

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)



## **ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ**

по дисциплине «Волоконно-оптические системы передачи»  
для основной профессиональной образовательной программы по направлению  
11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»  
направленность (профиль) – Транспортные сети и системы связи  
квалификация – бакалавр  
форма обучения – очная, заочная  
год начала подготовки (по учебному плану) – 2022

**Приложение 1 к рабочей программе**  
**по дисциплине «Волоконно-оптические системы передачи»**  
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  
\_\_\_\_\_ Е.А. Минина  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 г.

## **ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ**

по дисциплине **«Волоконно-оптические системы передачи»**  
для основной профессиональной образовательной программы по направлению  
11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»  
направленность (профиль) – Транспортные сети и системы связи  
квалификация – бакалавр  
форма обучения – очная, заочная  
год начала подготовки (по учебному плану) – 2022

Екатеринбург 2022

# 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)
<p><b>ПК-1</b> Способен к эксплуатации и развитию сетевых платформ, систем и сетей передачи данных</p>	<p><b>ПК-1.1 Знает:</b> источники и приемники оптического излучения, принципы построения аппаратуры и систем для волоконно-оптических линий связи, их характеристики; <b>ПК-1.2 Умеет:</b> определять и измерять параметры одноволнового и многоволнового линейного тракта ВОСП <b>ПК-1.3 Владеет:</b> навыками технической эксплуатации знаниями о принципах работы источников излучения, фотоприемных устройств, оптических усилителей;</p>	4	<p>1 этап Основы теории цепей 2 этап Основы теории электромагнитных полей и волн, Введение в операционную систему UNIX волн, Пакеты прикладных программ волн, Языки программирования волн, Основы построения инфокоммуникационных систем и сетей волн, Теория связи волн, Основы оптической связи, Схемотехника телекоммуникационных устройств, Вычислительная техника и информационные технологии, Микропроцессорная техника в системах связи 3 этап Оптоэлектроника и нанофотоника, Направляющие системы электросвязи, Сети связи и системы коммутации. Многоканальные телекоммуникационные системы, Технологии цифрового телерадиовещания, Электропитание устройств и систем телекоммуникаций, Сетевые технологии высокоскоростной передачи данных, Измерения в оптических сетях, Методы и средства измерений в ТКС</p>
<p><b>ПК-6</b> Способен проводить анализ статистических данных о работе транспортной сети, осуществлять текущую эксплуатацию и техническое обслуживание оборудования транспортных сетей и сетей передачи данных для поддержания показателей качества работы сети в пределах нормативных значений, выявления неисправностей, выработки предложений по оптимизации использования ресурсов оборудования</p>	<p><b>ПК-6.1 Знает:</b> - нелинейные явления проявляемые в оптоволоконных световодах; - виды специальной измерительной аппаратуры. <b>ПК-6.2 Умеет:</b> - демонстрировать способность и готовность решить любую задачу, связанную с разработкой, проектированием, и эксплуатацией ВОСП на основе действующих нормативных документов; - применять теоретические и экспериментальные методы исследования для освоения новых</p>	2	<p>1 этап Физические основы радиосвязи, Спутниковые и радиорелейные системы связи</p>

	<p>перспективных ВОСП.</p> <p><b>ПК-1.3 Владеет:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- навыками составления нормативной документации.</li> <li>- навыками оценочных расчетов основных параметров волоконно-оптического линейного тракта.</li> </ul>		
--	--	--	--

Форма(ы) 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.

