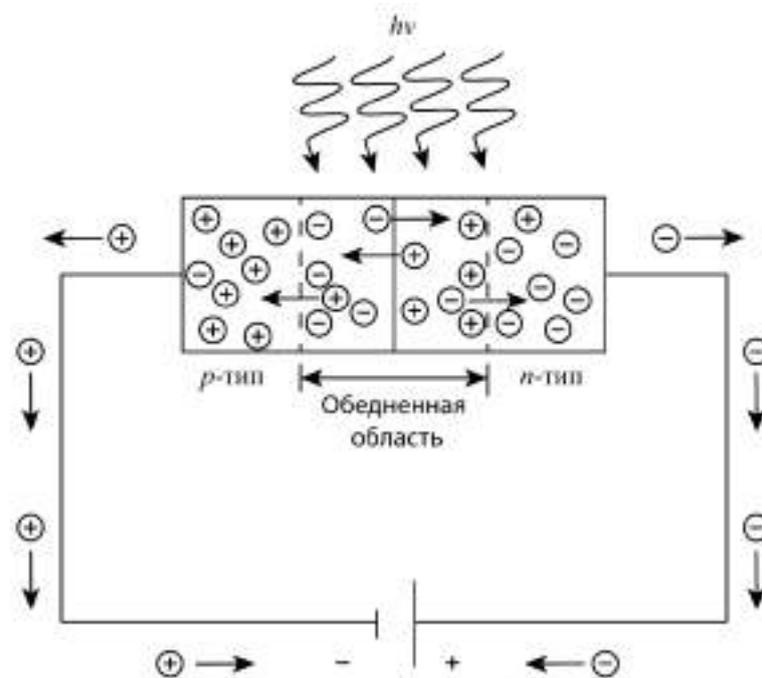


Рисунок 4.3 — Принцип работы фотодиода

В простейшем исполнении фотодиод представляет собой кристалл, размещенный в металлическом корпусе (рисунок 4.4). Кристалл состоит из двух слоев полупроводников  $p$  и  $n$ -типа проводимости, между которыми образован  $p$ - $n$  переход. На кристалл нанесены металлические контакты, являющиеся катодом и анодом и необходимые для последующего соединения с контактами корпуса устройства и вывода электрического тока в цепь.



Рисунок 4.4 — Внешний вид фотодиода

#### 4.2.4. Осциллограф

Осциллографом является электронный прибор, предназначенный для наблюдения и измерения электрических сигналов в течение некоторого времени. Наблюдаемый на осциллографе набор выходных данных (осциллограмма) позволяет определять частоту, период следования, длительность импульса входного сигнала. На рисунке 4.5 схематично изображено устройство цифрового осциллографа.

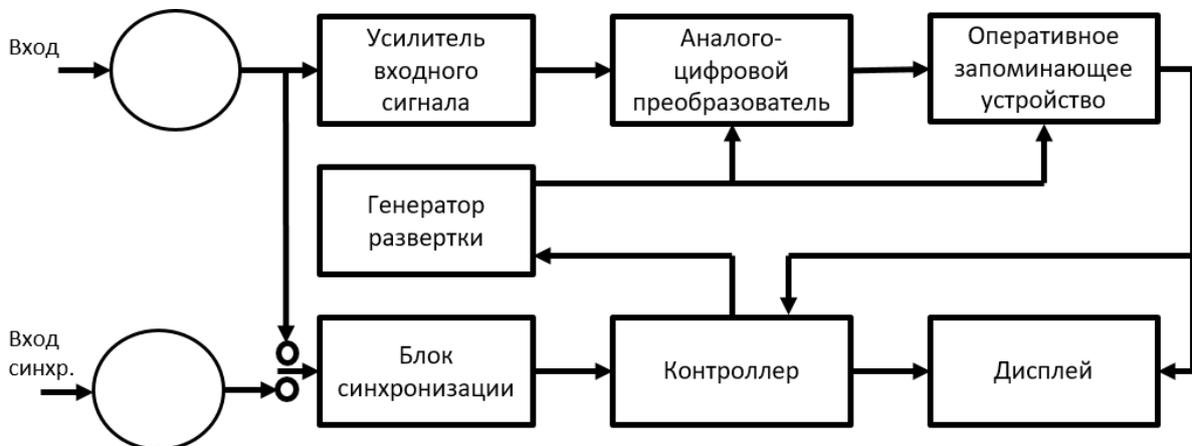


Рисунок 4.5 — Устройство цифрового осциллографа

Входной сигнал проходит через усилитель, после чего он преобразуется аналого-цифровым преобразователем в дискретную последовательность кодовых слов, каждое из которых соответствует мгновенному значению входного сигнала. При появлении нового кодового слова происходит запись в оперативное запоминающее устройство, а все предыдущие записанные отсчёты при этом сдвигаются на одну ячейку. При достижении указанных условий, содержимое некоторых ячеек оперативного запоминающего устройства переписывается в

запоминающее устройство, которое входит в состав контроллера, причем каждой ячейке запоминающего устройства соответствует точка на экране осциллографа. Её абсциссу определяет номер ячейки, а ординату – кодовое слово  $N_i$ , находящееся в этой ячейке. Управление осциллографом осуществляется с помощью клавиш и ползунков, расположенных на лицевой стороне устройства.

### 4.3. Схема выполнения лабораторной работы

Схема измерительного стенда, используемого для выполнения лабораторной работы по исследованию параметров импульсного режима генерации линейки лазерных диодов, представлена на рисунке 4.6.

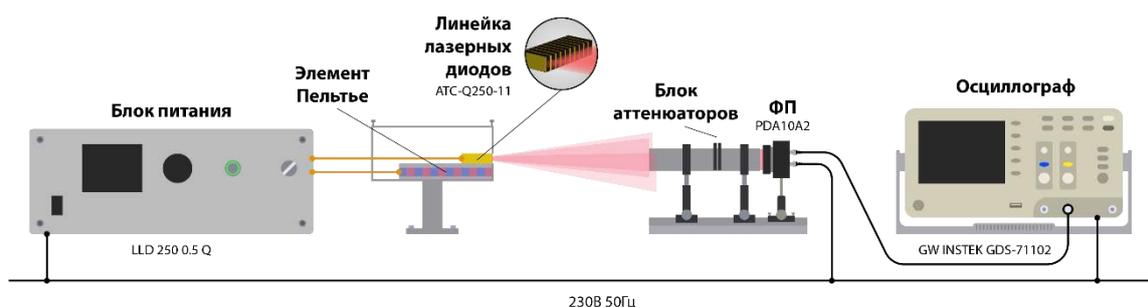


Рисунок 4.6 — Схематичное изображение измерительного стенда, используемого для выполнения лабораторной работы

### 4.4. Порядок выполнения лабораторной работы

Перед выполнением лабораторной работы необходимо ознакомиться с основными требованиями по электробезопасности, лазерной безопасности. Нарушение предъявляемых требований может привести к выходу из строя аппаратуры, поражению электрическим током, повреждению органов зрения.

#### 4.4.1. Подготовка

##### 4.4.1.1. Определение объекта испытаний

4.4.1.1.1. Получив у преподавателя указания о том, какая линейка лазерных диодов используется для измерений, необходимо визуально убедиться в целостности элементов установки, записать название, изучить спецификацию, рабочие характеристики.

#### 4.4.1.2. Подготовка лазерной системы и измерительного оборудования

4.4.1.2.1. Подключить к разьему «Output» фотоприемника PDA10A2 (рисунок 4.7) один конец BNC-кабеля, второй конец кабеля - к каналу 1 осциллографа GW INSTRON GDS-71102 (рисунок 4.8);



Рисунок 4.7 — Фотоприемник PDA10A2

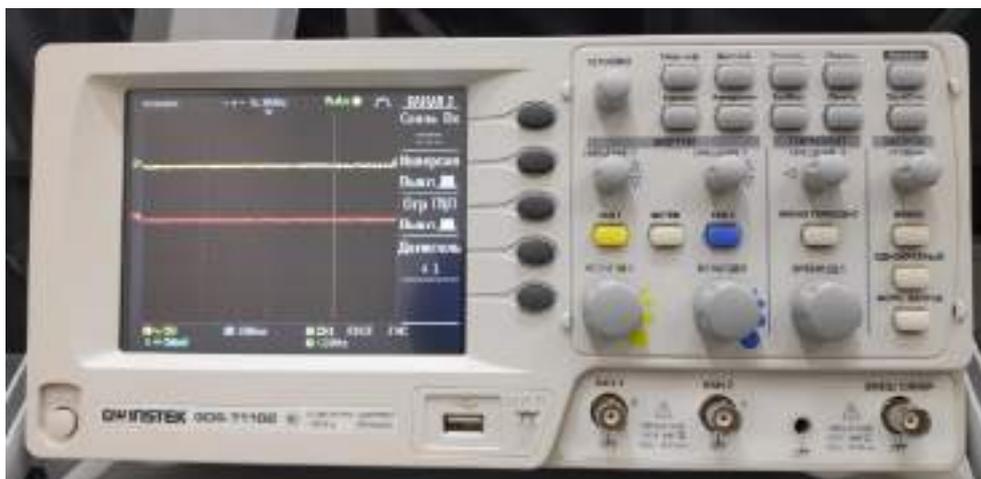


Рисунок 4.8 — Осциллограф GW INSTRON GDS-71102. *Пуск/Стоп* – кнопка пуска и остановки регистрации сигналов, *Автоуст* – кнопка автоматического масштабирования регистрируемого сигнала, *Вольт/Дел* – ручка масштабирования амплитуды регистрируемого сигнала, *Время/Дел* – ручка масштабирования временной развертки регистрируемого сигнала, *Курсоры* – кнопка перехода в меню работы с курсорами

4.4.1.2.2. Подключить к разьему «DC input» фотоприемника PDA10A2 кабель питания, подключить блок питания фотоприемника PDA10A2 к сети питания;

**4.4.1.2.3.** Включить блок питания фотоприемника PDA10A2 и фотоприемник PDA10A2 с помощью переключателей, расположенных на боковых панелях приборов;

**4.4.1.2.4.** Подключить осциллограф GW INSTEK GDS-71102 к сети питания и включить осциллограф с помощью кнопки, расположенной на передней панели прибора;

**4.4.1.2.5.** Подключить блок управления LLD-250-0,5Q линейкой лазерных диодов (далее – блок управления лазерной линейкой) к сети питания;

**4.4.1.2.6.** Включить блок управления лазерной линейкой с помощью кнопки включения, расположенной на задней панели устройства;

**4.4.1.2.7.** Перевести ключ блокировки блока управления лазерной линейкой, расположенный на передней панели устройства, в положение “ВКЛ”.

### **4.4.1.3. Установка начальных параметров системы**

**4.4.1.3.1.** Установить на экране блока управления лазерной линейкой рабочую температуру термостабилизации, равную 25 °С, нажав на поле ввода «Температура» и плавно, постепенно повернув регулятор величины параметра.

**4.4.1.3.2.** Установить на экране блока управления лазерной линейкой ток накачки 0 А, нажав на поле ввода «Ток нагрузки» и плавно, постепенно повернув регулятор величины параметра.

**4.4.1.3.3.** Установить на экране блока управления лазерной линейкой частоту следования импульсов 20 Гц, нажав на поле ввода «Частота генерации» и плавно, постепенно повернув регулятор величины параметра.

**4.4.1.3.4.** Установить на экране блока управления лазерной линейкой длительность импульса лазерного излучения, равную 250 мкс, нажав на поле ввода «Длительность импульса» и плавно, постепенно повернув регулятор величины параметра.

## **4.4.2. Проведение измерений**

### **4.4.2.1. Исследование параметров импульсного режима лазерной генерации при различных токах накачки линейки лазерных диодов**

**4.4.2.1.1.** Надеть средства индивидуальной защиты органов зрения – очки;

**4.4.2.1.2.** Установить фотоприемник PDA10A2 на расстоянии 55-60 см от выходного окна герметичного бокса линейки лазерных диодов;

**4.4.2.1.3.** Отрегулировать по высоте фотоприемник PDA10A2 для расположения на одной высоте центров выходного окна герметичного бокса линейки лазерных диодов и входного окна фотоприемника PDA10A2;

**4.4.2.1.4.** Проконтролировать перпендикулярность установки выходного окна герметичного бокса линейки лазерных диодов и входного окна фотоприемника PDA10A2;

**4.4.2.1.5.** Включить накачку линейки лазерных диодов, нажав кнопку СТАРТ/СТОП, расположенную на передней панели блока управления лазерной линейкой;

**4.4.2.1.6.** Нажать на поле ввода «Ток нагрузки» и плавным постепенным поворотом регулятора величины параметра блока управления лазерной линейкой установить ток накачки 25 А;

**4.4.2.1.7.** На передней панели осциллографа GW INSTEK GDS-71102 нажать кнопку «Пуск/Стоп»;

**4.4.2.1.8.** На передней панели осциллографа GW INSTEK GDS-71102 нажать кнопку «Автоуст» для автоматического масштабирования регистрируемого сигнала;

**4.4.2.1.9.** Посредством вращения ручек «Вольт/Дел» и «Время/Дел» продолжить масштабирование до отчетливой регистрации не менее двух импульсов на экране прибора;

**4.4.2.1.10.** На передней панели осциллографа GW INSTEK GDS-71102 нажать кнопку «Курсоры» для вызова панели курсоров;

**4.4.2.1.11.** При помощи клавиши «F1», расположенной на передней панели осциллографа GW INSTEK GDS-71102, осуществить выбор курсора по горизонтали и вертикали;

**4.4.2.1.12.** Вращением ручки позиционирования курсоров установить курсоры на начальной и конечной точке регистрируемого импульса и на верхней и нижней точке амплитуды импульса;

**4.4.2.1.13.** Записать полученные разности значений курсоров по горизонтали и вертикали в протокол измерений;

**4.4.2.1.14.** Вращением ручки позиционирования курсоров установить курсоры в начальных точках двух соседних регистрируемых импульсов;

**4.4.2.1.15.** Записать полученные разности значений курсоров в протокол измерений;

**4.4.2.1.16.** Повторить пункты 4.4.2.1.6, 4.4.2.1.11–4.4.2.1.15 для значений тока накачки от 25 А до 55 А с шагом 2 А.

#### **4.4.2.2. Исследование параметров импульсного режима лазерной генерации при различных температурах термостабилизации линейки лазерных диодов**

