

Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики»  
(СибГУТИ)  
Уральский технический институт связи и информатики (филиал) в г. Екатеринбурге  
(УрТИСИ СибГУТИ)



УТВЕРЖДАЮ  
директор УрТИСИ СибГУТИ  
Минина Е.А.  
«28» 11 2025 г.

## ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

### ПО ДИСЦИПЛИНЕ

#### Б1.В.21 Волоконно-оптические системы передачи

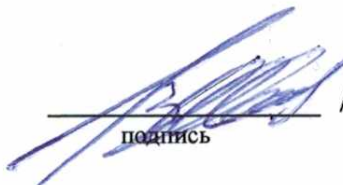
Направление подготовки / специальность: **11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»**

Направленность (профиль) / специализация: **Транспортные сети и системы связи**

Форма обучения: **заочная**

Год набора: 2026

Разработчик (-и):  
к.т.н., доцент

  
подпись / И.И. Шестаков

Оценочные средства обсуждены и утверждены на заседании многоканальной электрической связи (МЭС)

Протокол от 28.11.2025 г. № 4

Заведующий кафедрой   
подпись / Е.И. Гниломедов

Екатеринбург, 2025

Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики»  
(СибГУТИ)  
Уральский технический институт связи и информатики (филиал) в г. Екатеринбурге  
(УрТИСИ СибГУТИ)

УТВЕРЖДАЮ  
директор УрТИСИ СибГУТИ  
\_\_\_\_\_ Минина Е.А.  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 г.

## ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

### ПО ДИСЦИПЛИНЕ

#### Б1.В.21 Волоконно-оптические системы передачи

Направление подготовки / специальность: **11.03.02, Инфокоммуникационные технологии и системы связи**

Направленность (профиль) / специализация: «**Транспортные сети и системы связи**»

Форма обучения: **заочная**

Год набора: 2026

Разработчик (-и):  
к.т.н., доцент

\_\_\_\_\_ /И.И. Шестаков/  
подпись

Оценочные средства обсуждены и утверждены на заседании кафедры многоканальной электрической связи

Протокол от 28.11.2025 г. № 4

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ /Е.И. Гниломедов/  
подпись

Екатеринбург, 2025

## 1. Перечень компетенций и индикаторов их достижения

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенций	Этап	Предшествующие этапы (с указанием дисциплин/практик)
ПК-1 Способен к проведению профилактических работ на оборудовании связи	ПК-1.2 Знает принципы построения, структурные схемы, состав и характеристики телекоммуникационного оборудования первичной сети связи и вторичных сетей, принципы организации сигнализации и синхронизации в телекоммуникационных сетях	4	Этап 1 Б1.В.01 Основы теории цепей Этап 2 Б1.В.02 Основы теории электромагнитных полей и волн Этап 2 Б1.В.07 Основы построения инфокоммуникационных систем и сетей Этап 2 Б1.В.08 Теория связи Этап 3 Б1.В.13 Сети связи и системы коммутации Этап 3 Б1.В.14 Физические основы радиосвязи Этап 3 Б1.В.15 Многоканальные телекоммуникационные системы Этап 3 Б1.В.17 Спутниковые и радиорелейные системы связи Этап 3 Б1.В.18 Технологии цифрового телерадиовещания

Форма промежуточной аттестации по дисциплине – экзамен

## 2. Показатели, критерии и шкалы оценивания компетенций

2.1 Показателем оценивания компетенций на этапе их формирования при изучении дисциплины является уровень их освоения.

Индикатор освоения компетенции	Показатель оценивания	Критерий оценивания
ПК-1.2 Знает принципы построения, структурные схемы, состав и характеристики телекоммуникационного оборудования первичной сети связи и вторичных сетей, принципы организации сигнализации и синхронизации в телекоммуникационных сетях	<p>Знает</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- источники и приемники оптического излучения, принципы построения аппаратуры и систем для волоконно-оптических линий связи, их характеристики;</li> <li>- разновидности оптических усилителей, принцип их работы, характеристики</li> </ul> <p>Умеет</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- определять и измерять параметры одноволнового и многоволнового линейного тракта ВОСП;</li> <li>- производить расчет дальности связи, длины усилительного участка,</li> </ul>	<p>Умеет различать типы оптических источников излучения по их конструкции и характеристикам. Знает характеристики оптических источников излучения, самостоятельно может изобразить их зависимости. Самостоятельно, не используя справочник, может изобразить структурную схему источника излучения и пояснить принцип работы без наводящих вопросов преподавателя.</p> <p>Умеет различать типы оптических фотоприёмников по их конструкции и характеристикам. Знает характеристики фотоприемников, самостоятельно может изобразить их зависимости. Самостоятельно, не используя справочник, может изобразить структурную схему фотоприемника и пояснить принцип работы</p>

	<p>строить диаграмму уровней канала связи;</p> <p>Владеет</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- знаниями о принципах работы источников излучения, фотоприемных устройств, оптических усилителей;</li> <li>- навыками расчета диаграммы уровней</li> </ul>	<p>без наводящих вопросов преподавателя.</p> <p>Самостоятельно различает типы оптических усилителей по их конструкции и способу включения. Знает характеристики оптических усилителей, самостоятельно может изобразить их зависимости. Самостоятельно, не используя справочник, может изобразить структурную схему оптического усилителя и пояснить принцип работы без наводящих вопросов преподавателя.</p> <p>Знает, что такое оптический модулятор, для чего он применяется, может изобразить схему и пояснить принцип работы без наводящих вопросов преподавателя.</p>
--	--	--

