

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра систем телекоммуникаций

В. Ю. Бунас, Н. В. Тарченко, В. Н. Урядов

***ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ.
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ***

*Рекомендовано УМО по образованию
в области информатики и радиоэлектроники
в качестве учебно-методического пособия для специальности
1-45 01 01 «Многоканальные системы телекоммуникаций»*

Минск БГУИР 2013

УДК 621.39(076.1)
ББК 32.811я73
Б91

Рецензенты:
кафедра телекоммуникаций и информационных технологий
Белорусского государственного университета
(протокол №8 от 20.03.2012);

начальник цикла, профессор кафедры связи учреждения образования
«Военная академия Республики Беларусь»,
кандидат технических наук, доцент, полковник А. А. Пилюшко

Бунас, В. Ю.
Б91 Волоконно-оптические системы передачи. Лабораторный практикум : учеб.-метод. пособие / В. Ю. Бунас, Н. В. Тарченко, В. Н. Урядов. – Минск : БГУИР, 2013 – 54 с. : ил.
ISBN 978-985-488-917-7.

В лабораторном практикуме изложены методики исследования основных характеристик главных компонентов волоконно-оптических систем передачи – светоизлучающих диодов и полупроводниковых лазеров, а также методика измерения основных характеристик волоконно-оптических систем передачи.

Для студентов специальностей 1-45 01 01 «Многоканальные системы телекоммуникаций» и 1-45 01 02 «Системы радиосвязи, радиовещания и телевидения».

УДК 621.39(076.1)
ББК 32.811я73

ISBN 978-985-488-917-7

© Бунас В. Ю., Тарченко Н. В.,
Урядов В. Н., 2013
© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2013

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа №1

Исследование энергетических и пространственных характеристик некогерентных источников оптического излучения4

Лабораторная работа №2

Исследование энергетических и пространственных характеристик полупроводниковых лазерных диодов13

Лабораторная работа №3

Изучение основных характеристик линейного тракта цифровой волоконно-оптической системы передачи26

Приложение А

Основные положения международного стандарта ISO 13695:2004 «Оптика и фотоника. Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерений спектральных характеристик лазеров»42

Библиотека БГУИР

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕКОГЕРЕНТНЫХ ИСТОЧНИКОВ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1.1 Изучение основных характеристик некогерентных источников оптического излучения – светоизлучающих диодов (СИД).

1.2 Экспериментальное исследование характеристик СИД.

2 ЗАДАНИЕ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

2.1 Изучить инструкцию по ТБ.

2.2 Ознакомиться с основными характеристиками СИД.

2.3 Изучить схему лабораторного макета, ознакомиться с правилами эксплуатации приборов.

2.4 Экспериментально исследовать:

– ватт-амперную характеристику СИД, определить ее крутизну;

– амплитудно-частотную характеристику СИД, определить полосу пропускания;

– пространственную характеристику СИД, рассчитать ширину диаграммы направленности;

– спектральную характеристику СИД, рассчитать спектральные параметры.

3 СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Полупроводниковые СИД в силу физики процессов, происходящих в них, существенно уступают по параметрам излучения полупроводниковым лазерным (ППЛ) диодам (некогерентное излучение, значительная ширина спектра излучения, невысокое быстродействие). Однако относительная простота технологии изготовления, низкая стоимость и большой срок службы делают целесообразным применение СИД в системах, где широкая линия излучения не является существенным недостатком: в локальных сетях, объектовых волоконно-оптических системах передачи (ВОСП) и т. д., т. е. в низкоскоростных цифровых и аналоговых ВОСП с использованием многомодовых оптических волокон. Свойства СИД с точки зрения их применения характеризуются длиной волны излучения $\lambda_{\text{изл}}$, полушириной спектра излучения $\Delta\lambda$, мощностью излучения $P_{\text{изл}}$, предельной частотой $F_{\text{гр}}$ и диаграммой направленности.

По характеру излучения и режиму работы СИД делятся на электролюминесцентные и суперлюминесцентные.

Физической основой работы СИД является инжекционная электролюминесценция, механизм которой состоит из трех основных процессов:

- инъекции неосновных избыточных носителей в базу СИД;
- излучательной рекомбинации в полупроводнике;
- вывода излучения из области генерации.

Наиболее легко и эффективно инжекция носителей осуществляется с помощью p - n -перехода. Если обе стороны p - n -перехода сильно легированы, то прямое смещение вызывает инжекцию электронов в p -область, а дырок в n -область. В результате инжекции в каждой из областей полупроводника увеличивается концентрация неосновных носителей. Это нарушает условие термодинамического равновесия, но не нарушает нейтральность обеих областей, так как положительный заряд дырок в n -области создает внутреннее электрическое поле, под действием которого из глубины n -области по направлению к переходу начинают двигаться основные носители заряда – электроны, компенсирующие заряд дырок. Электроны попадают в n -область из внешней цепи. Те же процессы наблюдаются и при инжекции неосновных носителей – электронов через p - n -переход в p -область.