**4.4.2.2.1.** Нажать на поле ввода «Ток нагрузки» и плавным постепенным поворотом регулятора величины параметра блока управления лазерной линейкой установить ток накачки 40 А;

**4.4.2.2.2.** Установить на экране блока управления лазерной линейкой рабочую температуру термостабилизации, равную 15 °С, нажав на поле ввода «Температура» и плавно, постепенно повернув регулятор величины параметра;

**4.4.2.2.3.** На передней панели осциллографа GW INSTEK GDS-71102 нажать кнопку «Курсоры» для вызова панели курсоров;

**4.4.2.2.4.** При помощи клавиши «F1», расположенной на передней панели осциллографа GW INSTEK GDS-71102, осуществить выбор курсора по горизонтали и вертикали;

**4.4.2.2.5.** Вращением ручки позиционирования курсоров установить курсоры на начальной и конечной точке регистрируемого импульса и на верхней и нижней точке амплитуды импульса;

**4.4.2.2.6.** Записать полученные разности значений курсоров по горизонтали и вертикали в протокол измерений;

**4.4.2.2.7.** Вращением ручки позиционирования курсоров установить курсоры в начальных точках двух соседних регистрируемых импульсов;

**4.4.2.2.8.** Записать полученные разности значений курсоров в протокол измерений;

**4.4.2.2.9.** Повторить пункты 4.4.2.2.2–4.4.2.2.8 для температурного диапазона 15 °С – 35 °С с шагом 2 °С.

### **4.4.3. Обработка результатов**

**4.4.3.1.** Рассчитать скважность импульсов линейки лазерных диодов как отношение периода регистрируемого импульса к его длительности для каждого проведенного измерения;

**4.4.3.2.** Обработать полученные результаты в программном обеспечении, позволяющем работать с двумерными массивами данных (Microsoft Excel, Origin, MathCad, MATLAB, Wolfram Mathematica и т.д.), с целью графического представления зависимости амплитуды, длительности импульса, скважности импульса линейки лазерных диодов от тока накачки;

**4.4.3.3.** Обработать полученные результаты в программном обеспечении, позволяющем работать с двумерными массивами данных (Microsoft Excel, Origin, MathCad, MATLAB, Wolfram Mathematica и т.д.), с целью графического представления зависимости амплитуды, длительности импульса, скважности импульса линейки лазерных диодов от температуры.

### **4.5. Форма отчета**

Форма отчета должна соответствовать предъявляемым в Приложении А требованиям к отчету.

### **4.6. Рекомендуемый список литературы**

— ГОСТ Р МЭК 61140-2000 Защита от поражения электрическим током. Общие положения по безопасности, обеспечиваемой электрооборудованием и электроустановками в их взаимосвязи;

— ГОСТ 24714-81 Лазеры. Методы измерения параметров излучения. Общие положения; — ГОСТ 25213-82 Лазеры. Методы измерения длительности и частоты повторения импульсов излучения;

— ГОСТ Р ИСО 11554-2008. Оптика и фотоника. Лазеры и лазерные установки (системы). Методы испытаний лазеров и измерений мощности, энергии и временных характеристик лазерного пучка.

— Звелто О. Принципы лазеров: Пер. с англ. – Мир. – 1990;

— Пихтин А. Н. Оптическая и квантовая электроника. – Издательство "Высшая Школа". – 2001.

#### **4.7.Контрольные вопросы**

- Режимы генерации лазерного излучения;
- Основные параметры импульсного сигнала;
- Модуляция лазерного излучения;
- Устройство и принцип работы фотоприемника;
- Устройство и принцип работы осциллографа.

## Лабораторная работа 5.

### Исследование поляризационных характеристик лазерного излучения

#### 5.1. Цель

Исследовать поляризационные характеристики излучения лазерного диода с использованием двулучепреломляющего кристалла.

#### 5.2. Краткие теоретические сведения

##### 5.2.1. Поляризация электромагнитных волн

Под поляризацией электромагнитной волны принято понимать характеристику, описывающую поведение вектора напряженности электрического поля в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны. При этом плоскость колебаний вектора напряженности электрического поля называют плоскостью поляризации, а волну, колебания вектора напряженности электрического поля которой каким-либо образом упорядочены, поляризованной.

Характер колебаний векторов напряженности электрического и магнитного полей определяет тип поляризации волны. Если волна поляризована линейно, то колебания вектора напряженности электрического поля совершаются вдоль выделенной оси в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны. Если в данной плоскости вектор напряженности электрического поля вращается в круговом направлении, то такая волна будет поляризована по кругу. В случае эллиптически поляризованной волны в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны, вектор напряженности электрического поля перемещается по эллипсу.

Вектор напряженности электрического поля волны может быть задан двумя ортогональными компонентами:

$$E_x = E_{x0} \sin(\omega t + \delta_x), \quad (5.1)$$

$$E_y = E_{y0} \sin(\omega t + \delta_y). \quad (5.2)$$

Форма эллипса поляризации, получаемого в результате сложения описанных компонент на плоскости XY, определяется разностью фаз  $\delta$  и отношением амплитуд  $tg\psi$  этих компонент:

$$\delta = \delta_y - \delta_x, \quad (5.3)$$

$$tg\psi = \frac{E_{x0}}{E_{y0}}. \quad (5.4)$$

Для описания геометрии эллипса поляризации излучения и его положения относительно осей координат в плоскости ХУ дополнительно используются поляризационные параметры – азимут  $\chi$  и эллиптичность  $tg\gamma$ . Под азимутом поляризации понимают угол между большой полуосью эллипса и горизонтальной координатной осью. Эллиптичностью называют отношение длин полуосей эллипса.

Связь между описанными параметрами устанавливается следующими соотношениями:

$$\cos 2\psi = -\cos(2\gamma) \cos(2\chi), \quad (5.5)$$

$$tg\delta = \frac{tg(2\gamma)}{\sin(2\chi)}, \quad (5.6)$$

$$tg(2\chi) = -tg(2\psi) \cos\delta, \quad (5.7)$$

$$\sin(2\gamma) = \sin(2\psi) \sin(2\delta). \quad (5.8)$$

### 5.2.2. Двухлучепреломляющие объекты

Некоторые материалы в природе, например кристаллы исландского шпата и ниобата лития, обладают анизотропией показателя преломления – зависимостью показателя преломления от направления распространения света. Для таких материалов характерно свойство двухлучепреломления – расщепления падающей световой волны на две плоскополяризованные составляющие с различным направлением распространения и взаимно перпендикулярными колебаниями векторов напряженности электрического поля. Оси распространения волн в двухлучепреломляющих объектах в зависимости от величины показателя преломления условно называют «быстрой» и «медленной». Для количественной характеристики двухлучепреломления используется разность хода, определяемая как разность максимального  $n_s$  (индекс s означает «slow», от англ. «медленный») и минимального  $n_f$  (индекс f означает «fast», от англ. «быстрый») показателей преломления двух составляющих:

$$\Delta = n_s - n_f. \quad (5.9)$$

Для решения ряда научно-технических задач необходимо проводить измерения разности фаз между ортогональными компонентами излучения, прошедшего через оптически анизотропные среды. При проведении таких измерений регистрируется вносимая специальными компенсаторами противоположная по знаку разность фаз.

Для анализа эллиптически поляризованного излучения могут быть использованы методы измерения эллиптичности и метод «заданного угла». При

прохождении линейно поляризованного под азимутом  $\chi$  лазерного излучения через двулучепреломляющий кристалл между ортогональными компонентами вектора напряженности электрического поля излучения вносится разность фаз, в результате чего поляризация излучения меняется на эллиптическую. Отношение амплитуд и разность фаз ортогональных компонент вектора напряженности электрического поля лазерного излучения могут быть определены, используя метод измерения эллиптичности, из следующих соотношений:

$$\operatorname{tg}\psi = \frac{E_x}{E_y} = \frac{1}{\operatorname{tg}\chi}, \quad (5.10)$$

$$\sin\delta = \frac{\sin(2\gamma)}{\sin(2\psi)}. \quad (5.11)$$

При изучении параметров поляризации по методу «заданного угла» производится измерение азимута поляризации. Разность фаз в таком случае может быть найдена как

$$\cos\delta = -\frac{\operatorname{tg}\chi}{\operatorname{tg}\psi}. \quad (5.12)$$

### 5.2.3. Формализм Джонса

Для упрощения описания и анализа поляризации полностью поляризованного света могут быть использованы вектора и матрицы – математический аппарат, получивший название формализм Джонса.

Комплексная амплитуда плоской электромагнитной волны с циклической частотой  $\omega$  и волновым вектором  $k$ , распространяющейся вдоль положительного направления оси  $z$  в отсутствие поглощения, может быть записана как

$$\begin{pmatrix} E_{0x} e^{i\varphi_x} \\ E_{0y} e^{i\varphi_y} \\ 0 \end{pmatrix} e^{i(kz - \omega t)}, \quad (5.13)$$

Мнимая часть содержит информацию о фазе волны, действительная – об амплитуде. Вектор Джонса, сохраняющий информацию о  $x$ - и  $y$ -компонентах поля этой волны, определяется как

$$\begin{pmatrix} E_{0x} e^{i\varphi_x} \\ E_{0y} e^{i\varphi_y} \end{pmatrix}. \quad (5.14)$$

При описании интенсивность света в начальной точке нормируется на единицу. В таком случае сумма квадратов абсолютных значений компонент вектора Джонса волны будет равна интенсивности и, как следствие, единице.

Например, вектор Джонса для линейно поляризованной вдоль оси  $x$  волны будет записываться следующим образом:

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (5.15)$$

Аналогично, для волны с линейной поляризацией вдоль оси  $y$ :

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (5.16)$$

Для описания различных компонент оптических систем – линз, светоделителей, поляризаторов и т.д. – используются матрицы Джонса, представляющие собой проекции векторов Джонса на одномерное комплексное пространство. Для линейных поляризаторов с горизонтальной и вертикальной осью пропускания матрицы Джонса примут вид:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ и } \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (5.17)$$

### 5.3.Схема выполнения лабораторной работы

Схема измерительного стенда, используемого для выполнения лабораторной работы по измерению поляризационных характеристик лазерного диода, представлена на рисунке 5.1.

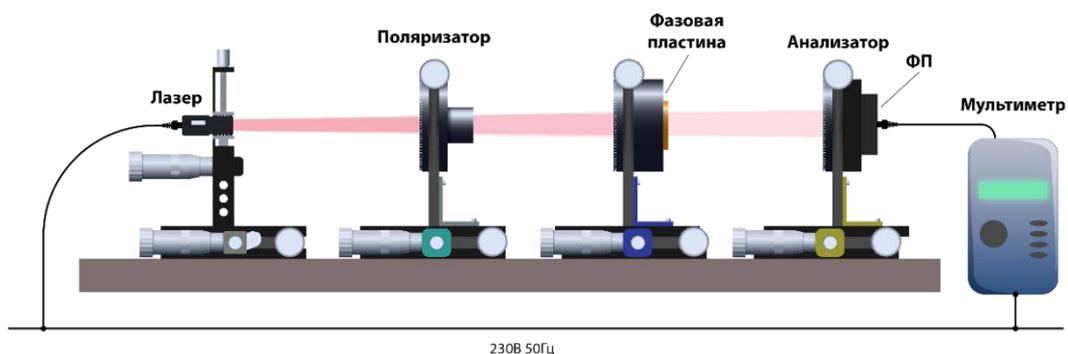


Рисунок 5.1 — Схематичное изображение измерительного стенда, используемого для выполнения лабораторной работы

## **5.4. Порядок выполнения лабораторной работы**

Перед выполнением лабораторной работы необходимо ознакомиться с основными требованиями по электробезопасности, лазерной безопасности. Нарушение предъявляемых требований может привести к выходу из строя аппаратуры, поражению электрическим током, повреждению органов зрения.

### **5.4.1. Подготовка**

#### **5.4.1.1. Определение объекта испытаний**

**5.4.1.1.1.** Получив у преподавателя указания о том, какой лазерный диод используется для измерений, необходимо визуально убедиться в целостности элементов установки, записать название, изучить спецификацию, рабочие характеристики.

#### **5.4.1.2. Подготовка лазерной системы и измерительного оборудования**

**5.4.1.2.1.** Подключить лазерный диод МЛ-02 (рисунок 5.2) к сети питания;



Рисунок 5.2 — Лазерный диод МЛ-02

**5.4.1.2.2.** Подключить мультиметр М832 к фотоприемному элементу, входящему в состав измерительного стенда (рисунок 5.3);



Рисунок 5.3 — Мультиметр М832, подключенный к фотоприемному элементу

**5.4.1.2.3.** Поворотом ручки переключения режимов на передней панели мультиметра М832 перевести его в режим измерения постоянного напряжения, установив необходимый диапазон значений;

**5.4.1.2.4.** Поворотом микрометрических винтов перевести вращающиеся подвижки фазовых пластинок (рисунок 5.4) в начальное положение 0;



Рисунок 5.4 — Вращающиеся подвижки фазовых пластинок

**5.4.1.2.5.** Вращением микрометрических винтов установочных подвижек, на которых закреплены фазовая пластинка анализатора и фазовая пластинка поляризатора с фотоприемным элементом, расположить все элементы соосно.

### **5.4.1.3. Определение параметров начального отсчета**

**5.4.1.3.1.** Закрывать оптический тракт распространения лазерного излучения непрозрачным экраном;

**5.4.1.3.2.** Определить и зафиксировать в протоколе измерений величину темнового сигнала фотоприемника по показаниям мультиметра;

**5.4.1.3.3.** Открыть оптический тракт распространения лазерного излучения;

**5.4.1.3.4.** Зафиксировать в протоколе измерений выборку значений выходного сигнала фотоприемника по показаниям мультиметра при ориентациях анализатора от 0 до 350 градусов с шагом 10 градусов. Изменение ориентации анализатора осуществляется поворотом микрометрического винта.