Шкала оценивания	Результаты обучения	Дескрипторы уровней освоения компетенций
<b>ПК-1</b> Способен к эксплуатации и развитию сетевых платформ, систем и сетей передачи данных		
Низкий (пороговый) уровень	<p><b>ПК-1.1 Знает:</b> источники и приемники оптического излучения, принципы построения аппаратуры и систем для волоконно-оптических линий связи, их характеристики;</p> <p><b>ПК-1.2 Умеет:</b> определять и измерять параметры одноволнового и многоволнового линейного тракта ВОСП</p> <p><b>ПК-1.3 Владеет:</b> знаниями о принципах работы источников излучения, фотоприемных устройств, оптических усилителей;</p>	Слабо знает источники и приемники оптического излучения, принципы построения аппаратуры и систем для волоконно-оптических линий связи, их характеристики.
		Слабо определяет и измеряет параметры одноволнового и многоволнового линейного тракта ВОСП
		Слабо владеет знаниями о принципах работы источников излучения, фотоприемных устройств, оптических усилителей;
Средний уровень	<p><b>ПК-1.1 Знает:</b> источники и приемники оптического излучения, принципы построения аппаратуры и систем для волоконно-оптических линий связи, их характеристики;</p> <p><b>ПК-1.2 Умеет:</b> определять и измерять параметры одноволнового и многоволнового линейного тракта ВОСП</p> <p><b>ПК-1.3 Владеет:</b> знаниями о принципах работы источников излучения, фотоприемных устройств, оптических усилителей;</p>	Средне знает источники и приемники оптического излучения, принципы построения аппаратуры и систем для волоконно-оптических линий связи, их характеристики.
		Средне определяет и измеряет параметры одноволнового и многоволнового линейного тракта ВОСП
		Средне владеет знаниями о принципах работы источников излучения, фотоприемных устройств, оптических усилителей;
Высокий уровень	<p><b>ПК-1.1 Знает:</b> источники и приемники оптического излучения, принципы построения аппаратуры и систем для волоконно-оптических линий связи, их характеристики;</p> <p><b>ПК-1.2 Умеет:</b> определять и измерять параметры одноволнового и многоволнового линейного тракта ВОСП</p> <p><b>ПК-1.3 Владеет:</b> знаниями о принципах работы</p>	Знает источники и приемники оптического излучения, принципы построения аппаратуры и систем для волоконно-оптических линий связи, их характеристики.
		Очень хорошо определяет и измеряет параметры одноволнового и многоволнового линейного тракта ВОСП
		Владеет знаниями о принципах работы

	источников излучения, фотоприемных устройств, оптических усилителей;	источников излучения, фотоприемных устройств, оптических усилителей;
<b>ПК-6</b> Способен проводить анализ статистических данных о работе транспортной сети, осуществлять текущую эксплуатацию и техническое обслуживание оборудования транспортных сетей и сетей передачи данных для поддержания показателей качества работы сети в пределах нормативных значений, выявления неисправностей, выработки предложений по оптимизации использования ресурсов оборудования		
Низкий (пороговый) уровень	<b>ПК-6.1 Знает:</b> - нелинейные явления проявляемые в оптоволоконных световодах; - виды специальной измерительной аппаратуры.	Слабо знает нелинейные явления проявляемые в оптоволоконных световодах, виды специальной измерительной аппаратуры.
	<b>ПК-6.2 Умеет:</b> - демонстрировать способность и готовность решить любую задачу, связанную с разработкой, проектированием, и эксплуатацией ВОСП на основе действующих нормативных документов; - применять теоретические и экспериментальные методы исследования для освоения новых перспективных ВОСП.	Слабо умеет демонстрировать способность и готовность решить любую задачу, связанную с разработкой, проектированием, и эксплуатацией ВОСП на основе действующих нормативных документов. Слабо умеет применять теоретические и экспериментальные методы исследования для освоения новых перспективных ВОСП.
	<b>ПК-1.3 Владеет:</b> - навыками составления нормативной документации. - навыками оценочных расчетов основных параметров волоконно-оптического линейного тракта.	Слабо владеет навыками составления нормативной документации, навыками оценочных расчетов основных параметров волоконно-оптического линейного тракта.
Средний уровень	<b>ПК-6.1 Знает:</b> - нелинейные явления проявляемые в оптоволоконных световодах; - виды специальной измерительной аппаратуры.	Средне знает нелинейные явления проявляемые в оптоволоконных световодах, виды специальной измерительной аппаратуры.
	<b>ПК-6.2 Умеет:</b> - демонстрировать способность и готовность решить любую задачу, связанную с разработкой, проектированием, и эксплуатацией ВОСП на основе действующих нормативных документов; - применять теоретические и экспериментальные методы исследования для освоения новых перспективных ВОСП.	Средне умеет демонстрировать способность и готовность решить любую задачу, связанную с разработкой, проектированием, и эксплуатацией ВОСП на основе действующих нормативных документов. Слабо умеет применять теоретические и экспериментальные методы исследования для освоения новых перспективных ВОСП.
	<b>ПК-1.3 Владеет:</b> - навыками составления нормативной документации. - навыками оценочных расчетов основных параметров волоконно-оптического линейного тракта.	Средне владеет навыками составления нормативной документации. Владеет навыками оценочных расчетов основных параметров волоконно-оптического линейного тракта.
Высокий уровень	<b>ПК-6.1 Знает:</b> - нелинейные явления проявляемые в оптоволоконных световодах; - виды специальной измерительной аппаратуры.	Знает нелинейные явления проявляемые в оптоволоконных световодах, виды специальной измерительной аппаратуры.
	<b>ПК-6.2 Умеет:</b> - демонстрировать способность и готовность решить любую задачу, связанную с разработкой, проектированием, и эксплуатацией ВОСП	Умеет демонстрировать способность и готовность решить любую задачу, связанную с разработкой, проектированием, и эксплуатацией ВОСП