В процессе излучательной рекомбинации в возбужденном внешним источником энергии полупроводнике электроны зоны проводимости рекомбинируют с дырками, находящимися в валентной зоне. При этом энергия, примерно соответствующая ширине запрещенной зоны W_3 данного полупроводника, выделяется в виде электромагнитного излучения. Длина волны возникающего в процессе рекомбинации некогерентного электромагнитного излучения определяется в соответствии с законом Планка соотношением

$$\lambda_{\text{изл}} = \frac{1,24}{W_3}, \text{ мкм},$$

где W_3 – ширина запрещенной зоны полупроводника, измеряется в эВ.

При этом следует отметить, что фотоны с энергией, большей $W_3 + 2W$, где $W = 2kT$, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура в К, поглощаются, переводя электроны из валентной зоны в зону проводимости. Следовательно, излучение возможно только в узком диапазоне частот, соответствующем энергии запрещенной зоны с шириной спектра, обусловленной величиной W . При температуре $T = 296$ К величина $W = 0,051$ (эВ) = $8,17 \cdot 10^{-21}$ (Дж).

Тогда ширина спектра излучения СИД составит

$$\Delta\lambda = \frac{2kT\lambda^2}{hc},$$

где λ – длина волны излучения в микрометрах;

h – постоянная Планка;

c – скорость света.

Для ряда материалов, используемых при изготовлении полупроводниковых источников оптического излучения, ширина запрещенной зоны и соответствующая длина волны приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Материал	GaAs	Si	Ge	InSb
Ширина запрещенной зоны, W_z , эВ	1,43	1,12	0,72	0,18
Критическая длина волны λ , мкм	0,87	1,1	1,7	6,3

Как уже отмечалось, излучение СИД является спонтанным и некогерентным, при этом его характерной особенностью является высокая линейность ватт-амперной характеристики (ВтАХ), отражающей зависимость выходной световой мощности от входного тока, при незначительной (единицы милливатт) излучаемой мощности и малой крутизне ВтАХ, что требует значительного размаха модулирующего сигнала (сотни мА).

Излучательная способность светодиода характеризуется внутренней квантовой эффективностью $\eta_{\text{внутр}}$, равной отношению числа рожденных в базе фотонов к числу инжектированных в нее носителей, и внешней квантовой эффективностью $\eta_{\text{внеш}}$, равной отношению числа фотонов, испущенных диодом, к полному числу носителей заряда, протекающих через диод. При этом, если внутренняя квантовая эффективность определяется свойствами используемого полупроводника ($\eta_{\text{внутр}} < 1$), то на внешнюю квантовую эффективность ($\eta_{\text{внеш}} < \eta_{\text{внутр}}$) большое влияние оказывает конструкция СИД (конфигурация излучаемой области, наличие просветления на поверхности полупроводника).

Конструкция СИД выбирается с таким расчетом, чтобы обеспечить режим работы при высокой плотности тока и увеличить эффективность ввода излучения в оптическое волокно (ОВ). Для ВОСП применяются в основном СИД двух конфигураций: поверхностные СИД – с выводом излучения в направлении, перпендикулярном плоскости *p-n*-перехода, и торцевые СИД, излучающие в направлении, параллельном этой плоскости (рисунок 1.1).

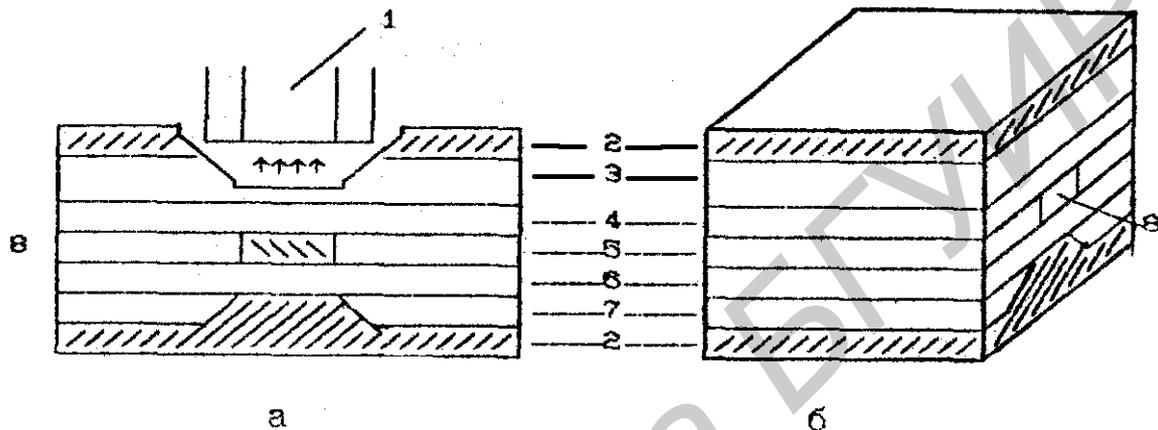
Поверхностный СИД изготавливается как на основе структур с диффузионными *p-n*-гомопереходами, так и при использовании двойных гетероструктур (ДГС). Гетеропереходами называются переходы между полупроводниками из материалов, имеющих различную ширину запрещенной зоны. Для получения гетеропереходов хорошего качества параметры кристаллических решеток полупроводников, образующих переход, должны быть близки. Гетероструктуры по сравнению с обычными *p-n*-переходами имеют две важные отличительные особенности:

- одностороннюю инжекцию: при приложении прямого смещения имеет место только инжекция электронов из эмиттера в базу из-за потенциального барьера для дырок в базовой области; в ДГС второй потенциальный барьер

препятствует выходу электронов из базовой области, обеспечивает их локализацию и тем самым повышает быстродействие диода;

– резкое различие оптических свойств разных областей кристалла, которое проявляется прежде всего в том, что длина волны излучения, генерируемого в узкозонной базе, лежит правее границы поглощения эмиттерной области, т. е. эмиттер можно рассматривать как окно, через которое излучение выводится из СИД практически без поглощения.