### **5.4.2. Проведение измерений**

**5.4.2.1. Исследование поляризационных параметров излучения лазерного диода**

**5.4.2.1.1.** Установить “скрещенное положение” поляризатора и анализатора, соответствующее минимальному уровню выходного сигнала фотоприемника, вращением микрометрического винта анализатора;

**5.4.2.1.2.** Установить в держателе оправ одну из оправ с образцом фазовой пластины;

**5.4.2.1.3.** Вращением поворотного устройства держателя оправ добиться “скрещенного положения” поляризатора, анализатора и используемой оправы с образцом фазовой пластины, соответствующего минимальному уровню выходного сигнала фотоприемника;

**5.4.2.1.4.** Вращением поворотного устройства держателя оправ передвинуть оправу с образцом фазовой пластины на 20 градусов (угол, обеспечивающий максимальную чувствительность измерений);

**5.4.2.1.5.** Зафиксировать в протоколе измерений выборку значений выходного сигнала фотоприемника при ориентациях анализатора от 0 до 350 градусов с шагом 10 градусов;

**5.4.2.1.6.** Сменить оправу с образцом фазовой пластины в держателе оправ и повторить измерения согласно п. 5.4.2.1.1–5.4.2.1.5.

### **5.4.3. Обработка результатов**

**5.4.3.1.** Рассчитать параметры поляризации в соответствии с выражениями (5.10), (5.11), (5.12);

**5.4.3.2.** Представить результаты расчета в виде таблицы;

**5.4.3.3.** Описать состояние поляризации лазерного излучения после прохождения каждого из оптических элементов, используя вектора Джонса.

### **5.5. Форма отчета**

Форма отчета должна соответствовать предъявляемым в Приложении А требованиям к отчету.

### **5.6.Рекомендуемый список литературы**

- ГОСТ Р ИСО 12005-2013. Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерений параметров лазерных пучков. Поляризация;
- Звелто О. Принципы лазеров: Пер. с англ. – Мир. – 1990;
- Елисеев П. Г. Введение в физику инжекционных лазеров. – Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. – 1983;
- Huard S. Polarization of light. – Wiley-VCH. – 1997.

### **5.7.Контрольные вопросы**

- Поляризация электромагнитных волн;
- Параметры Стокса;
- Поляризаторы;
- Двойное лучепреломление;
- Формализм Джонса, вектора и матрицы Джонса;
- Поляризация излучения полупроводниковых лазеров.

## Лабораторная работа 6. Изучение способов контроля перемещений методом лазерной интерферометрии

### 6.1. Цель

Исследовать величину и скорость перемещения объекта методом лазерной интерферометрии.

### 6.2. Краткие теоретические сведения

#### 6.2.1. Интерференция света

Под интерференцией света обычно понимают явления, в которых результирующая интенсивность картины, наблюдаемой при наложении двух световых волн, не равна сумме интенсивностей отдельных волн. Сама же образующаяся устойчивая картина, представляющая собой чередующиеся светлые и темные участки, получила название интерференционной картины. Наблюдение устойчивой, не изменяющейся во времени интерференционной картины возможно только в том случае, если происходит наложение волн, имеющих одинаковый период и неизменный сдвиг фаз в каждой точке. Подобные согласованные между собой волновые процессы (волны) называют когерентными.

Необходимыми условиями интерференции двух электромагнитных волн являются равенство их частот и волновых векторов (или их близость). Наблюдение устойчивой интерференции возможно только при условии когерентности волн. Интенсивность результирующей волны  $I$ , получающейся при наложении волн с интенсивностями  $I_1, I_2$ , может быть определена как

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\varphi \cdot \cos\psi, \quad (6.1)$$

где  $\varphi$  – разность фаз между взаимодействующими волнами,  $\psi$  – угол между плоскостями поляризации волн.

Разность фаз согласованных волновых процессов постоянна в течение некоторого времени – времени когерентности – определяемого как время, за которое изменение разности фаз когерентных волн достигнет значения  $\pi$ . Иными словами, временем когерентности является максимальное время, при котором все еще наблюдается когерентность волновых процессов. За время, равное времени когерентности, волна распространяется на длину когерентности.

$$t_{\text{ког}} = \frac{\pi}{\Delta\omega}, \quad (6.2)$$

$$l_{\text{ког}} = c \cdot t_{\text{ког}}, \quad (6.3)$$

где  $c$  – скорость света в среде распространения электромагнитной волны,  $\Delta\omega$  – разброс частот электромагнитной волны.

Изменение разности фаз колебательных процессов может происходить вследствие разброса частот  $\Delta\omega$  и волновых векторов  $\Delta k$ . С разбросом частот связано понятие временной когерентности – независимость средней разности полных фаз световых волн от времени, сохранение их взаимной когерентности во времени. С разбросом волновых векторов связано понятие пространственной когерентности – когерентность колебаний в разных точках плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны, в один и тот же момент времени.

### 6.2.2. Интерферометр Майкельсона

Интерферометр – это измерительный прибор, используемый для прецизионного контроля различных физических величин, в основе работы которого лежит явление интерференции света. Одним из существующих видов таких приборов является интерферометр Майкельсона, общая схема которого представлена на рисунке 6.1.

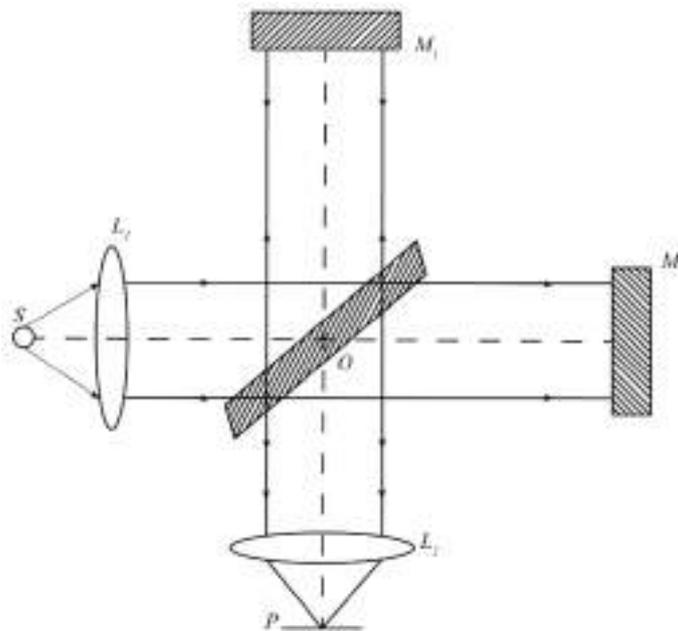


Рисунок 6.1 — Схема интерферометра Майкельсона

Лазерный луч от источника излучения  $S$ , проходя через линзу  $L_1$ , попадает на светоделительную пластинку  $O$ , расположенную под углом  $45^\circ$  к направлению распространения луча. Один из образовавшихся в результате деления лучей отражается от неподвижного зеркала  $M_1$ , а второй – от зеркала  $M_2$ , положение в пространстве которого может быть изменено при необходимости. После

повторного прохождения светоделителя лучи линзой  $L_2$  фокусируются на экране  $P$ , где и можно наблюдать интерференционную картину в виде чередующихся светлых и темных областей.

Разность хода лучей  $\Delta l$  в интерферометре (то есть разность между оптическими длинами путей лучей) определяется длинами плеч интерферометра  $l_1, l_2$ :

$$\Delta l = 2(l_2 - l_1), \quad (6.4)$$

а разность фаз двух интерферирующих волн может быть найдена как

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta l = k \Delta l. \quad (6.5)$$

Следует отметить, что при отражении излучения от поверхности зеркал или пластин вносится дополнительная разность хода, однако в данном интерферометре поправку можно и не вносить – дополнительная разность хода будет кратна  $\lambda$ .

Условие наблюдения интерференционного максимума может быть записано как

$$\Delta l = m\lambda, \quad (6.6)$$

где  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$  - порядок интерференции.

Условие наблюдения интерференционного минимума:

$$\Delta l = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}. \quad (6.7)$$

Таким образом, изменяя длины плеч интерферометра за счет изменения положения зеркал в пространстве, можно изменять разность хода лучей в интерферометре, наблюдая при этом изменение интерференционной картины.

### 6.2.3. Пьезоэлектрический преобразователь

Характерной особенностью представленного в работе интерферометра Майкельсона является использование для изменения положения одного из зеркал пьезоэлектрического преобразователя. Для создания пьезоэлектрических преобразователей используются пьезоэлектрические материалы (называемые также пьезоэлектриками) – кристаллические вещества, на гранях которых при механических деформациях вдоль выделенных направлений образуются разноименные электрические заряды. Пьезоэлектрический материал, расположенный между двумя электродами, наоборот, может изменять свою форму под воздействием приложенного электрического напряжения. Подобный эффект называют обратным пьезоэлектрическим эффектом, обусловленным возникновением механических напряжений внутри материала под воздействием

внешнего электрического поля. Таким образом, пьезоэлектрики являются электромеханическими преобразователями – амплитуда их механических колебаний при помещении в переменное электрическое поле будет изменяться с частотой самого электрического поля.

Используемый в лабораторной экспериментальной установке пьезоэлектрический преобразователь под действием сигналов, поступающих от генератора, будет выступать в качестве двигателя микроперемещений, вызывая смещение закрепленного на него зеркала в одном из плеч интерферометра за счет растяжения и сжатия пьезоэлектрического материала.

#### 6.2.4. Методы лазерной интерферометрии

Высокая пространственная и временная когерентность лазерного излучения позволяют создавать измерительные приборы на основе лазеров для прецизионного бесконтактного контроля значений различных физических величин. Применение лазерных интерферометров оказалось особенно успешным в области характеристики механического движения – контроля линейного и углового перемещения, скорости, ускорения. Например, интерферометрические методы используются для калибровки и управления движением подвижных столиков и подложек при обработке материалов.

В интерферометрах, используемых для контроля смещений, обработка оптического сигнала интерференционной картины производится с помощью фотодетектора. Циклическое смещение положения зеркала в измерительном плече вызывает циклическое изменение разности фаз интерферирующих волн и, как следствие, циклические переходы от максимума к минимуму наблюдаемой картины (от светлой области к темной). Зафиксировав количество циклических переходов, можно установить параметры движения, руководствуясь следующим соотношением:

$$S = \frac{\lambda(N + \Delta N)}{2}, \quad (6.8)$$

где  $S$  – смещение,  $\lambda$  – длина волны излучения лазера,  $N$  – количество циклов (число прошедших светлых и темных областей),  $\Delta N$  – смещение в пределах одной области.

Тогда скорость перемещения зеркала может быть найдена как

$$v = \frac{\lambda}{T_{\text{Гс}}}, \quad (6.9)$$

где  $v$  – скорость перемещения зеркала,  $\lambda$  – длина волны излучения лазера,  $T_{\text{Гс}}$  – период гармонического сигнала.

### 6.3. Схема выполнения лабораторной работы

Схема измерительного стенда, используемого для выполнения лабораторной работы по изучению способов контроля перемещений методом лазерной интерферометрии, представлена на рисунке 6.2.

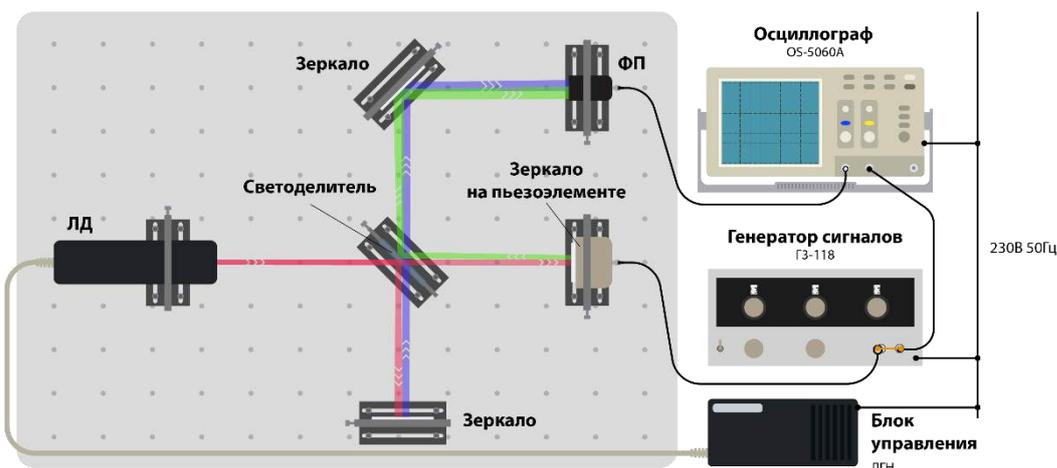


Рисунок 6.2 — Схематичное изображение измерительного стенда, используемого для выполнения лабораторной работы

### 6.4. Порядок выполнения лабораторной работы

Перед выполнением лабораторной работы необходимо ознакомиться с основными требованиями по электробезопасности, лазерной безопасности. Нарушение предъявляемых требований может привести к выходу из строя аппаратуры, поражению электрическим током, повреждению органов зрения.

#### 6.4.1. Подготовка

##### 6.4.1.1. Определение объекта испытаний

6.4.1.1.1. Получив у преподавателя указания о том, какой лазерный источник, фотоприемное устройство, пьезоэлектрический элемент используются для измерений, необходимо визуально убедиться в целостности элементов установки, записать название, изучить спецификацию, рабочие характеристики.