### Шкала оценивания.

#### Экзамен

5-балльная шкала	Критерии оценки
Отлично «5»	Самостоятельно и правильно ответил на поставленные теоретические вопросы экзаменационного билета. Уверенно, логично, последовательно и аргументировано излагает свой ответ. Может ответить на дополнительные вопросы. Самостоятельно и правильно решил задачу экзаменационного билета. Уверенно и логично объясняет ход решения. Ответы на поставленные вопросы экзаменационного билета даются студентом без зачитывания с листа, где студентом сделаны отметки, подсказки, выкладки на поставленный вопрос билета.
Хорошо «4»	Самостоятельно ответил на поставленные теоретические вопросы экзаменационного билета. Не уверенно отвечает на уточняющие и дополнительные вопросы. Самостоятельно и правильно решил задачу экзаменационного билета. Уверенно и логично объясняет ход решения, обосновывая его законами «Теории электрических цепей». Ответы на поставленные вопросы экзаменационного билета даются студентом с подглядыванием в лист, где студентом сделаны отметки, подсказки, выкладки на поставленный вопрос билета.
Удовлетворительно «3»	Самостоятельно, но не полно ответил на поставленные теоретические вопросы экзаменационного билета. При этом допускает ошибки. Не уверенно или вообще не отвечает на уточняющие и дополнительные вопросы. Решил задачу экзаменационного билета. При наличии ошибок, может исправить их за счет наводящих вопросов. Не уверенно объясняет ход решения задачи. Ответы на поставленные вопросы экзаменационного билета даются студентом зачитывая в лист, где студентом сделаны отметки, подсказки, выкладки на поставленный вопрос билета.
Неудовлетворительно «2»	Ответы на поставленные вопросы экзаменационного билета даются студентом зачитывая в лист, где студентом сделаны отметки, подсказки, выкладки на поставленный вопрос билета. Не отвечает или дает неправильные ответы на уточняющие и дополнительные вопросы. Не решена задача экзаменационного билета, или задача решена неправильно.

### 3. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания по дисциплине

#### 3.1. В ходе реализации дисциплины используются следующие формы и методы текущего контроля

Тема и/или раздел	Формы/методы текущего контроля успеваемости
<b>ПК-1.2</b> Знает принципы построения, структурные схемы, состав и характеристики телекоммуникационного оборудования первичной сети связи и вторичных сетей, принципы организации сигнализации и синхронизации в телекоммуникационных сетях	
Раздел 1 Основы построения волоконно-оптических систем передачи (ВОСП).	Самостоятельная работа, конспект лекций ДКР (для ЗФО)
Раздел 2 Источники оптического излучения.	Самостоятельная работа, конспект лекций Практическое занятие Лабораторное занятие ДКР (для ЗФО)
Раздел 3 Модуляция излучения источников электромагнитных волн оптического диапазона.	Самостоятельная работа, конспект лекций Практическое занятие ДКР (для ЗФО)
Раздел 4 Приемники оптического излучения ВОСП.	Самостоятельная работа, конспект лекций Практическое занятие Лабораторное занятие ДКР (для ЗФО)
Раздел 5 Линейные тракты цифровых ВОСП.	Самостоятельная работа, конспект лекций Практическое занятие Лабораторное занятие ДКР (для ЗФО)
Раздел 6 Волоконно-оптические системы передачи плезиохронной и синхронной цифровой иерархии.	Самостоятельная работа, конспект лекций ДКР (для ЗФО)
Раздел 7 Перспективные волоконно-оптические телекоммуникационные системы на ЕСЭ РФ.	Самостоятельная работа, конспект лекций ДКР (для ЗФО)

#### 3.2. Типовые материалы текущего контроля успеваемости обучающихся

*ПК-1 Способен к проведению профилактических работ на оборудовании связи*

#### **Конспект лекции на тему «Лазерные диоды»**

Лазер – прибор, генерирующий оптическое когерентное излучение на основе эффекта вынужденного или стимулированного излучения. (LASER, Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation – аббревиатура выражение усиление света вынужденным излучением).

Свойство когерентности излучения лазера предполагает согласованное протекание во времени и пространстве колебательных или волновых процессов. Излучаемая лазером электромагнитная волна называется когерентной, если ее амплитуда, частота, фаза, направление распространения и поляризация постоянны или изменяются упорядоченно.

Процессы переходов между электронными состояниями: поглощение фотонов, спонтанное излучение фотонов и стимулированное излучение фотонов можно связать между собой уравнением Эйнштейна:

$$B_{12} * N_1 * E(f) = B_{21} * N_2 * E(f) + A_{21} * N_2$$

где  $E(f)$  – полная энергия фотонов на единицу объема материала;

$A_{21}$  – коэффициент, определяемый вероятностью спонтанного перехода в единицу времени с уровня  $E_c$  на уровень  $E_v$ ;

$B_{21}$  и  $B_{12}$  – коэффициенты, определяемые вероятностью вынужденного перехода электронов с энергетического уровня  $E_c$  на  $E_v$  и наоборот; таким образом, произведение  $B_{12}E(f)$  характеризует вероятность поглощения, а произведение  $B_{21}E(f)$  – вероятность вынужденного излучения;

$N_1$  и  $N_2$  – число возбужденных электронов на уровнях  $E_v$  и  $E_c$ .