СИД на гомопереходах имеют низкую стоимость и высокую надежность вследствие простоты технологии.



а – поверхностный СИД на ДГС; б – торцевой СИД на ДГС

1 – оптическое волокно; 2 – контакты; 3 – подложка из n-InP; 4 – широкозонный слой из n-InP; 5 – узкозонный слой из p-GaInAsP; 6 – широкозонный слой из p-InP; 7 – диэлектрик (SiO_2); 8 – активная область

Рисунок 1.1 – Виды конструкций СИД

В поверхностных СИД спонтанное излучение в активном слое происходит равновероятно во всех направлениях, преобразование энергии накачки в свет происходит с высоким внутренним квантовым выходом, близким к 100 %. Однако полное внутреннее отражение на границе раздела «полупроводник–воздух» приводит к тому, что большая часть света остается в кристалле и внешняя квантовая эффективность составляет в лучшем случае несколько процентов. Излучение с поверхности происходит с диаграммой направленности ламбертовского типа, что усугубляет проблему ввода излучения поверхностного СИД в ОВ.

Наиболее рациональной является конструкция поверхностного СИД (см. рисунок 1.1, а), в которой волокно непосредственно стыкуется с излучающей площадкой диаметром, близким к диаметру ОВ. При этом надо помнить, что ни одна оптическая система не может повысить эффективность ввода излучения поверхностного СИД в ОВ, если его излучающая площадка больше сердцевины световода. Уменьшение излучающей площади с сохранением мощности излучения приводит к возрастанию плотности тока накачки, что сокращает срок службы прибора.

Спектр излучения поверхностных СИД соответствует спектру спонтанного излучения, ширина его по уровню половинной мощности равна 30...80 нм и не зависит от тока накачки. ВТАХ (рисунок 1.2) линейна вплоть до значений тока накачки I_{\max} , при которых нагрев активного p - n -перехода снижает выходную мощность (значения I_{\max} в зависимости от типа СИД лежат в пределах 200...400 мА). Мощность, излучаемая СИД при $I = I_{\max}$, составляет до 1,0 мВт, мощность, вводимая при этом в многомодовый световод, 50...100 мкВт. Высокая линейность ВТАХ делает поверхностный СИД одним из основных источников для аналоговых ВОСП.

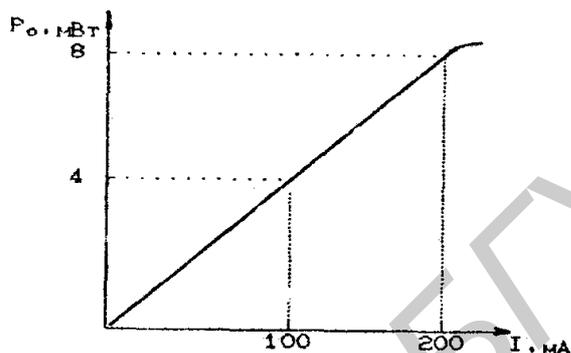


Рисунок 1.2 – ВТАХ поверхностного СИД на ДГС типа GaAlAs

Ширина полосы частот модуляции СИД определяется в общем случае временем жизни носителей τ , которое зависит от тока инжекции, концентрации электронов и дырок, толщины перехода и скорости рекомбинаций. Переменная составляющая мощности излучения P_{ω} и мощность излучения в отсутствие модуляции P_0 связаны соотношением

$$P_{\omega}/P_0 = 1/(1 + (\omega\tau)^2)^{1/2},$$

откуда следует, что верхняя граничная частота модуляции по уровню минус 3 дБ равна $F_{\text{гр}} = 1/2\pi\tau$. Для выпускаемых промышленностью СИД типовое значение $F_{\text{гр}}$ не превышает 100 МГц.

Прогресс в развитии торцевых СИД связан с появлением конструкций, в которых осуществляется усиление спонтанного излучения без обратной связи – суперлюминесцентных СИД. Суперлюминесцентные СИД по параметрам излучения занимают промежуточное положение между лазерами и поверхностными СИД со спонтанным излучением. Конструкция суперлюминесцентных СИД представляет собой двойную гетероструктуру с полосковым контактом, основное отличие которого от полоскового лазера состоит в отсутствии резонатора Фабри – Перо, т. е. в отсутствии положительной обратной связи. Спонтанное излучение происходит равновероятно во все стороны, однако часть его удерживается, направляется планарным световодом и усиливается за счет вынужденного излучения. В процессе распространения с усилением происходит сужение спектра излучения, так как спектральные компоненты, расположенные у максимума линии спонтанного излучения, усиливаются интенсивнее.