##### 6.4.1.2. Подготовка лазерной системы и измерительного оборудования

6.4.1.2.1. Подключить блок управления лазерным излучателем ЛГН к сети питания;

6.4.1.2.2. Произвести юстировку зеркал оптической системы интерферометра посредством вращения юстированных винтов, до достижения соосности направления распространения лазерного излучения и оси фотоприемного устройства;

**6.4.1.2.3.** Подключить генератор сигналов ГЗ-118 (рисунок 6.3) к сети питания;



Рисунок 6.3 — Генератор сигналов ГЗ-118. *Сеть* – тумблер включения генератора сигналов низкочастотного ГЗ-118, *Множитель* – тумблер выбора коэффициента умножения, *Расстройка* – тумблер выбора величины расстройки, *Ослабление* – тумблер выбора величины ослабления

**6.4.1.2.4.** Подключить осциллограф OS-5060A (рисунок 6.4) к сети питания;

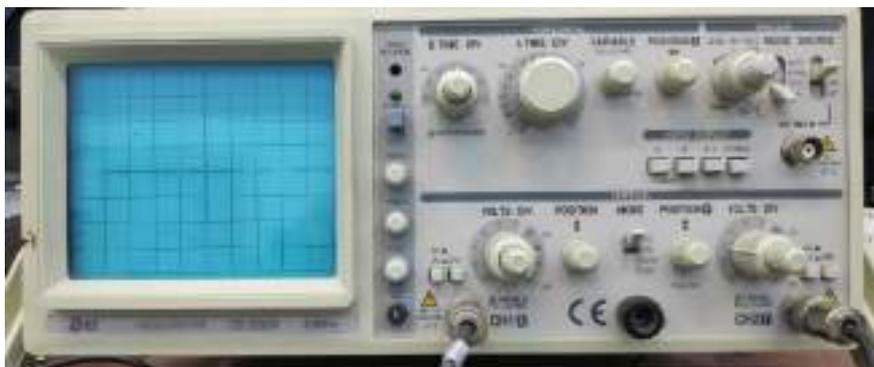


Рисунок 6.4 — Осциллограф OS-5060A. *Power* – кнопка включения осциллографа OS-5060A, *SOURCE* – тумблер переключения каналов, *A TIME/DIV* – ручка масштабирования временной развертки регистрируемого сигнала, *VOLTS/DIV* – ручка масштабирования амплитуды регистрируемого сигнала

**6.4.1.2.5.** Включить генератор сигналов ГЗ-118 посредством переключения тумблера питания в положение «I», расположенного на передней панели устройства;

**6.4.1.2.6.** Включить осциллограф OS-5060A посредством нажатия кнопки «POWER», расположенной на передней панели устройства;

**6.4.1.2.7.** Переключить тумблер осциллографа OS-5060A «MODE», расположенный на передней панели устройства, в положение «CH1»;

**6.4.1.2.8.** Включить фотоприемное устройства посредством переключения тумблера питания в крайнее левое положение;

**6.4.1.2.9.** Установить на генераторе сигналов ГЗ-118 следующие начальные параметры: множитель –  $10^2$ , ослабление – 0, расстройка – среднее положение.

## **6.4.2. Проведение измерений**

### **6.4.2.1. Определение частотных зависимостей количества гармонических полос и их периода**

**6.4.2.1.1.** Установить начальное значение частоты генератора сигналов ГЗ-118 – 1,0 кГц;

**6.4.2.1.2.** Посредством вращения ручки регулировки «A TIME/DIV» осциллографа OS-5060A добиться расположения на экране устройства статичного участка гармонического сигнала;

**6.4.2.1.3.** Установить начальное значение амплитуды на осциллографе OS-5060A с помощью ручки регулировки «VOLTS/DIV» так, чтобы регистрируемые сигнал находился в пределах четырех клеток деления устройства;

**6.4.2.1.4.** Зафиксировать в протоколе измерений количество полос (максимумов) на статичном участке гармонического сигнала;

**6.4.2.1.5.** Зафиксировать в протоколе измерений период колебаний регистрируемого статичного участка гармонического сигнала с помощью делений горизонтальной оси осциллографа OS-5060A;

**6.4.2.1.6.** Повторить измерения согласно п. 6.4.2.1.1–6.4.2.1.5 для диапазона частот 1,0-2,0 кГц, с шагом в 100 Гц, при токах накачки 2, 5, 8 мА.

### **6.4.2.2. Определение амплитудных зависимостей количества гармонических полос и их периода**

**6.4.2.2.1.** Установить начальное значение частоты генератора сигналов ГЗ-118 – 1,1 кГц;

**6.4.2.2.2.** Посредством вращения ручки регулировки «A TIME/DIV» осциллографа OS-5060A добиться расположения на экране устройства статичного участка гармонического сигнала;

**6.4.2.2.3.** Установить начальное значение амплитуды на осциллографе OS-5060A с помощью ручки регулировки «VOLTS/DIV» так, чтобы регистрируемые сигнал находился в пределах четырех клеток деления устройства;

**6.4.2.2.4.** Зафиксировать в протоколе измерений количество полос (максимумов) на статичном участке гармонического сигнала;

**6.4.2.2.5.** Зафиксировать в протоколе измерений период колебаний регистрируемого статичного участка гармонического сигнала с помощью делений горизонтальной оси осциллографа OS-5060A;

**6.4.2.2.6.** Повторить измерения согласно п. 6.4.2.2.1–6.4.2.2.5 для фиксированных значений частот 1,1-1,7 кГц, с шагом 100 Гц, меняя ток накачки от 2 до 8 мА, с шагом 1 мА.

### **6.4.3. Обработка результатов**

**6.4.3.1.** Произвести расчет смещения пьезоэлектрического элемента в соответствии с выражением (6.8).

**6.4.3.2.** Произвести расчет скорости перемещения пьезоэлектрического элемента.

### **6.5. Форма отчета**

Форма отчета должна соответствовать предъявляемым в Приложении А требованиям к отчету.

### **6.6.Рекомендуемый список литературы**

- Звелто О. Принципы лазеров: Пер. с англ.– Мир. – 1990;
- Калитеевский Н. Волновая оптика. – Высшая школа. – 1978;
- Ландсберг Г.С. Оптика. Учебное пособие. – Физматлит. – 2010.

## **7. Контрольные вопросы**

- Интерференция света;
- Интерференционные методы контроля перемещений объектов;
- Разность хода и разность фаз;
- Пространственная и временная когерентность;
- Устройство и принцип работы интерферометра Майкельсона;
- Устройство и принцип работы гелий-неонового лазера;
- Прямой и обратный пьезоэлектрический эффект;
- Использование пьезоэлектрического эффекта в технике.

## Лабораторная работа 7.

### Источники синхротронного излучения. Конструктивные особенности и излучение ондулятора

#### 7.1. Цель

Исследовать влияние периода ондулятора, величины магнитного поля и ширины зазора ондулятора на спектральный состав излучения.

#### 7.2. Краткие теоретические сведения

Перед выполнением лабораторных работ №7 и №8 рекомендуется ознакомиться с источниками [1–3]. При этом все необходимые для расчетов формулы будут даны в теоретическом обзоре.

##### 7.2.1. Элементы релятивистской механики

Релятивистская механика описывает поведение объектов, скорости движения которых сравнимы со скоростью света  $C$ . Такие скорости и объекты называют релятивистскими. Полная энергия релятивистской частицы определяется формулой:

$$E = \frac{m_0 C^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{V}{C}\right)^2}}, \quad (7.1)$$

где  $m_0$  – масса покоя частицы,  $m_0 C^2$  – энергия покоя частицы,  $V$  – скорость частицы. Например, энергия покоя электрона  $m_{e0} C^2 = 0,5110034$  МэВ, следовательно, релятивистскими считаются электроны с энергией порядка 1 МэВ и выше. Если  $E \gg 2 \cdot m_0 C^2$ , то такие частицы называют ультрарелятивистскими. Чтобы упростить запись полной энергии, был введен безразмерный параметр  $\gamma$ , так называемый релятивистский Лоренц-фактор:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{V}{C}\right)^2}} = \frac{E}{m_0 C^2}, \quad (7.2)$$

Он показывает отношение полной энергией частицы к ее энергии покоя. Для электрона справедливо выражение  $\gamma = 1957 \cdot E_e$  [ГэВ]. В современных ускорителях электроны разгоняются до энергий в  $5 \div 15$  ГэВ (на Европейском рентгеновском лазере на свободных электронах (European XFEL) можно достичь 17,5 ГэВ). Если  $E_e = 10$  ГэВ, то его  $\gamma = 19\,570$ , а скорость от скорости  $V_e \approx 0,9999999987$  света.

## 7.2.2 Возможности и ограничения современных лазеров

Современные лазеры охватывают широкий диапазон длин волн, от инфракрасного до ультрафиолетового излучения, и способны генерировать сверхкороткие импульсы ( $10^{-12}$  с) высокой интенсивности. Достижения лазерных технологий вывели исследования динамических процессов на новый уровень. У ученых появилась возможность изучать сверхбыстрые явления, такие как перенос энергии внутри молекул ( $10^{-11}$  с) или распространение тепловых колебаний в твердом теле (до  $10^{-10}$  с) (рисунок 7.1).



Рисунок 7.1 — Примерная временная шкала динамических процессов в молекулах и твердых телах

Однако длина волны лазера, а, следовательно, и его пространственное разрешение, ограничены снизу. Достигнуть области наномасштабов трудно по двум причинам:

1. При уменьшении длины волны излучения возрастает его проникающая способность. Так, рентгеновское излучение ( $<10$  нм) «проходит вглубь» любых материалов, слабо отражаясь от их поверхностей. Создать для рентгеновского излучения эффективные зеркала, требуемые для лазерных резонаторов, оказывается почти невозможно.
2. Другая сложность возникает с системой накачки. Чтобы лазер излучал в рентгеновском диапазоне, необходимо создать инверсную населенность наиболее глубоких уровней атомов активной среды. Требуемые для этого энергии очень велики, от 1 до 10 кэВ по сравнению с несколькими эВ для лазеров, работающих в видимой области. Кроме того, время жизни возбужденного состояния внутренних уровней атомов крайне мало. Для поддержания их инверсной населенности необходима сверхмощная накачка. В конце 70-х годов двадцатого века даже рассматривалась идея создания рентгеновского лазера с накачкой ядерным взрывом.

Решение было найдено в другой области физики высоких энергий. В 70-ые годы ученые умели получать мощные импульсы рентгеновские излучения с помощью синхротронных источников I-ого поколения. Принцип их действия достаточно прост. Разогнанные до релятивистских скоростей заряженные частицы направляются в зазор между поворотными магнитами. Под действием силы Лоренца траектория частиц искривляется. Двигаясь по круговой орбите, т.е. испытывая ускорение, релятивистские частицы испускают электромагнитные волны. Если излучение заряженной частицы, колеблющейся около положения равновесия, описывается моделью излучения диполя (рисунок 7.2(а)), то у частиц, движущихся со сверхвысокими скоростями, лучи фокусируются в узкий конус, ось которого совпадает с направлением движения частицы (рисунок 7.2(б)). Угол раскрытия такого конуса составляет порядка  $1/\gamma$  радиан [4].

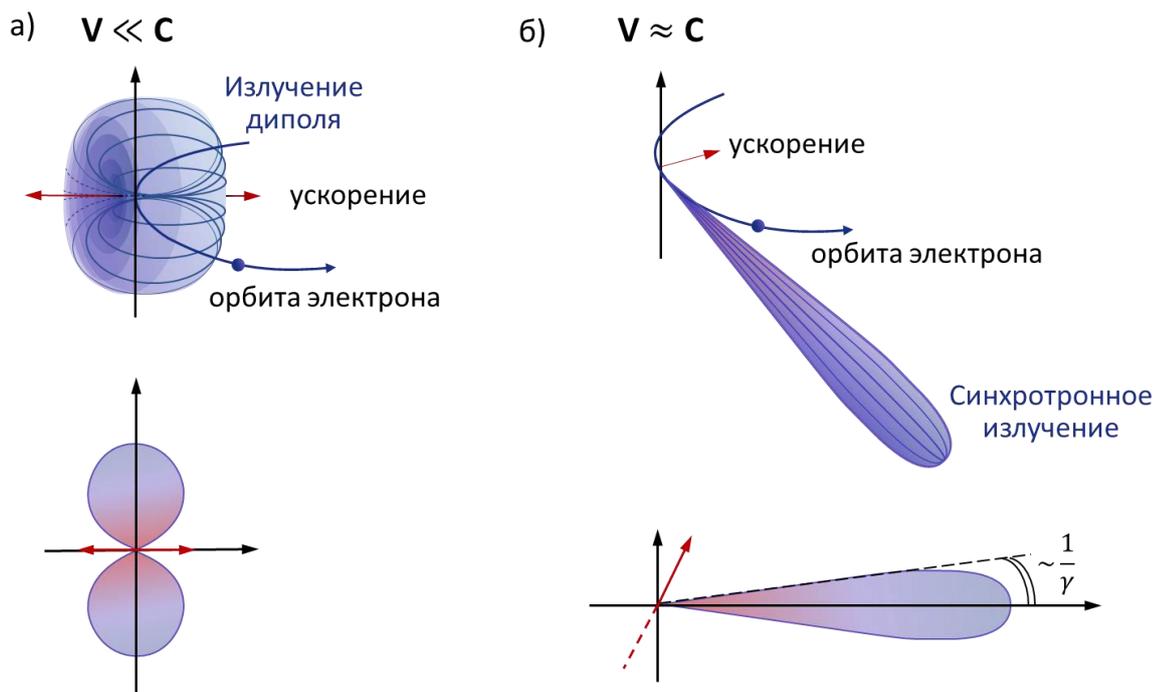


Рисунок 7.2 — Диаграмма направленности: а) излучения диполя (колеблющегося электрона), б) излучения частицы, движущейся с ультрарелятивистской скоростью в поворотном магните

Таким образом, поворотные магниты позволяют создавать интенсивные пучки синхротронного излучения, однако генерировать лучи, аналогичные лазерным, они не могут. Их излучение представляет сплошной спектр, т.е. оно некогерентно и немонохроматично. Использование монохроматоров для

выделения узкого диапазона длин волн приводит к закономерному падению интегральной интенсивности пучка. Совершенствование источников синхротронного излучения привело к созданию ондуляторов.

### 7.2.3 Ондуляторы

Ондулятор – это встраиваемая система, которая устанавливается на линейном участке ускорителя. Он представляет собой последовательность пар магнитов с противоположно направленными магнитными полями (рисунок 7.3).