<p>связанную с разработкой, проектированием, и эксплуатацией ВОСП на основе действующих нормативных документов;</p> <p>- применять теоретические и экспериментальные методы исследования для освоения новых перспективных ВОСП.</p> <p><b>ПК-1.3 Владеет:</b></p> <p>- навыками составления нормативной документации.</p> <p>- навыками оценочных расчетов основных параметров волоконно-оптического линейного тракта.</p>	<p>на основе действующих нормативных документов. Умеет применять теоретические и экспериментальные методы исследования для освоения новых перспективных ВОСП.</p>
	<p>Владеет навыками составления нормативной документации, навыками оценочных расчетов основных параметров волоконно-оптического линейного тракта.</p>

2.2 Таблица соответствия результатов промежуточной аттестации по дисциплине уровню этапа формирования компетенций

Форма контроля	Шкала оценивания	Код индикатора достижения компетенций	Уровень освоения компетенции
Экзамен	удовлетворительно	ПК-1.1	низкий
		ПК-1.2	низкий
		ПК-1.3	низкий
		ПК-6.1	низкий
		ПК-6.2	низкий
		ПК-6.3	низкий
	хорошо	ПК-1.1	средний
		ПК-1.2	средний
		ПК-1.3	низкий
		ПК-6.1	средний
		ПК-6.2	средний
		ПК-6.3	низкий
	отлично	ПК-1.1	высокий
		ПК-1.2	высокий
		ПК-1.3	средний
		ПК-6.1	высокий
		ПК-6.2	высокий
		ПК-6.3	средний

### 3. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания

Процесс оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций, представлен в таблицах по формам обучения:

Тип занятия	Тема (раздел)	Оценочные средства
<b>ПК-1</b> Способен к эксплуатации и развитию сетевых платформ, систем и сетей передачи данных		
Лекция	Все разделы дисциплины	Экзамен
Лабораторная работа	Исследование основных характеристик источников излучения Исследование оптических модуляторов ВОСП Исследование основных характеристик приемного оптического модуля Оптические усилители Исследование поляризационной модовой дисперсии PMD	Лабораторная работа. Защита лабораторной работы
Практические занятия	Расчет параметров лазерного источника излучения Расчет параметров модулируемого источника излучения Расчет параметров фотоприемника Расчет параметров приемного оптического модуля Расчет линейного тракта ВОСП	Практическое занятие. Индивидуальное задание.
Самостоятельная работа	Все разделы дисциплины	Лабораторная работа, практические занятия, экзамен, ДКР
<b>ПК-6</b> Способен проводить анализ статистических данных о работе транспортной сети, осуществлять текущую эксплуатацию и техническое обслуживание оборудования транспортных сетей и сетей передачи данных для поддержания показателей качества работы сети в пределах нормативных значений, выявления неисправностей, выработки предложений по оптимизации использования ресурсов оборудования		
Лекция	Все разделы дисциплины	Экзамен
Лабораторная работа	Исследование основных характеристик источников излучения Исследование оптических модуляторов ВОСП Исследование основных характеристик приемного оптического модуля Оптические усилители Исследование поляризационной модовой дисперсии PMD	Лабораторная работа. Защита лабораторной работы
Практические занятия	Расчет параметров лазерного источника излучения Расчет параметров модулируемого источника излучения Расчет параметров фотоприемника Расчет параметров приемного оптического модуля Расчет линейного тракта ВОСП	Практическое занятие. Индивидуальное задание.
Самостоятельная работа	Все разделы дисциплины	Лабораторная работа, практические занятия, экзамен, ДКР



#### 4. Типовые контрольные задания

Представить один пример задания по каждому типу оценочных средств для каждой компетенции, формируемой данной дисциплиной.

**ПК-1** *Способен к эксплуатации и развитию сетевых платформ, систем и сетей передачи данных*

**ПК-6** *Способен проводить анализ статистических данных о работе транспортной сети, осуществлять текущую эксплуатацию и техническое обслуживание оборудования транспортных сетей и сетей передачи данных для поддержания показателей качества работы сети в пределах нормативных значений, выявления неисправностей, выработки предложений по оптимизации использования ресурсов оборудования*

### 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 населенность нижнего уровня  $N_1$  всегда больше населенности 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 населенностей, а не просто к дополнительному излучению новых волн.

Среду с инверсией населенностей 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).

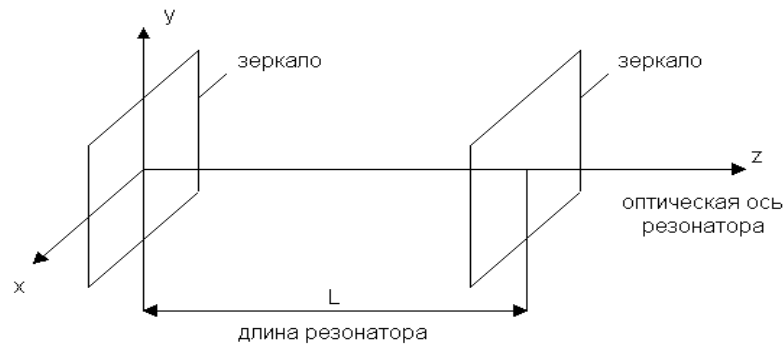


Рисунок 1 - Резонатор Фабри-Перо

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 строгу 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.

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.

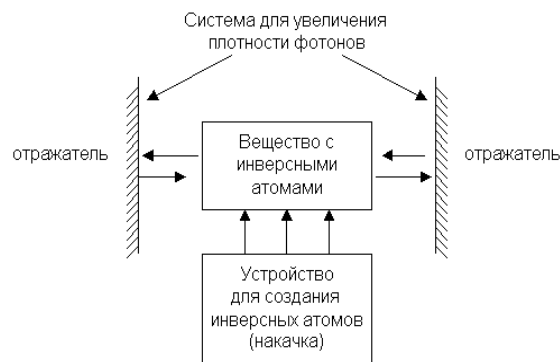


Рисунок 2 - Общая структура лазера

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 делаются открытыми.