Спектр излучения суперлюминесцентных СИД сплошной, как и у поверхностных, однако значительно уже (3...5 нм), диаграмма направленности более узкая, эффективность ввода излучения в многомодовое ОВ выше. Мощность излучения лежит в пределах 1...10 мВт, мощность, вводимая в ОВ, 0,1...1,0 мВт.

К пространственным характеристикам СИД относятся:

- диаметр светового пучка;
- угловая расходимость луча или диаграмма направленности, определяемая как телесный угол, в пределах которого распространяется большая часть излучения;
- энергетическая яркость, т. е. световая мощность, которую излучает диод с единицы площади внутрь единицы телесного угла в определенном направлении.

В лабораторной работе экспериментально исследуется ширина диаграммы направленности СИД, которую можно рассчитать, предполагая, что расходящийся пучок представляет собой конус и что между плоским и телесным углом существует простая связь

$$\Omega = 2\pi (1 - \cos(Q/2)),$$

где Ω – телесный угол, соответствующий плоскому углу Q .

4 ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО МАКЕТА

Конструктивно лабораторный макет выполнен из двух частей:

1) измерительного макета со встроенными микроваттметром и миллиамперметром, предназначенными для измерения мощности излучения и тока накачки соответственно;

2) устройства, на котором установлен источник оптического излучения.

Структурная схема лабораторного макета (рисунок 1.3) состоит из генератора пилообразного напряжения (ГПН), преобразователя напряжения в ток (ПНТ), источника излучения (ИИ), фотодетектора (ФД), усилителя постоянного тока (УПТ) и блока питания (БП). Предусмотрено снятие ВтАХ в ручном и автоматическом режимах.

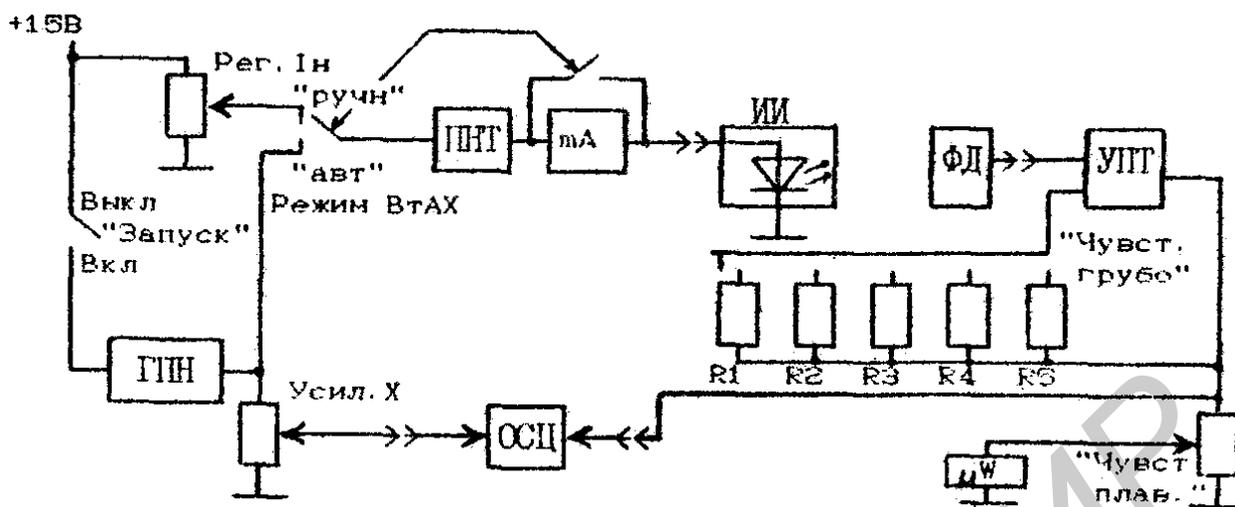


Рисунок 1.3 – Структурная схема лабораторного макета

В первом случае изменение тока накачки осуществляется с помощью потенциометра «Рег. I_n », величина которого контролируется показаниями миллиамперметра, а значение излучаемой мощности определяется по показаниям микроваттметра, сигнал на который поступает от ФД через УПТ.

Во втором случае ток накачки в виде пилообразных импульсов подается на ИИ через ПНТ от ГПН. Одновременно сигнал от ГПН поступает на вход «Х» осциллографа, а на вход «У» поступает сигнал от ФД, пропорциональный падающей оптической, а также и излучаемой мощности. ВТАХ ИИ можно наблюдать на экране осциллографа.

5 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

5.1 Подготовить к работе измерительный макет лабораторной установки.

5.1.1 Органы управления установить в следующие положения:

- «Сеть» – «выкл»;
- «запуск» – «выкл»;
- «ВТАХ» – «ручн»;
- ручку потенциометра «Рег. I_n » – в крайнее левое положение;
- ручку потенциометра «Усил. X» – в крайнее левое положение;
- переключатель «Чувствит.» – в положение «100»;
- ручку потенциометра «Чувствит. плавно» – в крайнее левое положение.

5.1.2 Установить исследуемый СИД на установочной площадке.

5.1.3 Установить тумблер «Сеть» в положение «вкл». При этом должна загореться индикаторная лампочка.

5.1.4 Подключить СИД к клеммам «ИМ», строго соблюдая полярность включения. **Внимание!** Измерения необходимо производить при минимально возможном освещении!