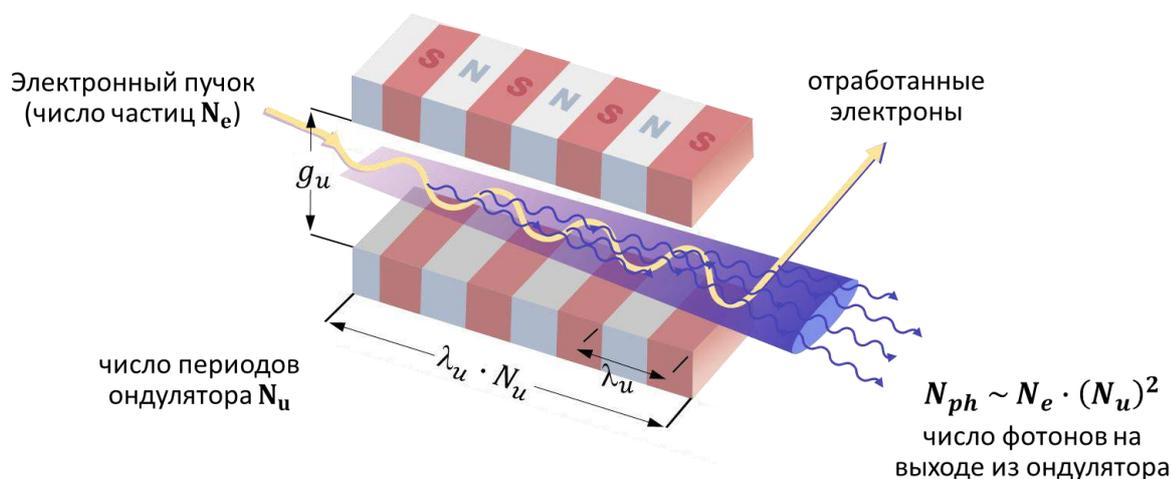


Рисунок 7.3 — Схематическое изображение ондулятора. Амплитуда отклонения электронного пучка сильно преувеличена, она составляет несколько микрометров

В зазоре между парными магнитами ондулятора создается периодическое знакопеременное магнитное поле. Под действием силы Лоренца траектория движения частиц в нем становится волнообразной (от англ. undulate – волнистый, извиваться). Проходя через каждую пару магнитов, релятивистская частица излучает электромагнитные волны в направлении своего движения. Таким образом, число фотонов на выходе ондулятора зависит не только от количества электронов в сгустке  $N_e$  (как это свойственно поворотным магнитам), но также от числа пар магнитов, из которых он состоит. Стоит отметить, что для описания «геометрии» системы принято использовать не количество парных магнитов, а число периодов ондулятора ( $N_u$ ), где период ондулятора ( $\lambda_u$ ) – расстояние между соседними сонаправленными парами магнитов (рисунок 7.3). Длина ондулятора ( $N_u \cdot \lambda_u$ ) обычно составляет от 1 до 5 метров.

Излучение, испускаемое на разных участках ондулятора, интерферирует само с собой. Вследствие этого спектр ондулятора оказывается не сплошным (что характерно для поворотных магнитов), а состоит из узких полос – гармоник. Наиболее интенсивной является основная (первая) гармоника, ее яркость

пропорциональна квадрату  $N_u$ . Вклад остальных полос определяется характеристиками магнитного поля. Этот момент будет подробнее рассмотрен в конце лабораторной работы №8. В дальнейшем, говоря о длине волны излучения ондулятора, мы будем подразумевать первую гармонику. В лабораторной работе №8 будет также рассмотрено влияние  $N_u$  и магнитного поля ондулятора на ширину спектральных линий, длительность и когерентность излучения.

Другим важным параметром ондулятора является расстояние между парными магнитами – зазор ондулятора ( $g_u$ ). Ширина зазора лежит в диапазоне от нескольких единиц до сотен миллиметров. У большинства ондуляторов данную величину можно варьировать, тем самым изменяя магнитное поле в зазоре, а, следовательно, степень искривления траектории частицы. Таким образом, сдвигая и раздвигая половинки ондулятора, можно корректировать интенсивность и спектральный состав излучения. Рассмотрим подробнее, как параметры ондулятора влияют на характеристики генерируемых электромагнитных волн.

### 7.2.3.1 Излучение ондулятора

Попадая в периодическое поле ондулятора, электроны начинают осциллировать относительно изначального направления своего движения в плоскости, перпендикулярной  $B_0$ . Период колебания частиц, а следовательно, и длина волны излучения соответствует периоду ондулятора, однако важно учитывать ряд релятивистских следствий.

Во-первых, необходимо помнить, что с точки зрения движущегося наблюдателя покоящиеся предметы имеют меньшую длину, проще говоря – кажутся короче. Это явление называется лоренцевым сокращением длины. В нашем случае, для релятивистских электронов, будет «укорачиваться» период ондулятора, а следовательно, и период поля, модулирующего их колебание. В результате период осцилляций частиц составит

$$\lambda_e = \lambda_u \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{V_e}{C}\right)^2}, \quad (7.3)$$

где  $V_e$  – скорость электронного пучка. Поскольку обычно для описания свойств частиц в ускорителях используются их энергии, перепишем формулу в следующем виде:

$$\lambda_e = \lambda_u \cdot \frac{m_{0e} \cdot C^2}{E_e} = \frac{\lambda_u}{\gamma}, \quad (7.4)$$

где  $m_{0e} \cdot C^2 \approx 0,51$  МэВ – энергия покоя электрона,  $E_e$  – энергия электронного пучка в ускорителе. Учитывая, что для энергии электрона, взятой в ГэВ, справедливо выражение  $\gamma = 1957 \cdot E_e$  [ГэВ], легко оценить, как сильно лоренцево

сокращение влияет на «воспринимаемый электронами» период ондулятора. Так, для пучка, разогнанного до 10 ГэВ, период колебания электронов будет почти в 20 000 раз короче, чем  $\lambda_u$ .

Во-вторых, колеблющийся релятивистский электрон – это движущийся источник. Благодаря релятивистскому эффекту Доплера длина электромагнитной волны, приходящая от него на детектор, «сжимается»:

$$\lambda_{ph} = \lambda_e \frac{\sqrt{1 - \frac{V_e}{C}}}{\sqrt{1 + \frac{V_e}{C}}}, \quad (7.5)$$

где  $\lambda_{ph}$  – длина волны излучения, принимаемого покоящимся детектором (в лабораторной системе отсчета). Чтобы упростить часть уравнения до параметра  $\gamma$ , умножим числитель и знаменатель на  $\sqrt{1 + \frac{V_e}{C}}$ . Учитывая, что для релятивистских скоростей  $V_e \rightarrow C$ , получим:

$$\lambda_{ph} = \frac{\lambda_e}{\gamma} \frac{1}{\left(1 + \frac{V_e}{C}\right)}, \quad \frac{V_e}{C} \approx 1 \quad \rightarrow \quad \lambda_{ph} \approx \frac{\lambda_e}{2 \cdot \gamma}. \quad (7.6)$$

Наконец, подставим выражение 7.4 и запишем зависимость длины волны синхротронного излучения от параметров системы:

$$\lambda_{ph} \approx \frac{\lambda_u}{2 \cdot n \cdot \gamma^2}. \quad (7.7)$$

$n$  – целочисленный параметр, задающий номер гармоники. Оценим  $\lambda_{ph}$  для электронного пучка с энергией в 10 ГэВ. Используем знакомое выражение  $\gamma = 1957 \cdot E_e$  [ГэВ]. Согласно расчетам, длина волны излучения ондулятора может быть в миллиарды раз меньше его периода. Так, для ондулятора с  $\lambda_u = 20$  мм,  $\lambda_{ph} \approx 0,26$  Å.

Согласно выражению (7.5), длина волны излучения ондулятора зависит исключительно от его периода и энергии электронов в ускорителе, что не слишком правдоподобно. Дело в том, что в наших расчетах не было учтено отклонение электронного пучка в ондуляторе, т.е. мы пренебрегали удлинением пути частиц за счет криволинейности их движения. На начальном этапе это приближение допустимо, поскольку амплитуда осцилляции электронов не очень велика (несколько микрометров), но для более детального анализа – отклонение пучка

необходимо учесть. Для этого в уравнение 7.7 вводится корректирующий множитель  $\left(1 + \frac{K^2}{2}\right)$ , который содержит так называемый параметр отклонения/ондуляторный параметр ( $K$ ):

$$\lambda_{ph} \approx \frac{\lambda_u}{2 \cdot n \cdot \gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2}\right). \quad (7.8)$$

$K$  определяется магнитным полем и периодом ондулятора:

$$K = \frac{e \cdot \lambda_u \cdot B_0}{2\pi \cdot m_0 e c} \approx 93,278 \cdot \lambda_u [\text{м}] \cdot B_0 [\text{Тл}]. \quad (7.9)$$

Не существует универсальной формулы для расчета магнитного поля ондулятора.  $B_0$  зависит от типа используемых магнитов (постоянные или электромагниты), эффектов остаточной намагниченности, уникальных особенностей конкретной установки и т.д. В настоящее время параметры магнитных полей синхротронных источников и ускорителей определяются численно, с помощью специальных программных пакетов.

Для приближенной оценки поля постоянных магнитов мы воспользуемся формулой, которая активно применялась более 20 лет назад, когда имеющиеся вычислительные мощности не позволяли решать сложные численные задачи [5]:

$$B_0 = a \cdot \exp \left[ -b \frac{g_u}{\lambda_u} + c \left( \frac{g_u}{\lambda_u} \right)^2 \right]. \quad (7.10)$$

Здесь  $a$ ,  $b$  и  $c$  – коэффициенты, подбираемые эмпирически для конкретного ондулятора, при определенных настройках. Например, для ондулятора на неодимовых магнитах с  $0,07 \leq \frac{g_u}{\lambda_u} \leq 0,75$ :  $a = 3,33$ ,  $b = 5,08$  и  $c = 1,54$  [5]. Несмотря на неуниверсальность данной формулы, с ее помощью можно оценить общие закономерности влияния геометрии ондулятора на свойства его излучения.

Во-первых, при учете параметра отклонения зависимость  $\lambda_{ph}$  от  $\lambda_u$  перестает быть линейной (как следовало из выражения (7.7)) и принимает более сложный вид. Другое очевидное следствие формулы (7.10) – влияние ширины зазора ондулятора на свойства его излучения. Данная взаимосвязь очень важна, т.к. позволяет автономно корректировать  $\lambda_{ph}$ , сдвигая и раздвигая парные магниты ондулятора.

Почему ширина зазора так важна, если управлять свойствами электромагнитных волн можно, изменяя энергию пучка в ускорителе? Дело в том, что на ускорителях обычно располагается несколько синхротронных источников, которые могут работать параллельно. Изменение энергии пучка при корректировке  $\lambda_{ph}$  одного ондулятора приведет к изменению настроек на всех станциях ускорителя, что не очень удобно.

Почему нельзя изменять  $\lambda_{ph}$ , варьируя период ондулятора?  $\lambda_u$  – неизменяемая характеристика ондулятора, которая задается при его строительстве. Варьировать ее в ходе эксперимента – невозможно.

Чтобы разобраться, как разные параметры установки влияют на свойства генерируемого излучения, выполним примитивную расчетную работу.

### 7.2.3.2 Определение параметров ондулятора

Предположим, что мы хотим построить ондулятор, длина волны излучения которого может изменяться от 1 до 5 Å. Чтобы зависимость  $\lambda_{ph}$  от параметров системы была максимально наглядна, сделаем ряд подстановок и перепишем выражение (7.8) в полном виде:

$$\lambda_{ph} \approx \frac{\lambda_u}{2 \cdot n \cdot \gamma^2} \left( 1 + \frac{\left( 93,4 \cdot \lambda_u [\text{см}] \cdot a \cdot \exp \left[ -b \frac{g_u}{\lambda_u} + c \left( \frac{g_u}{\lambda_u} \right)^2 \right] \right)^2}{2} \right). \quad (7.11)$$

Для начала посмотрим, насколько велик вклад корректирующего множителя  $\left( 1 + \frac{K^2}{2} \right)$ , и оценим, какие энергии электронов необходимы для генерации рентгеновского излучения. На рисунке 7.4 представлены графики зависимости длины волны излучения ондулятора от энергии электронного пучка, построенные с учетом и без учета множителя. Расчеты проведены для двух значений  $\lambda_u = 25$  и 35 мм.

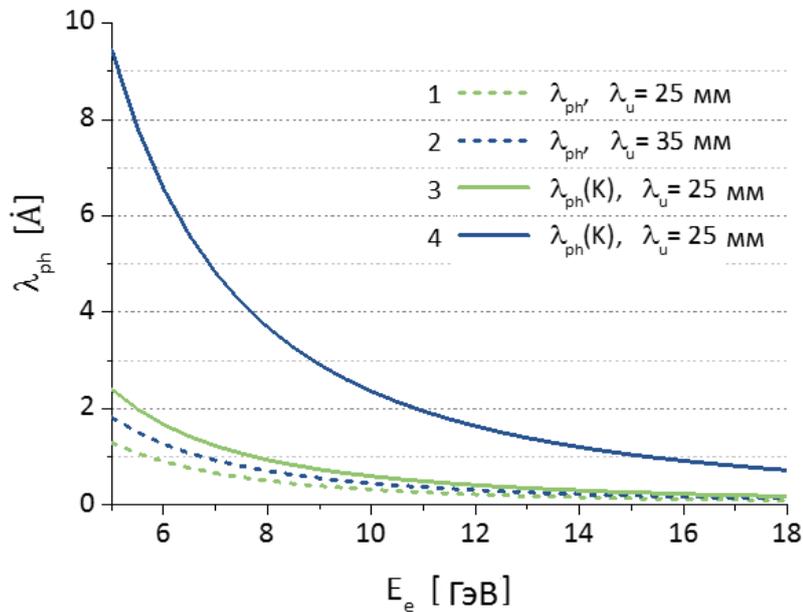


Рисунок 7.4 — Зависимость длины волны излучения ондулятора от энергии электронного пучка. Кривые 1 и 2 построены по формуле (7.7), кривые 3 и 4 – по формуле (7.11). Период ондулятора  $\lambda_u$  составляет 25 мм и 35 мм.  
 $g_u = 12$  мм

Из рисунка 7.4 видно, что при учете корректирующего множителя длина волны излучения оказывается более чувствительной к изменению  $\lambda_u$  (кривые 3 и 4 различаются резче, чем 1 и 2). Это ожидаемо, т.к., помимо линейной зависимости  $\lambda_{ph}$  от  $\lambda_u$ , «унаследованной» из формулы (7.7), в (7.11) появляется квадратичная зависимость (вклад от  $B_0$  – не так значителен). Также очевидно, что длины волн, рассчитанные по формуле (7.11), превышают значения, предсказанные выражением 7.7. Это наглядно отражено на графике: кривые 3 и 4 располагаются выше, чем 1 и 2.

Теперь сформулируем общие закономерности, которые позволят подобрать оптимальные  $E_e$  и  $\lambda_u$  для будущего ондулятора.