Физический смысл уравнения Эйнштейна можно представить так: левая часть определяет поглощение энергии внешнего фотонного поля в единицу времени, а правая – полную энергию, выделяемую в веществе в виде стимулированного и спонтанного излучения.

При прохождении волны через среду, в единице объема которой  $N_1$  электронов находятся в энергетическом состоянии  $E_v$  и  $N_2$  электронов в состоянии  $E_c$  она может поглощаться или усиливаться. В условиях термодинамического равновесия населённость нижнего уровня  $N_1$  всегда больше населённости верхнего  $N_2$ . Поэтому волна теряет больше энергии, чем приобретает, то есть имеет место поглощение света.

Для того чтобы процессы СТИ преобладали над поглощением необходимо выполнить условие:

$$\frac{СТИ}{ПОГЛ} = \frac{B_{21}N_2E(f)}{B_{12}N_1E(f)} = \frac{B_{21}N_2}{B_{12}N_1} > 1$$

При одинаковых  $B_{21}$  и  $B_{12}$  должны быть созданы условия инверсной населенности энергетических уровней  $N_2 > N_1$ , что трактуется как необходимость возбуждения электронов. При  $N_2 > N_1$  вынужденные переходы  $E_c \rightarrow E_v$  преобладают и поставляют в световую волну больше энергии, чем теряется в результате переходов  $E_v \rightarrow E_c$ . Излучаемые в результате вынужденных переходов волны по частоте, направлению распространения, поляризации и фазе тождественны первичной волне и, следовательно, когерентны друг другу. Именно когерентность вынужденного излучения приводит к усилению световой волны в среде с инверсией населённостей, а не просто к дополнительному излучению новых волн.

Среду с инверсией населённостей какой-либо пары уровней, способную усиливать излучение, обычно называют активной или лазерной. Процесс возбуждения среды с целью выполнения условия  $N_2 > N_1$  – называется накачкой, а внешний источник возбуждения – источником накачки.

В полупроводниках активную среду возможно создавать:

- 1) инжекцией носителей тока через электронно-дырочный переход;
- 2) оптическим возбуждением

В технике оптических систем связи источником накачки полупроводниковых материалов является источник электрического тока.

Из соотношения

$$\frac{СТИ}{СПИ} = \frac{B_{21}N_2E(f)}{A_{21}N_2} = \frac{B_{21}E(f)}{A_{21}} > 1$$

Видно, что для преобладания СТИ над СПИ необходимо получить высокую концентрацию фотонов в веществе.

В лазерах в качестве области пространства, в которой происходит увеличение энергии фотона в единице объема за счет стимулированного излучения ( $E(f) > 1$ ) используется оптический резонатор (рисунок 1).

Простейшим оптическим резонатором является резонатор Фабри – Перо. Его конструкция представляет два расположенных параллельно друг другу зеркала, выполненных на основе отполированных граней полупроводникового кристалла.

Исходя из вышеотмеченного, можно сделать вывод о структуре лазера (рисунок 2). При малых токах накачки в активной области, подобно СИД, возникает спонтанное излучение. При этом активная область излучает спонтанные фотоны (СПФ) во все стороны и большая часть эту область покидает. Часть фотонов спонтанного излучения отразится от зеркала РФП и пройдут строго в плоскости активной области к противоположному зеркалу.

Спонтанное излучение одного из возбуждённых атомов активной среды (т. е. атома, находящегося на уровне  $E_c$ ), прежде чем оно выйдет из объёма  $V$ , может вызвать вынужденные переходы других возбуждённых атомов и вследствие этого усилится.

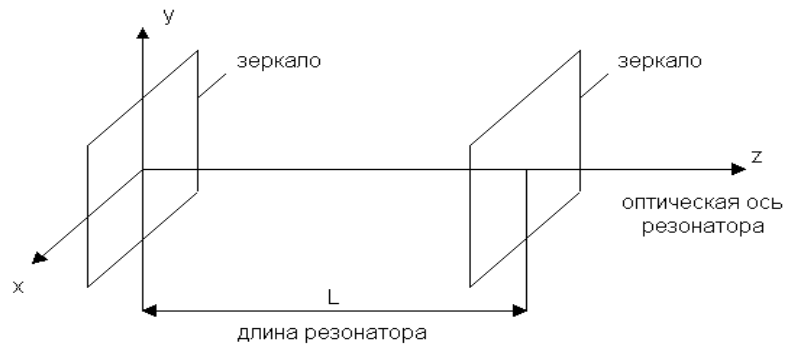


Рисунок 1 - Резонатор Фабри-Перо

Усиление зависит от пути, проходимого волной в среде, то есть от направления. Если поместить активную среду в простейший оптический резонатор, то в наиболее благоприятные условия попадает волна, распространяющаяся вдоль его оси.