5.2 Снять ВТАХ СИД, изменяя значение тока накачки, фиксируя при этом показания микроваттметра. Рассчитать величину излучаемой мощности. Результаты измерений свести в таблицу. По данным таблицы построить график зависимости излучаемой мощности $P_{\text{изл}}$ от тока накачки $I_{\text{нак}}$.

5.3 Снять ВТАХ СИД в автоматическом режиме. Для этого подсоединить «Вход Y» и «Вход X» осциллографа к гнездам «У» и «Х» лабораторного макета соответственно. Тумблер «ВТАХ» перевести в положение «Авт». Тумблер «Запуск» в положение «вкл». С помощью ручек «Усил.Х» на измерительном макете и «Усил.У» на осциллографе получить изображение ВТАХ, используя при этом полностью размер экрана осциллографа. Зарисовать ВТАХ и сравнить с измеренной по предыдущему пункту.

5.4 Снять АЧХ СИД. Для этого установить ток накачки СИД $I_{\text{нак}}=I_{\text{max}}/2$, подключить генератор к клеммам, установленным на установочной площадке, подключить выход фотодиода к осциллографу. Засинхронизировать осциллограф от генератора, используя внешнюю синхронизацию. Изменяя частоту генератора, измерить АЧХ, используя в качестве индикатора осциллограф.

5.5 Снять пространственную характеристику СИД. Для этого установить ток накачки $I_{\text{нак}}=I_{\text{max}}/2$, при этом стрелка микроваттметра должна отклониться вправо. С помощью переключателя «Чувствит. грубо» и потенциометра «Чувствит. точно» установить стрелку микроваттметра на максимальное значение. Поворачивая установочную площадку с СИД от 0 до 90 градусов с шагом 5 градусов, снять показания микроваттметра. Данные измерений свести в таблицу. Установить СИД боковой гранью на установочной площадке, повернув его на 90 градусов по отношению к направлению излучения. Повторить измерения, данные также свести в таблицу.

5.6 Измерить спектральную характеристику СИД. Для этого предварительно ознакомьтесь с приложением А (ISO 13695:2004 «Оптика и фотоника. Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерений спектральных характеристик лазеров») и паспортом на используемый оптический анализатор спектра (спектрограф). Соединить вход оптического анализатора спектра с выходом СИД отрезком волоконного световода и снять спектральную характеристику светодиода в режиме низкого разрешения. В соответствии с приложением А рассчитать спектральные параметры СИД.

6 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

- 1 Цель лабораторной работы.
- 2 Структурная схема лабораторного макета.
- 3 Таблицы и графики результатов измерений и расчетов.
- 4 Основные выводы и заключения по работе.

7 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1 Поясните принцип работы СИД.
- 2 Назовите основные характеристики СИД.
- 3 Поясните влияние различных факторов (температуры, величины тока накачки, конструкции) на основные характеристики СИД.
- 4 Определите коэффициент оптической модуляции СИД, работающего в аналоговом режиме, если известно, что максимальная и средняя мощность излучения равны соответственно 5 и 3 мВт.
- 5 Сколько каналов ТВ методом АМ-ЧРК-МИ (амплитудная модуляция поднесущей – частотное разделение каналов – модуляция интенсивности) можно передать в аналоговой ВОСП, использующей СИД с полосой пропускания 100 МГц.
- 6 Назовите отличительные особенности СИД на ДГС по сравнению с СИД на гомопереходах.
- 7 Назовите основные спектральные параметры СИД и методы их определения.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Алишев, Я. В. Многоканальные системы оптического диапазона / Я. В. Алишев. – Минск : Выш.шк., 1988. – 236 с.
- 2 Волоконно-оптические системы передачи: учебник для вузов/ М. М. Бутусов [и др.]; под ред. В. Н. Гомзина. – М. : Радио и связь, 1992. – 416 с.
- 3 Фриман, Р. Волоконно-оптические системы связи / Р. Фриман. – М. : Техносфера, 2004. – 496 с.
- 4 Гроднев, И. И. Волоконно-оптические линии связи / И. И. Гроднев. – М. : Радио и связь, 1990. – 224 с.
- 5 Слепов, Н. Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи / Н. Н. Слепов. – 2-е испр. изд. – М. : Радио и связь, 2003. – 468 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1.1 Изучение основных характеристик полупроводниковых лазерных диодов (ППЛ).

1.2 Экспериментальное исследование характеристик ППЛ.

2 ЗАДАНИЕ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

2.1 Изучить инструкцию по ТБ.

2.2 Ознакомиться с основными характеристиками ППЛ.

2.3 Изучить схему лабораторного макета, ознакомиться с правилами эксплуатации приборов.

2.4 Экспериментально исследовать ватт-амперную характеристику ППЛ, определить по ней крутизну, пороговый ток, мощность излучения.

2.5 Экспериментально исследовать пространственную характеристику ППЛ, рассчитать ширину диаграммы направленности ППЛ.

2.6 Экспериментально исследовать спектральные характеристики ППЛ и рассчитать основные параметры спектральных характеристик.