Период ондулятора можно рассматривать как нелинейный коэффициент, пропорциональный длине волны излучения. Чтобы получить жесткое рентгеновское излучение, –  $\lambda_u$  должен быть достаточно мал (чем меньше  $\lambda_u$ , тем меньше  $\lambda_{ph}$ ). В то же время, чем меньше  $\lambda_u$ , тем меньше шаг изменения  $\Delta\lambda_{ph}$ , при изменении других параметров системы. Следовательно, чтобы варьировать  $\lambda_{ph}$  в требуемом диапазоне, –  $\lambda_u$  должен быть достаточно велик.

Также стоит помнить о практической стороне вопроса. Делать ондулятор с маленьким  $\lambda_u$  и поддерживать его стабильное функционирование – дорого и сложно. Существуют модели микро-ондуляторов с периодом  $\lambda_u < 1$  мм [6], однако для мощных ускорителей обычно используются ондуляторы с  $\lambda_u > 15$  мм. Таким образом, нет однозначного критерия для выбора периода ондулятора. Мы

будем вести расчеты для трех  $\lambda_u$  и выберем оптимальное значение, на основе полученных результатов.

Энергия электронного пучка. Анализируя кривые 3 и 4 на рисунке 7.4, можно сделать вывод, что для генерации жесткого рентгеновского излучения энергия электронов должна быть очень велика. Характерные для современных ускорителей максимальные энергии электронов варьируются от 5 до 17,5 ГэВ. Нужно учитывать, что ускорители не всегда работают на предельных настройках. Исходя из этого, при «моделировании» ондулятора стоит выбирать некоторое промежуточное значение энергии, например  $E_e = 10$  ГэВ. В противном случае получить жесткое рентгеновское излучение можно будет только тогда, когда установка работает на максимальной мощности.

Наконец, рассмотрим зазор ондулятора  $g_u$  – параметр, который позволяет автономно изменять длину волны излучения ондулятора. Как отмечалось ранее, расстояние между парными магнитами ондулятора можно варьировать, тем самым изменяя магнитное поле в зазоре, а следовательно, и характеристики генерируемых электромагнитных волн. Стоит учитывать, что  $g_u$  также выполняет роль апертуры ондулятора. Он влияет на фокусировку электронного луча, уровень потерь электронов и такие побочные явления, как темновой ток. Помимо этого, его оптимальная ширина зависит от длины ондулятора. В данной работе эти тонкости рассматриваться не будут, но, чтобы моделируемые процессы лучше соответствовали реальным, мы будем опираться на параметры существующих ондуляторов. Минимальная ширина зазора современных ондуляторов составляет  $\sim 6$  мм. Установим такую  $g_{u\_min}$  в наших расчетах. Максимальную  $g_{u\_max}$  зададим равной 18 мм.

Итак, если вспомнить о границах применимости формулы (7.8) ( $0,07 \leq \frac{g_u}{\lambda_u} \leq 0,75$ ), то легко определить минимальную  $\lambda_u$ , для которой расчеты будут справедливы:

$$\lambda_{u\_min} = \frac{g_{u\_max}}{0.75} \approx 24 \text{ мм.}$$

С небольшим запасом зададим  $\lambda_{u1} = 25$  мм,  $\lambda_{u2} = 35$  мм,  $\lambda_{u3} = 45$  мм. В таблице 7.1 представлены параметры ондуляторов, используемые для расчета.

Таблица 7.1 — Расчетные параметры ондуляторов

Энергия электронного пучка	$E_e = 10$ ГэВ
Период ондулятора	$\lambda_{u1} = 25$ мм, $\lambda_{u2} = 35$ мм, $\lambda_{u3} = 45$ мм
Диапазон изменения ширины зазора	$g_u \in [6; 18]$ мм
Коэффициенты для расчета магнитного поля	$a = 3.33, b = 5.08, c = 1.54$

На рисунке 7.5 показана зависимость магнитного поля  $B_0$  и параметра отклонения  $K$  от ширины зазора ондулятора.

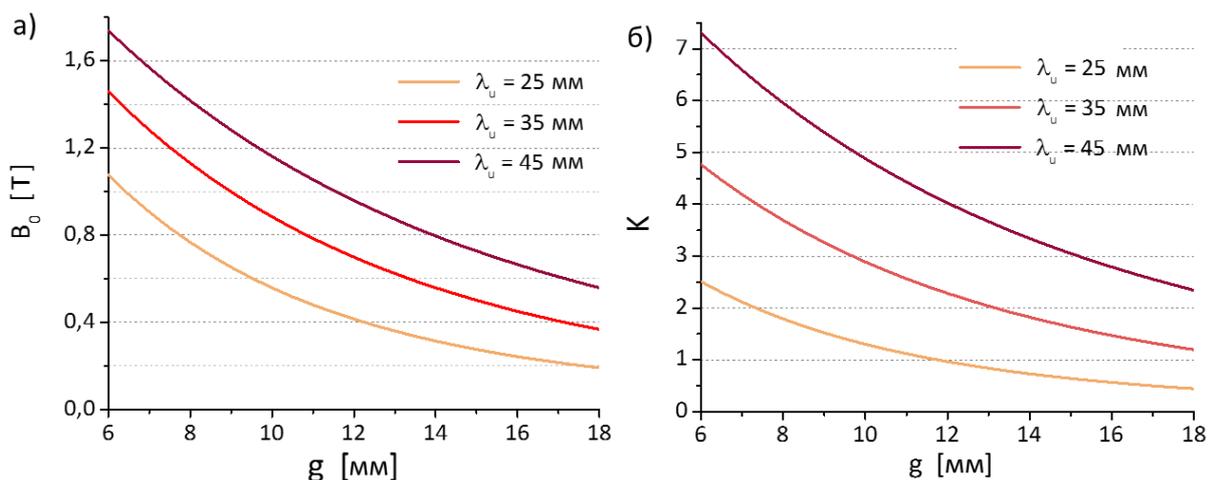


Рисунок 7.5 — Зависимость а) магнитного поля  $B_0$  и б) параметра отклонения  $K$  от ширины зазора ондулятора

Согласно расчетам, максимальное магнитное поле ондуляторов  $\lambda_{u1}$ ,  $\lambda_{u2}$  и  $\lambda_{u3}$  составляет  $B_{01} = 1,08$  ,  $B_{02} = 1,46$  и  $B_{03} = 1,74$  Т, соответственно. Полученные значения согласуются с характеристиками реальных установок. Например, максимальное магнитное поле European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) составляет  $B_0 = 0,87$  Т, магнитное поле в 1,66 Т достигается на European XFEL.

### 7.2.3.3 Расчет характеристик излучения ондулятора

Посмотрим, на каких длинах волн излучают моделируемые ондуляторы. На рисунке 7.6 представлены графики зависимости  $\lambda_{ph}$  от ширины зазора.

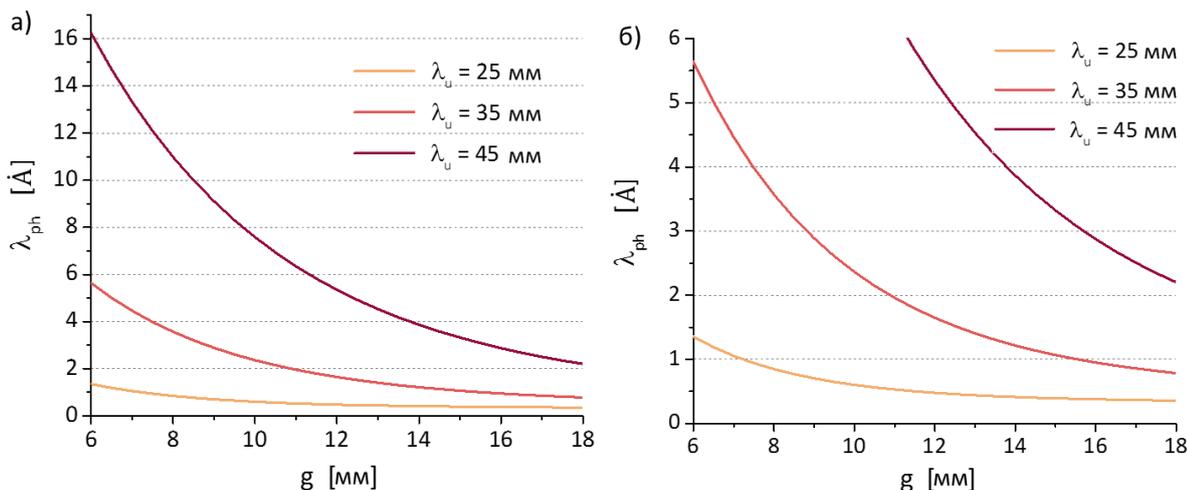


Рисунок 7.6 — Зависимость длины волны излучения от ширины зазора ондулятора. а) Весь покрываемый диапазон длин волн, б) диапазон длин волн, удовлетворяющий условиям задачи

Из графиков понятно, что поставленной задаче удовлетворяет только один ондулятор с периодом  $\lambda_{u2} = 35$  мм. При минимальной ширине зазора его излучение соответствует жесткому ультрафиолету ( $0,79 \text{ \AA}$ ), и достигает  $5,64 \text{ \AA}$ , когда магниты ондулятора максимально раздвинуты. Ондулятор с наименьшим периодом работает в границах жесткого рентгеновского излучения, диапазон доступных ему длин волн слишком узок (от  $0,36$  до  $1,35 \text{ \AA}$ ). Ондулятор с  $\lambda_{u3} = 45$  мм не способен генерировать жесткое рентгеновское излучение. Минимальная доступная ему длина волны составляет  $2,20 \text{ \AA}$ .

### 7.3 Задание для выполнения

Аналогично работе, проделанной в подразделах 7.2.3.2 и 7.2.3.3, необходимо определить параметры ондулятора, которые позволят получить синхротронное излучение с заданными характеристиками.

Проводить расчеты и построение графиков можно в любой удобной программе (Microsoft Excel, Origin, MathCad, MATLAB, Wolfram Mathematica и т.д.). В отчете необходимо описать основные этапы работы, представить все используемые формулы и константы. Выбирая тот или иной параметр, необходимо аргументировать принятое решение. Строить аргументацию можно, опираясь на информацию, представленную в теоретических сведениях или в научно-технической литературе.

### 7.4 Порядок выполнения лабораторной работы

#### 7.4.1. Определение начальных параметров ондулятора

**7.4.1.1.** Узнайте у преподавателя требования, которым должен удовлетворять моделируемый ондулятор.

**7.4.1.2.** Уточните расчетную энергию электронного пучка и формулу для определения магнитного поля ондулятора.

**7.4.1.3.** Установите диапазон изменения ширины зазора ондулятора.

**7.4.1.4.** На основе полученных данных выберите три периода ондулятора ( $\lambda_{u1}$ ,  $\lambda_{u2}$  и  $\lambda_{u3}$ ), которые с наибольшей вероятностью удовлетворят условиям задания.

**7.4.1.5.** Составьте таблицу расчетных параметров ондулятора по форме, аналогичной Таблице 7.2.

Таблица 7.2 — Расчетные параметры ондулятора

Энергия электронного пучка	$E_e$ ГэВ
Период ондулятора	$\lambda_{u1}, \lambda_{u2}, \lambda_{u3}$ мм
Диапазон изменения ширины зазора	$g_u \in [g_{u\_min}; g_{u\_max}]$ мм
Коэффициенты для расчета магнитного поля	$a, b, c$

#### 7.4.2. Расчет ондуляторного параметра и магнитного поля

**7.4.2.1.** Рассчитайте и постройте графики зависимости  $B_0$  и  $K$  от ширины зазора ондуляторов.

**7.4.2.2.** Определите максимальное и минимальное значения  $B_0$  и  $K$ .

**7.4.2.3.** Оцените реалистичность полученных значений. При необходимости, задайте новые периоды  $\lambda_{u1}$ ,  $\lambda_{u2}$  и  $\lambda_{u3}$  и/или диапазон изменения ширины зазора ондулятора.

#### 7.4.3. Расчет характеристик излучения ондулятора

**7.4.3.1.** Рассчитайте и постройте графики зависимости длины волны излучения ондуляторов от ширины зазора. Опишите полученные результаты и выберите ондулятор, который лучше удовлетворяет требованиям задания.

**7.4.3.2.** Составьте таблицу расчетных характеристик ондулятора по форме, аналогичной Таблице 7.3.

Таблица 7.3 — Рассчитанные характеристики ондуляторов

	$\lambda_{u1}$	$\lambda_{u2}$	$\lambda_{u3}$
Диапазон изменения $g_u$		$[g_{u\_min}; g_{u\_max}]$ мм	
Диапазон изменения $B_0$		$[B_{0\_min}; B_{0\_max}]$ Т	

Диапазон изменения $K$		$[K_{min}; K_{max}]$	
Диапазон изменения $\lambda_{ph}$		$[\lambda_{ph\_min}; \lambda_{ph\_max}] \text{ \AA}$	

**7.4.3.4.** Предположите, какие характеристики образцов и какими методами можно исследовать с помощью излучения смоделированных ондуляторов.

## 7.5 Форма отчета

Форма отчета должна соответствовать требованиям, представленным в Приложении А.

## 7.6 Список литературы

- Данилов С.В. Классическая и релятивистская механика: конспект лекций. – Омск: Изд-во ОмГТУ. – 2008.
- Релятивистские представления в курсе общей физики: учебное пособие. – Санкт-Петербургский гос. ун-т, Физический фак. – 2007.
- Полуниин В.М. Физика. Физические основы механики: Конспект лекций. – Курск. гос. техн. ун-т. – 2002.
- Wilson E.J.N. Special Relativity. – CERN Accelerator School. Synchrotron radiation and free-electron lasers. – 2003.
- Elleaume P. Insertion devices. – CERN Accelerator School. Synchrotron radiation and free-electron lasers. – 2003.
- Harrison J. et al. Surface-micromachined magnetic undulator with period length between 10  $\mu\text{m}$  and 1 mm for advanced light sources // Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams. – 2012. – V. 15(7). – P. 070703.

## 7.7 Контрольные вопросы

- Релятивистское сокращение длины;
- Релятивистский эффект Доплера;
- Строение ондулятора;
- Влияние конструктивных особенностей ондулятора на его излучение.

## **Лабораторная работа 8.**

### **Источники синхротронного излучения. Моделирование излучения ондулятора**

#### **8.1. Цель**

Провести расчет параметров ондуляторов и спектральных характеристик их излучения с использованием онлайн-инструмента SPECTRA, оценить границы применимости модели, представленной в лабораторной работе №7.