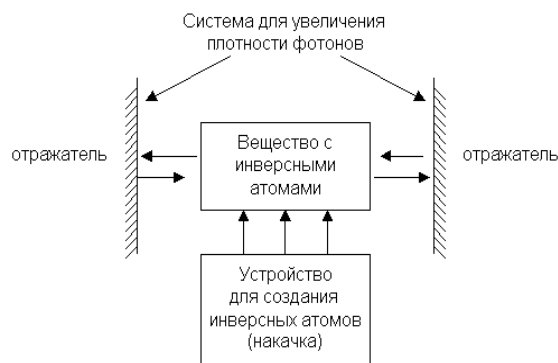


Рисунок 2 - Общая структура лазера

Фотоны, сталкиваясь с электронами, отдают им кванты энергии. Получив дополнительную энергию, некоторые электроны, находящиеся на энергетических уровнях в зоне проводимости, рекомбинируют с дырками валентной зоны. Вновь возникают фотоны, но в отличие от спонтанных, они являются стимулированными (СТФ). Когерентные волны, распространяясь вдоль оси резонатора, будут отражаться от зеркал перпендикулярно их поверхности, и интерферировать между собой.

*Интерференцией волн* называется явление наложения волн, при котором происходит устойчивое во времени их взаимное усиление в одних точках пространства и ослабление в других в зависимости от отношения между фазами этих волн. Интерферировать могут только когерентные волны, которым соответствуют колебания, совершающиеся вдоль одного и того же или близких направлений.

Длина резонатора выбирается такой, чтобы на ней укладывалось целое число полувольт:

$$L = \frac{\lambda}{2} * q, \text{ где } q=1,2,\dots - \text{число полувольт}$$

В результате каждого «прохода» интенсивность волны увеличивается, так как число СТФ растет лавинообразно, а поскольку число электронно-дырочных пар в единице объема, не меняется, стимулированное излучение начинает преобладать над спонтанным. При некотором пороговом токе накачки спонтанное излучение окончательно подавляется, в резонаторе устанавливается стоячая волна, а сквозь полупрозрачные зеркала выходит поток когерентного излучения. Этот режим называют режимом генерации лазера.

В резонаторах могут возбуждаться колебания только определенных длин волн и определенной структуры, образующие стоячую волну. Частоты этих колебаний называются резонансными или собственными частотами резонатора, а колебания модами резонатора. Резонатор лазера для системы оптической связи должен быть сконструирован таким образом, чтобы в нем сохранялось небольшое число мод, а остальные должны гаситься. Для этого резонаторы делают открытыми.

Конструкция ЛД Фабри-Перо (FP) с двойной гетероструктурой приведена на рисунке 3. При изменении величины тока накачки в лазере происходит изменение спектрального состава, что при модуляции тока накачки информационным сигналом приводит к динамическому уширению спектра и перескоку максимальной мощности излучения с одних мод на другие.

Широкий спектр лазерных мод затрудняет процесс передачи информационных сигналов по волоконно-оптическим линиям связи из-за дисперсии импульсов оптической мощности. Для преодоления этой проблемы разработаны различные конструкции одномодовых лазеров. Чаще других применяют лазеры типа РОС (DFB).

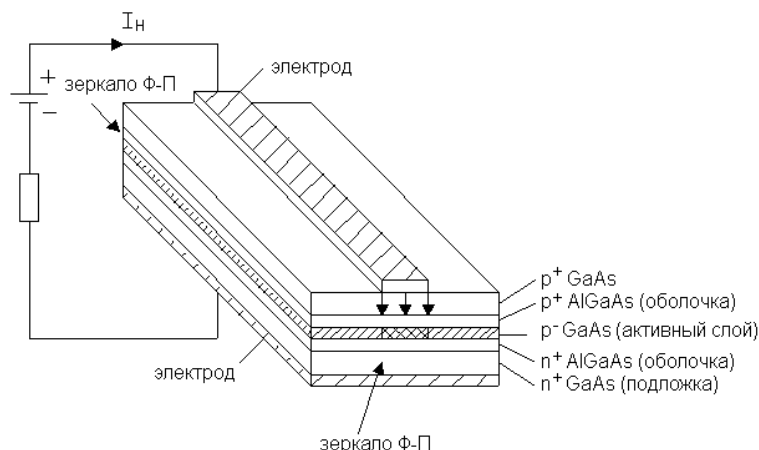


Рисунок 3 - Конструкция лазера с резонатором Фабри-Перо

В отличие от лазеров Фабри-Перо в лазерах РОС положительная обратная связь, необходимая для генерации лазерного излучения, создается не за счет зеркал, локально расположенных на торцах резонатора, а образуется внутри самого лазера. В лазерах РОС такая связь возникает благодаря распределенной структуре под названием "гофр". Это граница между резонатором и другим диэлектрическим слоем (рисунок 4). Резонатор образован между подложкой n+ InP p+InGaAsP. Гофр представляет собой фазовую решетку (оптический фильтр) с очень высокой разрешающей способностью.