Конструкция ЛД Фабри-Перо (FP) с двойной гетероструктурой приведена на рисунке 3.

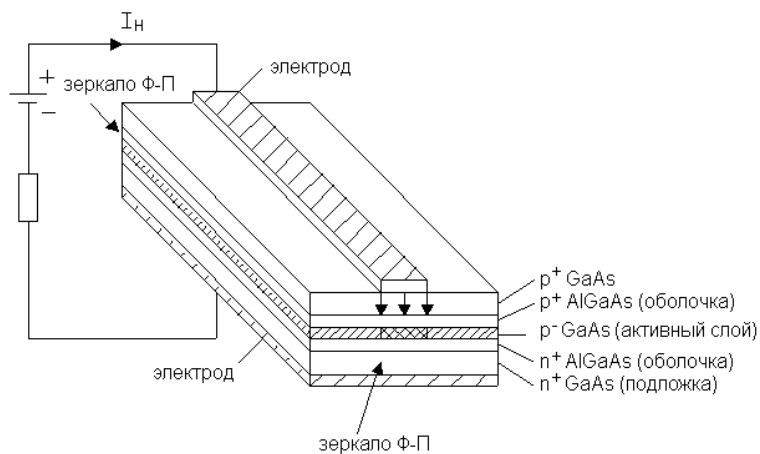


Рисунок 3 - Конструкция лазера с резонатором Фабри-Перо

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).

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.

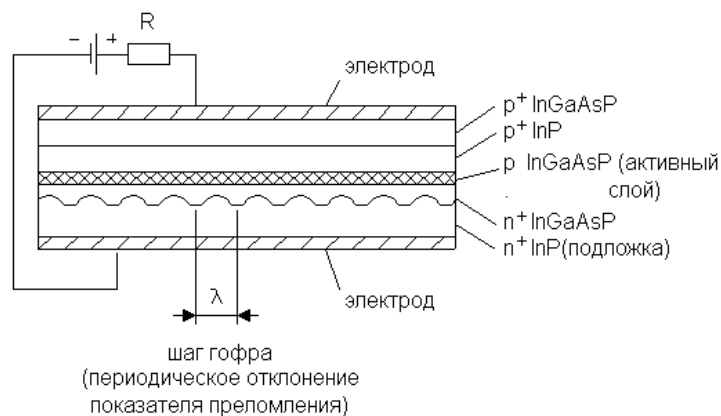


Рисунок 4 - Структура лазера РОС

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 «виксели» - 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, виксели 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.

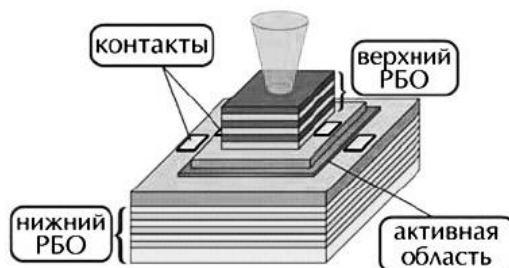


Рисунок 5 – Лазер с вертикальными резонаторами (VCSEL)



4.2.6 Установить ручку потенциометра регулировки тока накачки на лицевой панели БПИ в крайнее положение против часовой стрелки.

4.3. Используя учебную лабораторную установку «Исследование характеристик оптических источников и фотодиодов» экспериментально исследовать ватт-амперную характеристику лазерного диода.

При измерении используются следующие элементы (рисунок 1):

- электронный блок «Блок питания излучателя БПИ»;
- электронный блок «Фотоприемник»;
- лазерный диод ЛД2;
- фотодиод ФД1;
- поляризатор П1.

4.3.1 Подключить лазерный диод ЛД2 с помощью соединительного кабеля к БПИ. Соединение осуществляется с помощью разъема, блочная часть которого расположена на лицевой панели. Установить кнопочный переключатель пределов изменения тока накачки – в положение 50 мА.