#### **8.2. Краткие теоретические сведения**

##### **8.2.1. Моделирование оптических свойств синхротронного излучения**

###### **8.2.1.1 Определение параметров ондулятора**

В лабораторной работе №7 представлена упрощенная модель определения длины волны излучения ондулятора. Познакомимся с более сложным аналитическим подходом и оценим, согласуется ли его результаты с нашими расчетами. Воспользуемся онлайн-инструментом SPECTRA<sup>©</sup> [<https://spectrax.org:3000/>], предназначенным для моделирования оптических свойств синхротронного излучения, испускаемого поворотными магнитами, ондуляторами, и другими системами, создающими неоднородное магнитное поле. В SPECTRA<sup>©</sup> учитывается значительно больше параметров, чем в модели из лабораторной работы №7. В ней можно задавать силу тока в ускорительном кольце, количество периодов и длину ондулятора, структуру магнитного поля и многое другое. Нас интересуют характеристики, отвечающие за спектральный состав излучения. Поэтому мы сфокусируемся на энергии электронного пучка  $E_e$ , ширине зазора  $g_u$  и периоде ондулятора  $\lambda_u$  (рисунок 8.1).

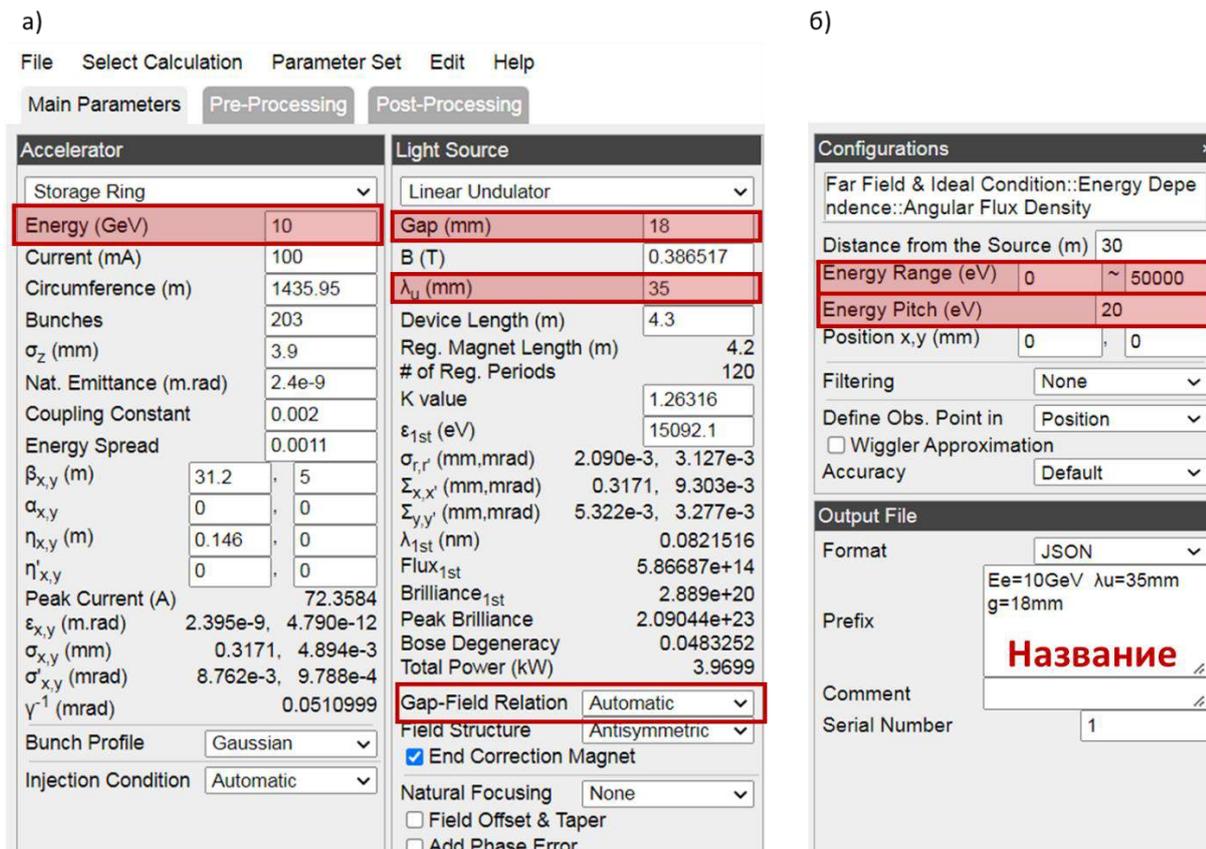


Рисунок 8.1 — Меню параметров SPECTRA.

а) Окно определения параметров ускорителя и источника излучения. Во второй колонке представлен расчет параметров линейного ондулятора с изменяемой шириной зазора. Энергия электронного пучка – 10 ГэВ. Период ондулятора  $\lambda_{u2} = 35$  мм, ширина зазора  $g_u = 18$  мм. б) Настройки расчетных параметров. Анализируемый диапазон энергий излучения – от 0 до 50 000 эВ

В первом блоке Accelerator задаем энергию электронного пучка [Energy (GeV)] = 10. Остальные параметры ускорителя можно не изменять (рисунок 8.1).

Во втором блоке Light Source указываем характер зависимости поля ондулятора от ширины зазора: в окне Gap-Field Relation меняем опцию «None» на «Automatic». Теперь есть возможность задавать величину  $g_u$ . Рассчитаем минимальную длину волны, доступную выбранному ондулятору ( $\lambda_{u2} = 35$  мм), т.е. спектр его излучения при максимальной ширине зазора ( $g_u = 18$  мм). По заданным параметрам программа автоматически определяет магнитное поле [B(T)] и параметр отклонения ондулятора [K value]. Полученные величины ( $B_0 = 0,37 T$  и  $K = 1,3$ ) мало расходятся с предсказаниями упрощенной модели ( $B_0 = 0,37 T$  и  $K = 1,2$ ), несмотря на то, что выбор формулы для расчета магнитного поля в ней был сделан грубо.

### 8.2.1.2 Расчет спектральных характеристик ондулятора

Построим спектр ондулятора. В разделе Select Calculation выберем [Far Field & Ideal Condition] → [Energy Dependence] → [Angular Flux Density]. В появившемся блоке Configurations зададим диапазон длин волн [Energy Range (eV)] = 0 ÷ 50 000 и шаг изменения энергии [Energy Pitch (eV)] (влияет на скорость выполнения расчетов). Запускаем вычисления: в верхнем меню нажимаем [Run] → [Start Calculation]. Переходим из окна параметров [Main Parameters] в окно визуализации данных [Post-Processing]. Выведем на экран спектральную яркость: в окне Output Data, в разделе Items to Plot выберем «GA. Brilliance». На рисунке 8.2 показан рассчитанный программой спектр.

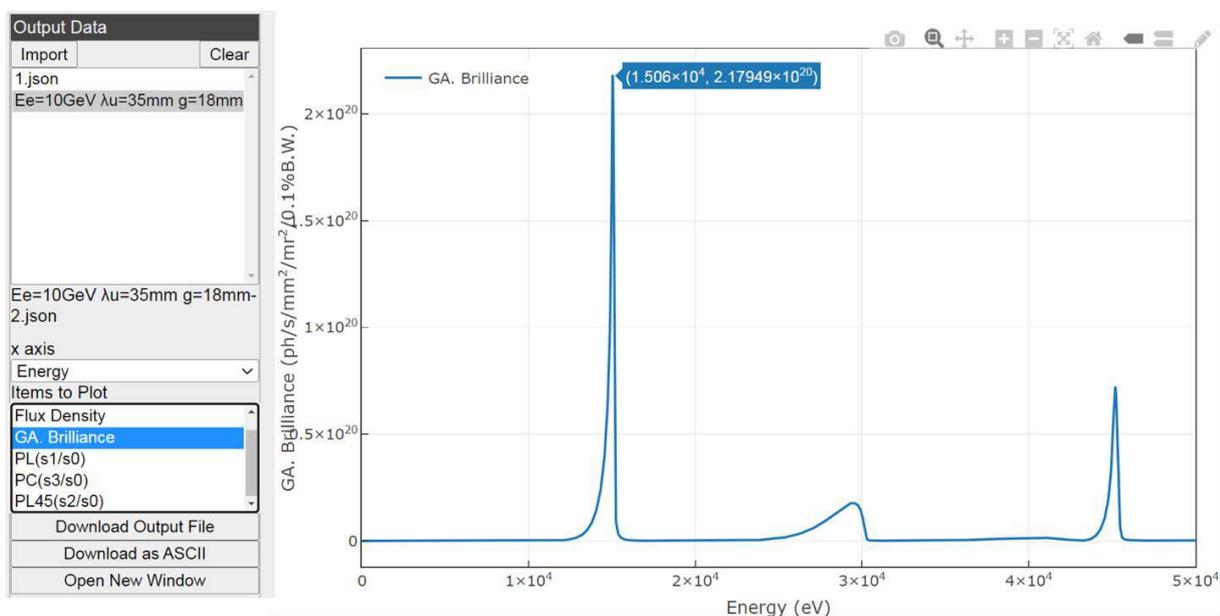


Рисунок 8.2 — Спектральная яркость излучения ондулятора, рассчитанная в SPECTRA. Энергия электронного пучка 10 ГэВ. Период ондулятора  $\lambda_{u2} = 35$  мм, ширина зазора  $g_u = 18$  мм

*Яркость (brilliance / spectral brightness)* – одна из основных характеристик синхротронного излучения. Она определяется числом фотонов, испускаемых за 1 секунду в определенном диапазоне энергий (BW – bandwidth) с единичной площади излучающей поверхности в единицу телесного угла расходимости фотонного пучка. Диапазон энергий обычно берется равным 0,1% от полосы пропускания. Таким образом, яркость имеет размерность  $\left[ \frac{\text{фотон}}{\text{с} \cdot \text{мм}^2 \cdot \text{мрад}^2 \cdot 0.1\% BW} \right]$ .

Согласно SPECTRA, максимум излучения ондулятора приходится на 15,06 кэВ (рисунок 8.2). Чтобы сравнить это значение с прогнозами, сделанными в лабораторной работе №7, переведем длину волны электромагнитного излучения в энергию. Для этого удобно использовать приближенную формулу:

$$E_{ph}[\text{эВ}] = \frac{12398}{\lambda_{ph}[\text{Å}]} \quad (8.1)$$

Согласно расчету, энергия излучения ондулятора в упрощенной модели составляет 15,8 кэВ, что хорошо согласуется с данными СПЕКТРА. Расхождения результатов незначительны и для двух других ондуляторов из лабораторной работы №7. На рисунке 8.3 представлены спектры трех ондуляторов и отмечены положения их основных гармоник, рассчитанные с помощью формулы 7.11.

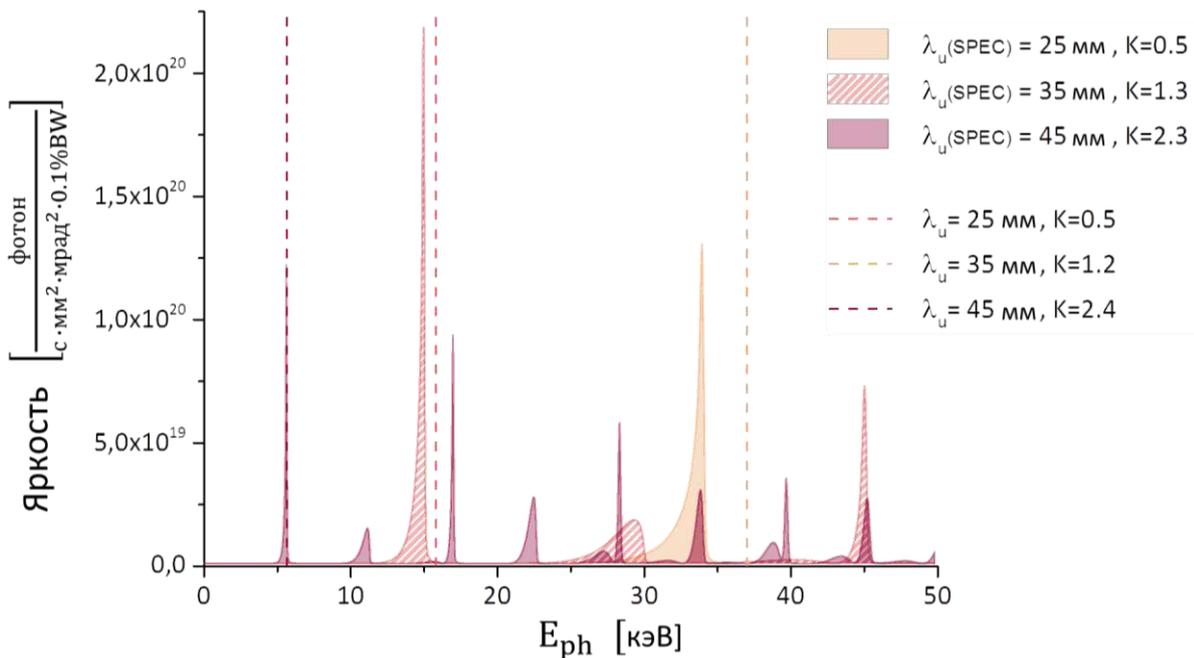


Рисунок 8.3 — Спектральная яркость излучения ондуляторов с разными периодами ( $\lambda_{u1} = 25$  мм,  $\lambda_{u2} = 35$  мм,  $\lambda_{u3} = 45$  мм), рассчитанная в СПЕКТРА. Пунктирные линии показывают энергии основных гармоник ондуляторов, рассчитанные по формуле 7.11

Из рисунков 8.2 и 8.3 видно, что спектр ондулятора представляет набор эквидистантно расположенных полос: помимо основной полосы, отчетливо видны высшие гармоники. Стоит отметить, что яркость побочных гармоник у ондулятора  $\lambda_{u2}$  невелика, т.е. его излучение близко к монохроматичному.