3 СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Общие требования к источникам излучения для волоконно-оптических систем передачи можно сформулировать следующим образом:

– длина волны излучения источника должна совпадать с одним из минимумов спектрального распределения потерь волоконных световодов;

– конструкция источника должна обеспечивать достаточно высокую мощность выходного излучения и эффективный ввод его излучения в оптическое волокно;

– источник должен иметь высокую надежность и большой срок службы;

– габаритные размеры, масса и потребляемая мощность должны быть минимальными;

– простота технологии должна обеспечивать невысокую стоимость и высокую воспроизводимость характеристик.

Основные требования, предъявляемые собственно к полупроводниковым лазерам как источникам оптического излучения:

– непрерывный или квазинепрерывный режим работы при температуре не ниже комнатной;

– срок службы порядка 10^6 часов (11,5 лет), в течение которого не должно происходить чрезмерного ухудшения характеристик, а вероятность отказа должна оставаться низкой;

- низкий пороговый ток ($I_{\text{пор}}$);
- широкая полоса модуляции;
- линейная зависимость выходной мощности от тока накачки;
- малая излучающая площадь, позволяющая получить высокий коэффициент связи с ОВ;
- высокая кратковременная и долговременная стабильность мощности;
- высокая яркость;
- высокая монохроматичность.

Рассмотрим основные характеристики ППЛ с точки зрения предъявляемых требований.

Как известно, в основе действия полупроводниковых источников излучения лежит инжекционная люминесценция, обусловленная излучательной рекомбинацией. Она является результатом спонтанных зона-зонных электронных переходов. В присутствии электромагнитного излучения с подходящей длиной волны могут также наблюдаться индуцированные переходы между электронными состояниями. При переходе между состояниями с энергиями W_1 и W_2 ($W_2 > W_1$) излучение имеет частоту

$$f = (W_2 - W_1)/h$$

или длину волны излучения в свободном пространстве

$$\lambda = hc/(W_2 - W_1),$$

где h – постоянная Планка, $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с;

c – скорость света, м/с.

При взаимодействии с атомом, находящимся в нижнем энергетическом состоянии, может произойти поглощение кванта излучения и атом перейдет на верхний уровень. Когда во взаимодействии участвует атом, находящийся в верхнем энергетическом состоянии, вместо спонтанного излучения может произойти излучение индуцированного кванта. Вследствие этого при наличии излучения уменьшается среднее время жизни возбужденного состояния. Любой квант индуцированного излучения имеет одинаковую частоту и фазу с индуцирующим. Они когерентны.

Для работы лазера, т. е. для получения вынужденного когерентного излучения, необходима реализация двух условий:

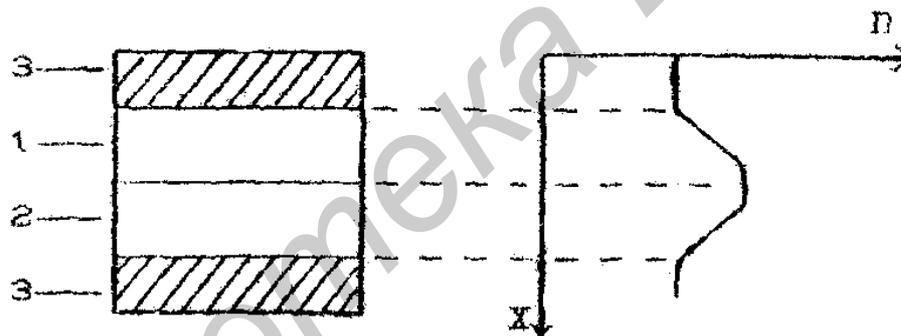
- создание инверсной населенности и получение оптического усиления;
- создание положительной обратной связи, чтобы превратить оптический усилитель в генератор.

Первое условие реализуется в процессе поглощения излучения, при котором происходит перераспределение населенностей по энергетическим уровням,

в результате чего создается инверсия населенностей. При этом скорость индуцированного излучения превышает скорость поглощения, т. е. реализуется оптическое усиление. Процесс рекомбинации протекает очень быстро (1...10 пс). Поэтому для поддержания инверсии населенностей необходимо непрерывно компенсировать убывание неравновесных носителей путем введения (инъекции) электронов в p -область. Такое перемещение носителей осуществляется за счет внешнего источника тока (тока накачки).

Реализовать второе условие можно с помощью двух зеркал, образующих оптический резонатор, которые отражают усиленный свет в усиливающую среду. Резонатор имеет характеристические частоты, что приводит к особенностям в спектре излучения, генерируемого системой.

Исторически первыми инжекционными лазерами являются лазеры на кристалле арсенида галлия GaAs ($\lambda = 0,87$ мкм). Простейшая структура лазера на p - n -переходе в арсениде галлия приведена на рисунке 2.1. Для получения генерации в гомоструктурах требуются плотности тока накачки порядка $10\ 000$ А/см², что вызывает перегрев кристалла. Это является основной причиной, не позволяющей получить необходимый для использования в ВОСП режим импульсной генерации с высокой частотой следования и тем более режим непрерывной генерации при комнатной температуре.