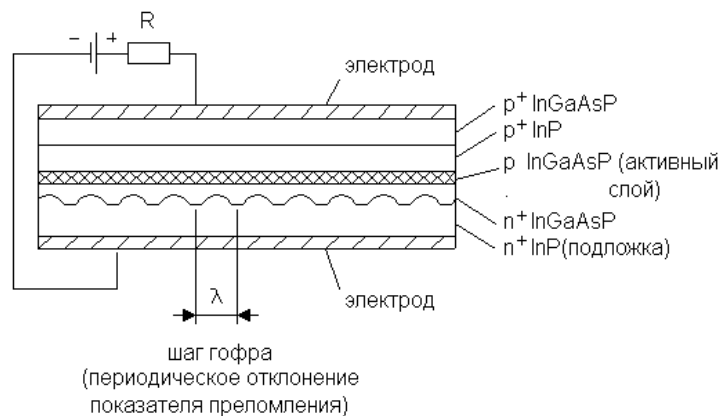


Рисунок 4 - Структура лазера РОС

Для повышения мощности излучения в одномодовый лазер РОС может быть встроено с одного из торцов зеркало.

В РОС-лазерах положительная обратная связь по фотонам обеспечивается рассеянием на неоднородностях образующих дифракционную решетку. *Дифракция* – совокупность явлений, наблюдаемых при распространении света в среде с резкими неоднородностями и связанных с отклонениями от законов геометрической оптики. Перераспределение интенсивности, возникающее вследствие суперпозиции волн, возбуждаемых когерентными источниками, расположенными непрерывно – дифракция волн (конечным числом дискретных когерентных источников - интерференция).

В результате дифракции на решетке останутся только моды, длина волны которых кратна периоду решетки, так как для этих типов волн наблюдается синфазное сложение волн дифракции. То есть периодическая структура способна обеспечить селекцию мод и одномодовый режим генерации.

Частота генерации соответствующая длине волны Брэгга:

$$f = f_0 \pm \left(1 + \frac{1}{2}\right) \frac{c}{n_3 L},$$

где L – длина активного слоя с гофром, c – скорость света в свободном пространстве.



Отличительной особенностью РБО-лазеров (DBR) является то, что в них периодическая структура вынесена за пределы активной области.

В последние годы повышенный интерес разработчиков ВОСП вызывают «викселы» - полупроводниковые лазеры с вертикальным резонатором (VCSEL – vertical-cavity surface-emitting lasers). В таких лазерах (рисунок 5) резонатор образован двумя объемными дифракционными решетками Брэгга и излучение генерируется в направлении, перпендикулярном плоскости подложки, являющейся основанием гетеро- и квантоворазмерных слоев полупроводников.

Благодаря сверхкороткой длине резонатора, викселы генерируют на одной продольной моде, при этом диаметр выходного пучка лазера достигает 20-30 мкм, что позволяет осуществлять его эффективную фокусировку в одномодовое волокно. Пороговый ток викселов крайне мал – до 2-5 мА, мощность излучения около 1 мВт. Приложением электрического поля в направлении оси резонатора в некоторых (консольных) вариантах VCSEL удается осуществлять плавную перестройку длины волны генерации в полосе длин волн 1530 – 1560 нм. Это создает возможность эффективного применения викселов в перспективных ВОСП со спектральным уплотнением (WDM и DWDM). Однако, технология изготовления таких лазеров для длин волн 1500–1610 нм (Long Wave-VCSEL, LW-VCSEL) еще недостаточно отработана из-за сложности изготовления зеркал лазера, поэтому они пока менее распространены.

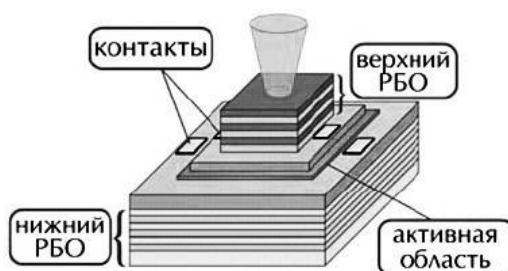


Рисунок 5 – Лазер с вертикальными резонаторами (VCSEL)

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

### Исследование основных характеристик источников оптического излучения

#### 1 Цель работы:

- 1.1. Экспериментальное измерение основных характеристик источников излучения.
- 1.2. Сравнение характеристик лазерного диода и светоизлучающего диода.
- 1.3. Изучить конструкцию источников излучения, используемых в ВОСП.

#### 2 Подготовка к работе:

- 2.1 Подготовить бланк отчета, в отчете отразить цель работы, ответы на контрольные вопросы, шаблон таблиц 1 и 2, шаблоны зависимости  $Q(\text{Gain})$ ,  $Q(\text{Attenuation})$  и  $Q(L)$ .
- 2.2 Проработать конспект лекций по тематике лабораторной работы.

#### 3 Порядок выполнения работы:

**3.1** На компьютере: «диск D:\Кафедра МЭС\ВПО\ВОСП...», в открывшейся папке лабораторной работы №1, правой кнопкой мыши перетащите файл «start.bat» на ярлык программы DOSBox на рабочем столе компьютера. Для расширения рабочего окна программы на весь экран монитора, нажмите на клавиатуре сочетание клавиш Alt + Enter. *Примечание:* работа с программой выполняется при помощи клавиатуры кнопками Esc, Enter и стрелками вверх, вниз.

**3.2** Пройти тест допуска.

**3.3** Отразить в отчете структурную схему установки для измерения ВтАХ источников оптического излучения.

В таблицу снятия ВтАХ СИД укажите 10 значений тока накачки: 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30. Занести в отчет график зависимости  $P(I)$  для температуры 20 и 45 градусов Цельсия.