### 8.2.2 Влияние ондуляторного параметра на спектр излучения

Яркость и частота расположения гармоник зависит от траектории движения электронов в зазоре ондулятора, т.е. от параметра  $K$ . Для ондуляторов параметр отклонения обычно лежит в диапазоне от 0,3 до 10. Эти границы условны, определяющую роль играют характеристики генерируемого излучения. При увеличении  $K$  увеличивается амплитуда колебания электрона в зазоре. Ось

вращения конуса излучения частицы перестает совпадать с направлением ее движения (рисунок 8.4). Вследствие этого интерференция электромагнитных волн, испускаемых разными парными магнитами, снижается, и возрастает вклад высших гармоник (бордовый спектр, рисунок 8.3).

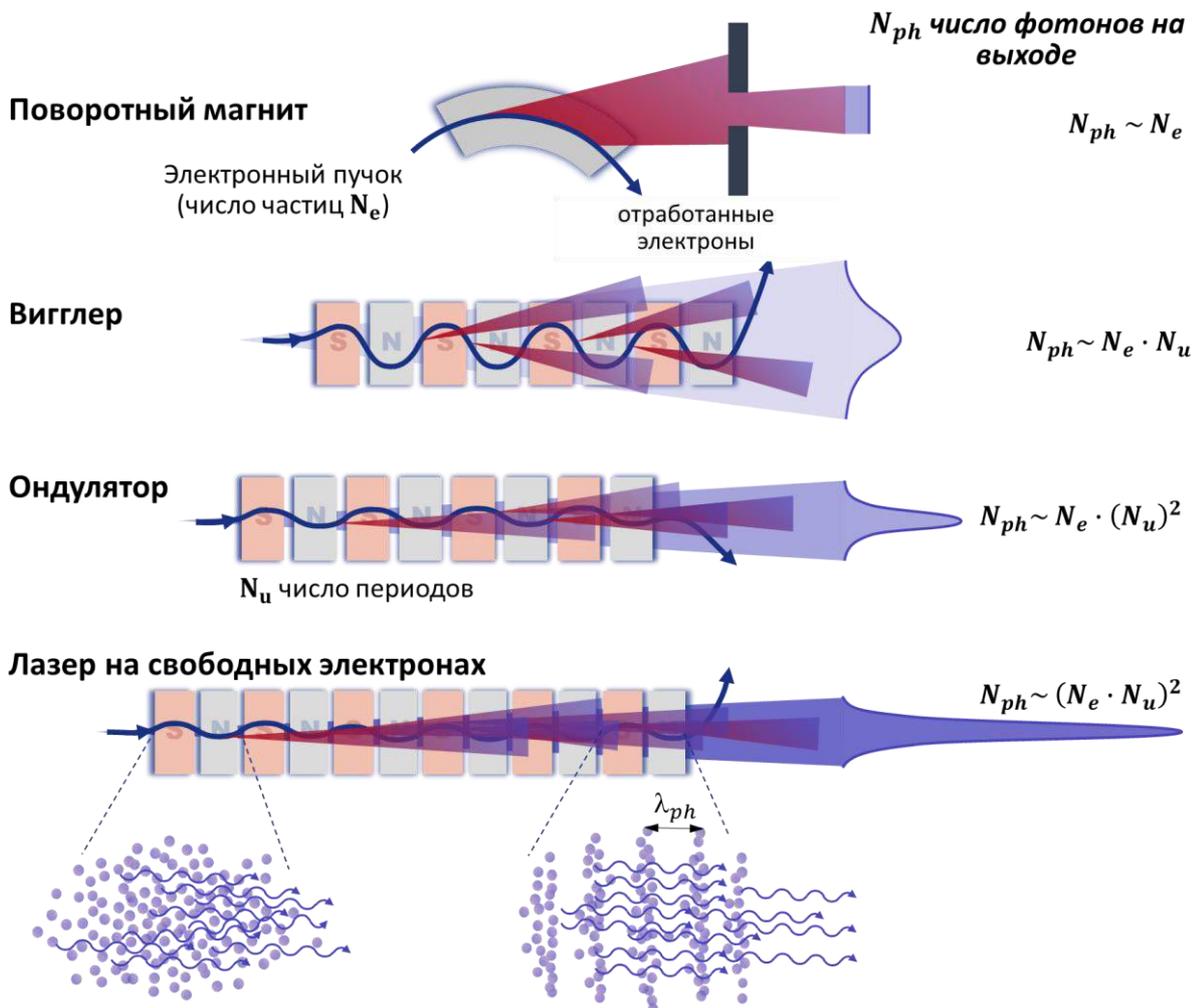


Рисунок 8.4 — Принцип работы синхротронных источников. В нижней части рисунка проиллюстрировано группирование пучка электронов (фиолетовые кружки) в диски

При  $K \geq 10$  конструктивная интерференция становится минимальной. Излучение такой системы представляет набор большого числа близкорасположенных гармоник, которые накладываются друг на друга и сливаются в сплошной спектр. Установки, работающие в таком режиме, называются *вигглерами* (рисунок 8.4).

Обратная картина наблюдается, когда  $K < 1$ . Полосы сильно разнесены друг с другом, яркость первой гармоники многократно превышает яркость высших гармоник. Излучение становится близким к монохроматическому (рыжий спектр, рисунок 8.3).

### 8.2.3 Влияние длины ондулятора на спектр излучения

Особенно интересным является случай «длинных» (несколько десятков метров) ондуляторов. В них запускается режим *самоусиленного спонтанного излучения* (SASE – self-amplified spontaneous emission). Он обусловлен интерференцией испускаемых электромагнитных волн и электронов.

Свет распространяется быстрее, чем электроны. Он нагоняет частицы, летящие впереди, и взаимодействует с ними, ускоряя одни и замедляя другие. В результате электроны постепенно группируются в множество тонких дисков, отстоящих друг от друга на длину волны излучения (рисунок 8.4). Важным следствием этого процесса является то, что все электроны в одном диске излучают свет «синхронно», т.е. они создают короткие яркие рентгеновские вспышки со свойствами лазерного излучения. Ондуляторы, работающие в режиме SASE, принято называть *лазерами на свободных электронах* (FEL – Free-electron laser).

### 8.3 Задание для выполнения

Аналогично работе, проделанной в разделе 2.1, необходимо определить параметры ондулятора и получить кривые спектральной яркости его излучения с помощью онлайн-инструмента SPECTRA. Получение данные требуется сравнить с результатами лабораторной работы №7. Использование дополнительных инструментов для проведения вспомогательных расчетов и построения графиков не ограничено. В отчете необходимо описать основные этапы работы, представить все используемые формулы.

### 8.4 Порядок выполнения лабораторной работы

#### 8.4.1. Определение начальных параметров ондулятора

**8.4.1.1.** Возьмите параметры ондуляторов из лабораторной работы №7. Выпишите их в таблицу, аналогичную Таблице 8.1. Если лабораторная работа №7 не была выполнена, получите необходимые данные у преподавателя.

Таблица 8.1 — Расчетные параметры ондуляторов

Энергия электронного пучка	$E_e$ ГэВ
Период ондулятора	$\lambda_{u1}, \lambda_{u2}, \lambda_{u3}$ мм
Диапазон изменения ширины зазора	$g_{u \min}$ мм

**8.4.1.2.** Возьмите характеристики ондуляторов при максимальной ширине зазора, полученные в лабораторной работе №7. Выпишите их в таблицу, аналогичную Таблице 8.2.

Таблица 8.2 — Рассчитанные характеристики ондуляторов

Рассчитываемая величина	$\lambda_{u1}$		$\lambda_{u2}$		$\lambda_{u3}$	
	№7*	№8**	№7	№8	№7	№8
$B_0, T$						
$K$						
$E_{ph}, кЭВ$						

\* – данные, полученные при выполнении лабораторной работы №7.

\*\* – данные, полученные с помощью SPECTRA.

#### 8.4.2. Расчет ондуляторного параметра и магнитного поля

8.4.2.1. Задайте в SPECTRA расчетные параметры ондулятора.

8.4.2.2. Выпишите вычисленные значения ондуляторного параметра и магнитного поля в таблицу, аналогичную Таблице 8.2.

8.4.2.3. Сравните вычисленные  $B_0$  и  $K$  со значениями, полученными в лабораторной работе №7.

#### 8.4.3. Расчет спектральных характеристик излучения ондулятора

8.4.3.1. Постройте кривую спектральной яркости излучения ондулятора.

8.4.3.2. Проанализируйте полученный спектр.

8.4.3.3. Выпишите энергию излучения ондулятора в таблицу, аналогичную Таблице 8.2.

8.4.3.4. Внизу окна Output Data выберите опцию [Download as ASCII] и загрузите полученный массив данных.

#### 8.4.4. Сравнение спектральных характеристик излучения ондуляторов с разными периодами

8.4.4.1. Повторите расчеты п. 8.4.2 и 8.4.3 для двух других ондуляторов из лабораторной работы №7.

8.4.4.2. Постройте спектры трех ондуляторов на одном графике (аналогично рисунку 8.3). Отметьте энергии основных гармоник ондуляторов, полученные в лабораторной работе №7.

8.4.4.3. Сравните положения основных гармоник ондуляторов с соответствующими энергиями в лабораторной работе №7.

8.4.4.4. Проанализируйте динамику изменения спектральной яркости ондулятора при увеличении ондуляторного параметра.

### **8.4.5. Анализ спектральных характеристик излучения ондулятора при варьировании произвольного параметра**

**8.4.5.1.** Выберите один (или несколько) параметров системы, которые могут влиять на излучение ондулятора, но ранее не были проанализированы. Например: сила тока [Current (mA)] или разброс энергии [Energy Spread] в ускорителе, количество периодов в ондуляторе [# of Reg. Periods] (рисунок 8.2(a)).

**8.4.5.2.** Проанализируйте, как изменение данного параметра (не менее четырех точек) влияет на спектр излучения ондулятора.

**8.4.5.3.** Постройте график, отражающий динамику в изменении спектральных характеристик ондулятора.

**8.4.5.4.** Приведите описание причин возникновения наблюдаемой динамики.

### **8.5 Форма отчета**

Форма отчета должна соответствовать требованиям, представленным в Приложении А.

### **8.6 Список литературы**

– SPECTRA [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://spectrax.org:3000/>, свободный. Яз. англ.

– Tanaka T. and Kitamura H. General Methods for SR Calculation // Journal of Synchrotron Radiation. – 2001. – V. 8. – P. 1221.

### **8.7 Контрольные вопросы**

- Яркость синхротронного излучения;
- Влияние ондуляторного параметра на траекторию движения частиц и спектр излучения ондулятора;
- Вигглер;
- Лазер на свободных электронах.

**Приложение А**  
**Пример оформления отчета**

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования**

**«Национальный исследовательский университет ИТМО»**

**ОТЧЕТ**

**О ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ №...**

**«Название лабораторной работы согласно методическому пособию»**

**Выполнили:**

А.А. Иванов \_\_\_\_\_

А.Б. Иванов \_\_\_\_\_

А.В. Иванов \_\_\_\_\_

**Проверил:**

А.Г. Иванов \_\_\_\_\_

Санкт-Петербург

2023

## 1. Цель

В соответствии с методическими указаниями к лабораторной работе.

## 2. Задачи

### 2.1. ...

Задачи необходимо сформулировать индивидуально или в составе группы, выполняющей лабораторную работу, в соответствии с ожидаемыми результатами выполнения работы. Задачи могут быть как теоретическими (изучить, ознакомиться...), так и практическими (получить, исследовать, рассчитать ...). Каждая поставленная задача должна быть выполнена, а процесс выполнения должен быть описан в разделе «Ход работы».

## 3. Обзор литературы

### 3.1. ...

В пунктах раздела «Обзор литературы» должны быть приведены краткие теоретические сведения, поясняющие все пункты из раздела «Задачи», однако приветствуется включение в раздел «Обзор литературы» дополнительных пунктов, содержащих теоретическую информацию, необходимую для выполнения лабораторной работы.

## 4. Схема измерений (для всех лабораторных работ, кроме №7 и №8)

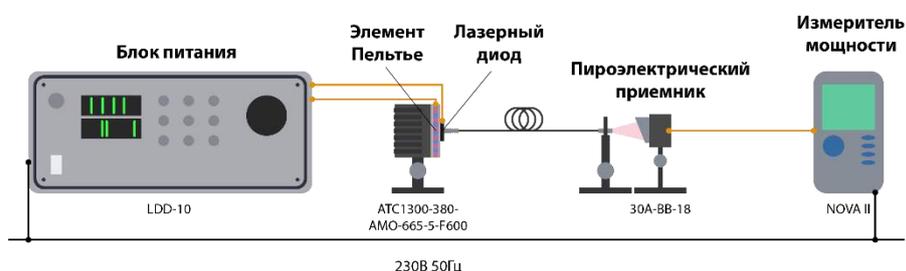


Рисунок ... — Схема измерений может быть скопирована из методических указаний

## 5. Ход работы

### 5.1. ...

Пункты раздела «Ход работы» должны быть строго согласованы с поставленными ранее задачами. Для теоретически изученных задач, описание которых вошло в раздел «Обзор литературы», в тексте соответствующего пункта раздела «Ход работы» можно ссылаться на пункт «Обзора литературы» БЕЗ

необходимости дублирования информации. Допускаются ссылки на рисунки, таблицы, формулы, приведенные в разделе «Обзор литературы» БЕЗ необходимости их дублирования.

## **6. Заключение**

В разделе «Заключение» не следует использовать рисунки и формулы, при необходимости на них можно ссылаться в соответствующие пункты раздела «Ход работы». Раздел «Заключение» должен содержать краткое описание всех результатов работы с авторскими комментариями для каждого результата. Объем данного раздела должен составлять ориентировочно 500-600 слов.

## **7. Список использованных источников**

На каждый использованный источник должна быть приведена ссылка в разделе «Обзор литературы». Не следует ссылаться на источники в других разделах.

Петренко Артем Александрович  
Карачинский Леонид Яковлевич  
Романов Алексей Евгеньевич  
Бугров Владислав Евгеньевич  
Рочас Станислав Станиславович  
Бородкин Алексей Игоревич  
Колодезный Евгений Сергеевич  
Тиходеева Екатерина Олеговна

## **ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСТОЧНИКОВ ЛАЗЕРНОГО И СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

**Учебно-методическое пособие**

В авторской редакции  
Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО  
Зав. РИО Н.Ф. Гусарова  
Подписано к печати  
Заказ №  
Тираж  
Отпечатано на ризографе

**Редакционно-издательский отдел**  
**Университета ИТМО**  
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, литер А