1 – слой n-GaAs; 2 – слой p-GaAs; 3 – металлический контакт

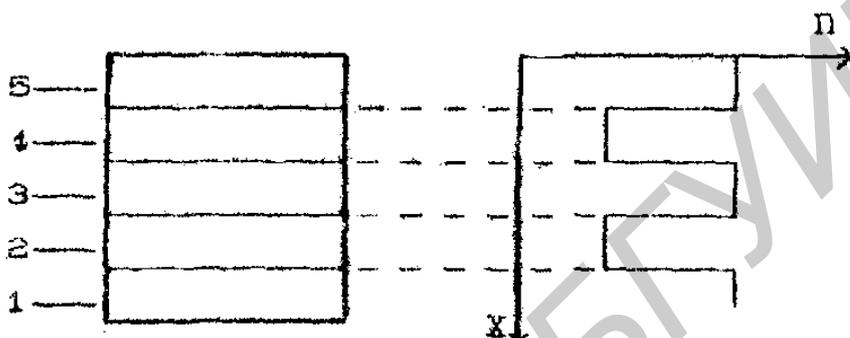
Рисунок 2.1 – Структура и распределение показателя преломления лазера с гомопереходом

Проблема создания лазерных источников излучения для ВОСП решается при использовании полупроводниковых двойных гетероструктур (ДГС). Структура лазера на ДГС Ga_xAl_{x-1}As/GaAs схематически изображена на рисунке 2.2.

В этой структуре использовано свойство алюминия и галлия взаимно замещать друг друга без изменения периода кристаллической решетки полупроводника. Замещение галлия алюминием приводит к увеличению ширины запрещенной зоны W_3 и к снижению показателя преломления n . Центральный активный слой выращивается из GaAs без добавки алюминия и имеет меньшую ширину запрещенной зоны, чем окружающие его эмиттерные слои из Ga_xAl_{x-1}As, а также коэффициент преломления на несколько процентов больше. Это означает, что имеет место жесткий планарный волновод, световое поле локализовано в активном слое существенно сильнее, чем в гомоструктурах. Та-

ким образом, лазеры на ДГС имеют низкие пороговые плотности тока накачки ($500 \dots 1000 \text{ А/см}^2$) и работают в режиме непрерывной генерации при комнатной температуре по следующим причинам:

- инверсная населенность (усиление) эффективно сконцентрирована в узкозонном центральном слое;
- активный слой имеет значительный скачок показателя преломления, оптическое поле эффективно концентрируется в нем;
- потери вне активного слоя малы, так как ширина запрещенной зоны в эмиттерных слоях больше, чем в усиливающем.



- 1 – подложка n-GaAs; 2 – широкозонный эмиттерный слой с n -проводимостью $n\text{-Ga}_x\text{Al}_{x-1}\text{As}$; 3 – узкозонный активный слой n-GaAs; 4 – широкозонный эмиттерный слой с p -проводимостью $p\text{-Ga}_x\text{Al}_{x-1}\text{As}$; 5 – слой узкозонного полупроводника p-CaAs

Рисунок 2.2 – Структура и распределение показателя преломления лазера с ДГС

Для снижения до минимума безызлучательной рекомбинации в активном слое необходимо, чтобы параметры кристаллических решеток материалов, образующих гетеропереход, были максимально близки. В настоящее время для изготовления лазеров используются тройное соединение $\text{Ga}_x\text{Al}_{x-1}\text{As}$ при длине волны излучения $0,8 \dots 0,87 \text{ мкм}$, и четвертное соединение $\text{Ga}_x\text{Al}_{x-1}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ при длине волны излучения в диапазоне $0,95 \dots 1,65 \text{ мкм}$.

Наиболее распространенный тип резонатора лазеров на ДГС – резонатор Фабри – Перо, зеркалами которого являются параллельно сколотые торцы кристалла. При этом дальнейшее совершенствование конструкции лазера на ДГС привело к созданию волноводных условий в плоскости самого активного слоя, это значит, что в гетеролазерах обязательно тем или иным способом создается не планарный, а двумерный (полосковый) световод.

Лазеры с полосковым световодом обладают рядом достоинств с точки зрения использования в световодных системах:

- излучающая площадка в таких лазерах мала, что улучшает условия ввода их излучения в одномодовые световоды;
- малые размеры области с инжекцией носителей существенно снижают пороговый ток накачки.

Спектр излучения лазеров определяется спектром мод резонатора и взаимодействием полей этих мод в активной среде. Например, как уже отмечалось, резонатор лазера на ДГС представляет собой отрезок полоскового оптического волновода с отражающими торцами, в котором могут существовать только те моды, для которых выполняется соотношение

$$b_{mn}2L = 2\pi q,$$

где b_{mn} – постоянная распространения моды с поперечными индексами m, n ;
 L – длина резонатора;
 q – целое число.

Таким образом, у моды резонатора наряду с поперечными индексами m и n , получаемыми из условий поперечного резонанса в волноводе, существует третий индекс q – продольный. Вспомним, что постоянная распространения моды определяется выражением

$$b_{mn} = 2\pi f N_{mn}/c,$$

где N_{mn} – эффективный показатель преломления моды волновода.
 Спектр собственных частот резонатора можно записать как

$$F_{mnq} = cq/(2N_{mn}L).$$

Это значит, что каждой моде волновода в резонаторе соответствует набор мод, различающихся продольными индексами q (рисунок 2.3). Для типичных конструкций ЛД с длиной резонатора 200...400 мкм интервал между соседними продольными модами составляет 0,25...0,5 нм при $\lambda_{\text{изл}} = 0,85$ мкм и 0,6...1,2 нм при $\lambda_{\text{изл}} = 1,3$ мкм.