**3.4** В таблицу снятия ВтАХ ППЛ укажите 10 значений тока накачки: 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30. Занести в отчет график зависимости  $P(I)$  для температуры 20 и 40 градусов Цельсия.

**3.5** В меню диаграмма направленности изучите теоретический материал. Изобразить в отчете диаграмму направленности СИД и ППЛ.

**3.6** В меню спектральная характеристика, отразить в отчет спектр на выходе СИД и многомодового ППЛ. Произвести расчет ширины спектральной линии и области свободной дисперсии многомодового ППЛ. *Примечание:* дробные значения указывать через точку. Ширина полосы излучения определяется на уровне 0,5 от максимальной мощности излучения. Область свободной дисперсии – это расстояние между спектральными модами ППЛ.

После расчета двух задач, в отчет отразить спектрограмму одномодового ППЛ. Произвести расчет ширины спектральной линии многомодового ППЛ. Расчет выполняется аналогично многомодовому ППЛ.

3.7 Завершите работу в программе выбрав меню выход.

3.6 Оформить отчет.

#### 4 Контрольные вопросы:

4.1 Чем отличается когерентный источник излучения от некогерентного?

4.2 Чем отличаются конструкции и характеристики торцевого и поверхностного СИД?

4.3 Чем отличается лазерный диод от СИД?

4.4 Какие типы лазеров используются в ВОСП?

4.5 Что показывает диаграмма направленности излучения СИД и лазера?

4.6 Укажите достоинства и недостатки СИД и лазера.

#### 5 Содержание отчета:

5.1. Цель работы.

5.2. Структурная схема установки для измерения ВТАХ источников оптического излучения.

5.3 График ВТАХ СИД и ППЛ для двух температур.

5.4. Диаграмма направленности СИД и ППЛ.

5.5 Спектральная характеристика СИД, многомодового и одномодового ППЛ. Результаты расчета параметров: ширины спектральной линии, область свободной дисперсии.

5.6. Ответы на контрольные вопросы.

5.7 Вывод по работе.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ

### Расчет параметров приемного оптического модуля

#### 1 Цель работы:

1.1 Освоение методики расчета параметров приемного оптического модуля.

#### 2 Подготовка к работе:

2.1 Изучить конструкцию и основные параметры приемных оптических модулей ВОСП по литературе и конспекту лекций.

#### 3 Задание:

Определите полосу пропускания и отношение сигнал/шум для фотоприемного устройства, содержащего интегрирующий (ИУ) или трансимпедансный усилитель и фотодетектор (ЛФД или p-i-n). Исходные данные по вариантам приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 - Исходные данные (характеристики передачи)

Характеристики передачи	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R_{\text{ПЕР}}$ , дБм	0	-3	+3	-6	+8	-2	0	+2	+10	-4
$L$ , км	50	40	70	30	80	45	60	70	90	36
$\alpha$ , дБ/км	0,35	0,4	0,3	0,34	0,26	0,42	0,6	0,38	0,24	0,5
Характеристики передачи	Вариант									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$R_{\text{ПЕР}}$ , дБм	0,5	-3,5	+3,5	-6,5	+4,5	-2,5	-0,5	-2	-1	-2,5
$L$ , км	50	40	70	30	80	45	60	70	90	36
$\alpha$ , дБ/км	0,35	0,4	0,3	0,34	0,26	0,42	0,6	0,38	0,24	0,5

Таблица 2 - Исходные данные (характеристики ФПУ)

Характеристики ФПУ	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Тип ФД	p-i-n	ЛФД	p-i-n	ЛФД	p-i-n	ЛФД	p-i-n	ЛФД	p-i-n	ЛФД
Тип усилителя	ИУ	ТИУ	ИУ	ТИУ	ИУ	ТИУ	ИУ	ТИУ	ИУ	ТИУ

R <sub>э</sub> , кОм	1000	100	1200	90	1400	110	1600	80	1800	120
C <sub>э</sub> , пФ	2,0	3,2	1,6	3,8	1,5	3,5	2,2	3,9	2,4	4,2
η <sub>вн</sub>	0,38	0,7	0,5	0,8	0,44	0,75	0,52	0,6	0,55	0,65
M	1	20	1	15	1	24	1	8	1	10
F <sub>ш</sub> (М)	1	6	1	7	1	8	1	9	1	4
T	280	290	300	310	320	290	280	270	300	315
D <sub>ш</sub>	2	3	4	5	6	7	2	8	9	4
K <sub>ус</sub>	1000	100	1200	150	1400	90	3000	140	2000	180
Характеристики ФПУ	Вариант									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Тип ФД	p-i-n	ЛФД	p-i-n	ЛФД	p-i-n	ЛФД	p-i-n	ЛФД	p-i-n	ЛФД
Тип усилителя	ИУ	ТИУ	ИУ	ТИУ	ИУ	ТИУ	ИУ	ТИУ	ИУ	ТИУ
R <sub>э</sub> , кОм	1050	250	1150	195	1155	195	1650	85	1850	125
C <sub>э</sub> , пФ	2,1	3,1	1,5	3,4	1,3	3,7	2,7	3,7	2,1	4,1
η <sub>вн</sub>	0,34	0,5	0,3	0,7	0,35	0,47	0,49	0,5	0,48	0,61
M	2	18	2	18	7	23	2	7	2	11
F <sub>ш</sub> (М)	2	4	2	8	2	9	2	7	2	5
T	285	275	325	325	305	285	295	265	315	285
D <sub>ш</sub>	4	2	5	5	5	2	7	9	8	5
K <sub>ус</sub>	1050	150	1250	250	1150	95	3200	440	500	780