4.3.2 Подключить фотоприемник ФД1 с помощью соединительного кабеля к электронному блоку «Фотоприемник». Соединение осуществляется с помощью разъема, блочная часть которого расположена на лицевой панели. Установить кнопочный переключатель выбора пределов измерения оптической мощности в положение 1 (максимальная чувствительность).

4.3.3 С помощью потенциометра тока накачки установить его значение, равное 25 мА.

4.3.4 Вращением поляризатора, расположенного между ЛД2 и ФД1 установить стрелку измерительного прибора «Оптическая мощность» на отметку 1.

4.3.5 Произвести измерения ватт-амперной характеристики ЛД. Измерения проводить изменяя  $I_n$  с шагом изменения, согласно таблице 3. Данные измерений занести в таблицу 3.

4.3.6 Установить ручку потенциометра регулировки тока накачки на лицевой панели БПИ в крайнее положение против часовой стрелки, отжать кнопочный переключатель пределов изменения тока накачки, выключить тумблер «сеть» на лицевой панели блока БПИ, отключить соединительный кабель от БПИ.

4.3.7 Отжать кнопочный переключатель выбора чувствительности на электронном блоке «Фотоприемник», выключить тумблер «сеть» на лицевой панели блока, отключить соединительный кабель от блока «Фотоприемник».

4.4. Произвести обработку результатов измерений.

4.4.1. По измеренным значениям построить зависимость оптической мощности  $P$  в относительных единицах от тока накачки  $I_n$  для ЛД и СИД.

4.4.2. По построенным зависимостям определить:

- значения токов ЛД2 и СД, соответствующие началу генерации излучения;
- значение порогового тока  $I_{п1}$  соответствующее излому ватт-амперной характеристики лазерного диода;
- качественные отличия ватт-амперных характеристик ЛД2 и СД.

4.5. Используя программное обеспечение лабораторной работы «Исследование характеристик источников излучения» получить допуск к исследованию.

4.5.1 Произвести исследование основных характеристик источников излучения:

- 1) ватт-амперной характеристики (ВАХ) светоизлучающего диода (СИД) и полупроводникового лазера (ППЛ) при двух температурах;
- 2) диаграммы направленности СИД и ППЛ;
- 3) спектральной характеристики СИД и многомодового и одномодового ППЛ.

4.5.2. Изучить:

- 1) конструкцию СИД;
- 2) конструкцию ППЛ.

4.6 Оформить отчет.

## 5 Контрольные вопросы:

- 5.1 Чем отличается когерентный источник излучения от некогерентного?
- 5.2 Чем отличаются конструкции и характеристики торцевого и поверхностного СИД?
- 5.3 Чем отличается лазер от СИД?
- 5.4 Какие типы лазеров используются в ВОСП?
- 5.5 Что показывает диаграмма направленности излучения СИД и лазера?
- 5.6 Укажите достоинства и недостатки СИД и лазера.

## 6 Содержание отчета:

- 6.1. Цель работы.
- 6.2. Ответы на вопросы допуска к работе.
- 6.3. Результаты выполнения задания по пункту 2.3.
- 6.4. Таблица результатов измерения ВАХ источников излучения. Графики ВАХ.
- 6.5 Результаты выполнения задания по пункту 4.4.2.
- 6.6 График ВАХ СИД для двух температур.
- 6.7 График ВАХ ППЛ для двух температур.
- 6.8. Диаграмма направленности СИД.
- 6.9. Диаграмма направленности ППЛ.
- 7.10. Схема измерительной установки для снятия спектральной характеристики источников.