#### 4 Контрольные вопросы:

- 4.1 Чем отличается прямое фотодетектирование от фотодетектирования с преобразованием?
- 4.2 Какие функциональные блоки входят в схему фотоприемного устройства (ФПУ) с прямым детектированием?
- 4.3 Какие виды предварительных усилителей применяются в фотоприемных устройствах?
- 4.4 Из каких элементов состоит входная цепь фотоприемного устройства с прямым детектированием?
- 4.5 Как устроена входная цепь фотоприемного устройства детектирования с преобразованием?
- 4.6 Как соотносятся между собой электрическая и оптическая полосы частот пропускания ФПУ?
- 4.7 Чем определяется величина соотношения сигнал/шум на выходе ФПУ?
- 4.8 Каким образом выполняется противозумовая коррекция в ФПУ?
- 4.9 Что представляет собой квантовый предел фотодетектирования?
- 4.10 Чем отличается гомодинный прием сигнала от гетеродинного в ФПУ с преобразованием?
- 4.11 Что используется для восстановления цифрового сигнала после ФПУ?

#### 5 Методические рекомендации:

Для решения задачи необходимо внимательно изучить конспект лекций по данной тематике.

Полоса частот усиления ФПУ с ИУ ограничена полосой пропускания входной цепи ФПУ и находится из соотношения (4.1):

$$\Delta F_{\text{ИУ}} = \frac{1}{2\pi \cdot R_{\text{э}} \cdot C_{\text{э}}} \quad (1)$$

Полоса частот усиления ФПУ с ТИУ ограничена полосой пропускания усилителя и находится из соотношения (4.2):

$$\Delta F_{\text{ТИУ}} \leq \frac{K_{\text{УС}}}{2\pi \cdot R_{\text{э}} \cdot C_{\text{э}}} \quad (2)$$

Фототок детектора создается падающей оптической мощностью и зависит от типа фотодетектора. Величина фототока вычисляется из соотношений (4.3) и (4.4).

$$I_{\Phi} = P_{\text{пр}} \frac{e \cdot \eta_{\text{вн}} \cdot M}{h \cdot f}, \quad (3)$$

$$P_{\text{пр}} = P_{\text{пер}} \cdot 10^{-0,1(\alpha L)}, \quad (4)$$

где  $h$  – постоянная Планка;  
 $e$  – заряд электрона;  
 $\eta_{\text{вн}}$  – внутренняя квантовая эффективность;  
 $M$  – коэффициент умножения ЛФД;  
 $P_{\text{пр}}$  – мощность сигнала на прием;  
 $P_{\text{пер}}$  – мощность сигнала на передаче;  
 $\alpha$  – километрическое затухание оптоволокна;  
 $L$  – длина кабельной линии.

Для вычисления основных шумов ФПУ, а это квантовый и тепловой шум, необходимо воспользоваться соотношениями (4.5) и (4.6):

$$P_{\text{ш.кв.}} = 2e \times M^2 \times I_{\Phi} \times \Delta F \times F_{\text{ш}}(M), \quad (5)$$

$$P_{\text{шт}} = \frac{4KT}{R_{\text{э}}} \cdot \Delta F \cdot D_{\text{ш}}, \quad (6)$$

где  $K = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/к – постоянная Больцмана.  
 Отношение сигнал/шум вычисляется из соотношения (7):

$$C/\text{Ш} = \frac{I_{\Phi}}{\sqrt{\left( 2e \cdot F_{\text{ш}}(M) \cdot I_{\Phi} + \frac{4KT}{R_{\text{э}}} \cdot M^2 \cdot D_{\text{ш}} \right) \cdot \Delta F}} \quad (7)$$

## 6 Содержание отчета:

- 6.1 Цель работы.
- 6.2 Задание и исходные данные.
- 6.3 Расчет параметров приемного оптического модуля, формулы.
- 6.4 Графики, полученные при выполнении индивидуальных заданий (график импульса на фоне шума).
- 6.5 Структурная схема приемного оптического модуля.
- 6.6 Выводы по работе.
- 6.7 Ответы на контрольные вопросы.

## 3.3. Типовые материалы для проведения промежуточной аттестации обучающихся

*ПК-1 Способен к проведению профилактических работ на оборудовании связи*

### Примерные вопросы к экзамену

- 1) Обобщенная структурная схема ВОСП. Классификация ВОСП. Основные характеристики ВОСП.
- 2) Свойства полупроводниковых материалов. Материалы для изготовления источников, приемников оптического излучения и волноводов.
- 3) Классификация оптических волокон. Затухание ОВ. Дисперсия ОВ.
- 4) Лучевой принцип распространения электромагнитной энергии по двухслойному и градиентному волокнам.
- 5) Оптические кабели. Конструкция ОК. Классификация ОК.
- 6) Требования к источникам излучения. Принцип действия когерентных и некогерентных источников оптического излучения.
- 7) Источники света. Требования к материалу ИС. Расчет длины волны излучения.
- 8) Светоизлучающие диоды. Структура СИД, конструкции СИД. Характеристики СИД.
- 9) Лазерные диоды. Конструкции ЛД. Принцип действия лазерного диода с резонатором Фабри-Перо. Характеристики ЛД (ватт-амперная, диаграмма направленности, спектр излучения, срок службы). Расчет параметров многомодового лазера.