- 6.11. Спектральная характеристика СИД.
- 6.12 Спектральная характеристика многомодового лазера. Результаты расчета параметров.
- 6.13 Спектральная характеристика одномодового лазера. Результаты расчета ширины спектра.
- 6.14. Ответы на контрольные вопросы.
- 6.15 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
$R_{\Sigma}$ , кОм	1000	100	1200	90	1400	110	1600	80	1800	120
$C_{\Sigma}$ , пФ	2,0	3,2	1,6	3,8	1,5	3,5	2,2	3,9	2,4	4,2
$\eta_{\text{ВН}}$	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
$F_{\text{ш}}(M)$	1	6	1	7	1	8	1	9	1	4
T	280	290	300	310	320	290	280	270	300	315
$D_{\text{ш}}$	2	3	4	5	6	7	2	8	9	4
$K_{\text{УС}}$	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
$R_{\Sigma}$ , кОм	1050	250	1150	195	1155	195	1650	85	1850	125

Сэ, пФ	2,1	3,1	1,5	3,4	1,3	3,7	2,7	3,7	2,1	4,1
$\eta_{вн}$	0,34	0,5	0,3	0,7	0,35	0,47	0,49	0,5	0,48	0,61
М	2	18	2	18	7	23	2	7	2	11
Fш(М)	2	4	2	8	2	9	2	7	2	5
T	285	275	325	325	305	285	295	265	315	285
Дш	4	2	5	5	5	2	7	9	8	5
Кус	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):

$$\Delta F_{ИУ} = \frac{1}{2\pi \cdot R_з \cdot C_з} \quad (1)$$

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

$$\Delta F_{ТИУ} \leq \frac{K_{УС}}{2\pi \cdot R_з \cdot C_з} \quad (2)$$

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

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

$$P_{ПР} = P_{ПЕР} \cdot 10^{-0,1(\alpha L)}, \quad (4)$$

где  $h$  – постоянная Планка;  
 $e$  – заряд электрона;  
 $\eta_{вн}$  - внутренняя квантовая эффективность;  
 $M$  – коэффициент умножения ЛФД;  
 $P_{ПР}$  – мощность сигнала на прием;  
 $P_{ПЕР}$  – 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):

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



$$P_{\text{шт}} = \frac{4kT}{R_y} \cdot \Delta F \cdot D_{\text{шт}}, \quad (6)$$

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

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

## 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.

## Примерные вопросы для подготовки к экзамену по дисциплине

### «Волоконно-оптические системы передачи»

- 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 р-і-n, распределение напряженности электрического поля. Принцип действия полупроводникового р-і-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 Погкельса 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). ВОУ 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.

## Пример экзаменационного билета

Федеральное агентство связи Уральский технический институт связи и информатики (филиал) ФГБОУ ВО "Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики" в г. Екатеринбурге (УрТИСИ СибГУТИ)	Экзаменационный билет № <u>17</u>  по дисциплине <u>Волоконно-оптические системы передачи</u>	УТВЕРЖДАЮ: Зав. кафедрой МЭС  « <u>27</u> » декабря 20 г.
---	--	--

Направление 11.03.02 Профиль Транспортные сети и системы связи Уровень Бакалавриат Факультет ИИиУ курс 4 семестр 7

---

1) 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.

2) Требования к источникам излучения. Принцип действия когерентных и некогерентных источников оптического излучения.

### **5. Банк контрольных заданий и иных материалов, используемых в процессе процедур текущего контроля и промежуточной аттестации**

Представлен в электронной информационно-образовательной среде по URI:  
<http://www.aup.uisi.ru>.

Оценочные средства рассмотрены и утверждены на заседании кафедры МЭС

31.05.2022 г.      Протокол № 10

Заведующий кафедрой (разработчика)

  
\_\_\_\_\_

Е.И. Гниломёдов  
\_\_\_\_\_  
инициалы, фамилия

31.05.2022 г.

Оценочные средства рассмотрены и утверждены на заседании кафедры [МЭС]

31.05.2022 г.      Протокол № 10

Заведующий кафедрой (разработчика)

\_\_\_\_\_

подпись

Е.И. Гниломёдов  
инициалы, фамилия

31.05.2022 г.