- 10) Лазерные диоды. Классификация ЛД. Принцип действия лазерного диода с распределенной обратной связью.
- 11) Структурная схема ПОМ. Характеристики.
- 12) Фотодетекторы ВОСП. Фотодиоды типа p-i-n, распределение напряженности электрического поля. Принцип действия полупроводникового p-i-n фотодиода. Характеристики ФД.
- 13) Структура ЛФД. Принцип действия лавинного фотодиода. Распределение электрического поля. Коэффициент лавинного умножения. Шумы фотодиодов.
- 14) Усилители фотоприемных устройств. Схемы включения фотодиодов.
- 15) Приемные оптические модули. Методы фотодетектирования (прямое детектирование и детектирование с преобразованием). Основные характеристики ПрОМ.
- 16) Структурная схема ПрОМ с прямым фотодетектированием.
- 17) Модуляция излучения источников. Классификация видов модуляции. Принцип прямой модуляции. Типы оптических модуляторов. Принцип действия ЭОМ на основе ячейки Поккельса и интерферометра Маха-Зендера.
- 18) Требования к линейным сигналам оптических систем передачи. Классификация кодов и их характеристики. Анализ и сравнение кодов. Алгоритмы формирования сигналов в линейных кодах ВОСП класса mBnB, 1B2B, коды со вставками.
- 19) Линейный тракт ВОСП. Типы оптических ретрансляторов.
- 20) Структурная схема линейного тракта цифровой ВОСП, назначение узлов и требования к ним.
- 21) Структурная схема и принцип действия ретранслятора ВОСП-регенератора.
- 22) Принцип оптического усиления. Классификация оптических усилителей (ОУ). ОУ на основе редкоземельных элементов: конструкция, принцип действия, схема оптического ретранслятора на эрбиевом усилителе.
- 23) Факторы, ограничивающие дальность связи. Определение длины регенерационного участка одноволновой ВОСП.
- 24) Методы уплотнения волоконно-оптических линий связи.
- 25) Спектральное уплотнение. Достоинства этого метода.

### Типовые задачи

1. Определить оптические потери в волоконно-оптической системе с длиной секции  $L=94$  км, работающей на длине волны 1550 нм. В расчете учесть оптические потери в неразъемных и разъемных соединениях.
2. Для информационной последовательности 100001101101010011110, показать временные графики линейных кодов NRZ, RZ и 5B6B.
3. Определить необходимость установки компенсаторов дисперсии на участке ВОЛС протяженностью 120 км, если система работает по одномодовому волокну ITU-T G.652 на длине волны 1550 нм. Рекомендованная суммарная хроматическая дисперсия МСЭ-Т на пролет 120 км составляет 180 пс/км.
4. Определить количество оптических мод многомодового лазера с резонатором Фабри-Перо, если длина резонатора  $L = 250$  мкм, показатель преломления  $n = 3,9$ , центральная длина волны  $\lambda_0=0,42$  мкм, ширина полосы излучения  $\Delta\lambda=40$  нм.
5. Определить максимальную длину оптической линии связи, если мощность лазерного диода  $P_{\text{лд}} = +5$  дБм, чувствительность фотодиода  $P_{\text{фд}} = -28$  дБм, система работает на длине волны 1310 нм по одномодовому волокну стандарта ITU-T G.652. В расчете учесть строительную длину оптического кабеля равной 2 км, потери в сварном соединении 0,05 дБ, потери на оптическом разъеме 0,3 дБ.
6. Определить необходимость установки оптического усилителя на участке ВОЛС протяженностью 150 км, если мощность лазерного диода  $P_{\text{лд}} = +0$  дБм, чувствительность фотодиода  $P_{\text{фд}} = -26$  дБм, поглощение оптического сигнала в волокне на один километр  $\alpha_{\text{км}} = 0,23$  дБ/км. В расчете учесть потери в разъемных и неразъемных соединениях.

Банк контрольных вопросов, заданий и иных материалов, используемых в процессе процедур текущего контроля и промежуточной аттестации находится в учебно-методическом комплексе дисциплины и/или представлен в электронной информационно-образовательной среде по URI: <http://www.aup.uisi.ru>.

### **3.4. Методические материалы проведения текущего контроля и промежуточной аттестации обучающихся**

Перечень методических материалов для подготовки к текущему контролю и промежуточной аттестации:

1. Методические указания к выполнению практических занятий. –URL: <http://aup.uisi.ru/3724481/>
2. Методические указания к выполнению лабораторных занятий. –URL: <http://aup.uisi.ru/3724485/>
3. Методические указания к выполнению ДКР. –URL: <http://aup.uisi.ru/3725763/>
4. Пример вопросов для подготовки к экзамену. – URL: <http://aup.uisi.ru/3724487/>