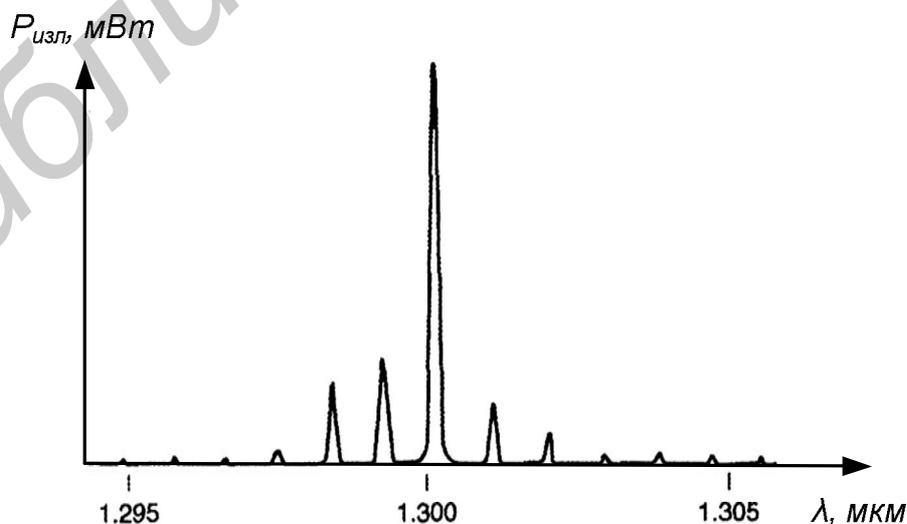


Рисунок 2.3 – Спектр многомодовых лазеров с резонатором Фабри – Перо

Исходя из изложенного, ЛД по спектру излучения классифицируются как:

- многомодовые (MLM) с резонаторами Фабри – Перо – генерируют на многих продольных модах;
- одномодовые (SLM) – генерируют на одной продольной моде;
- одномодовые с распределенной обратной связью (DFB), часто называемые DFB-лазерами;
- лазеры с вертикальной резонаторной полостью и излучающей поверхностью (VCSEL).

Многомодовые лазеры, или лазеры с резонатором Фабри – Перо, излучают несколько мод, их спектр приведен на рисунке 2.3. Картина спектра демонстрирует наличие доминантной моды желаемой длины волны и боковые моды меньшей амплитуды, отделенные промежутками шириной примерно в 1 нм. При модуляции излучения лазера модулируется не только основная мода, но и, точно так же, боковые моды. Полная ширина спектра оптического излучения такого лазерного источника на уровне половины от максимума при наличии модуляции равна 4–5 нм.

Более тщательное изучение спектра лазера показывает, что несмотря на относительную стабильность полной выходной мощности, мощность каждой отдельной моды может значительно изменяться. Это явление, известное как распределение мощности по модам, имеет важное практическое значение. Когда сигнал лазера передается по волокну, то, с учетом групповой задержки (хроматической дисперсии), зависящей от длины волны, распределение мощности по модам приводит к возрастанию уровня шума в выходном сигнале. В результате в характеристике системы появляется не зависящий от мощности нижний уровень ошибок, который нельзя снизить путем выделения дополнительной мощности в бюджете системы. Для систем, работающих со скоростями передачи данных большими, чем несколько сотен Мбит/с, в волокне с малыми потерями это явление может стать основным фактором, ограничивающим длину пролета секции. Более того, даже небольшие отражения (обратно в сторону лазера) от внешних поверхностей оптического разъема могут вызвать значительные изменения в «поведении» при распределении мощности по модам, а значит, и в характеристиках самой системы.

Одномодовые SLM-лазеры сконструированы так, что потери в резонаторе различны для его различных продольных мод, в противоположность тому, что имеет место для MLM, потери которых независимы от мод. В SLM-лазере продольная мода с минимальными резонаторными потерями достигает порога первой и становится доминантной модой. Другие соседние моды при этом дискриминируются, благодаря их более высоким потерям, которые удерживают нарастание мощности от спонтанного излучения. В этом случае мощность, переносимая этими «вторичными» модами, обычно низкого уровня, меньше 1 % полной излучаемой мощности. Если SLM-лазер настроен правильно, то можно ожидать, что первая боковая мода по крайней мере на 30 дБ ниже, чем доминантная мода.

Структура DFB-лазера имеет встроенные возможности выбора длины волны благодаря механизму обратной связи. Обратная связь не локализована в одном месте, а распределена по длине резонаторной полости. Этот тип лазера содержит периодические дифракционные решетки между двумя слоями лазерной структуры (обычно между интерфейсной n-InP-подложкой и n-InGaAsP-слоями) для создания обратной связи на фиксированной длине волны, которая определяется шагом дифракционной решетки. Это соответствует периодическому изменению показателя преломления моды.

DFB-лазер очень чувствителен к оптической обратной связи, в особенности к отражениям от оптических разъемов, которые служат интерфейсами между лазером и волокном основной линии связи. Даже относительно небольшая обратная связь (уровнем меньше, чем 0,1 %, например) может дестабилизировать лазер и повлиять на характеристики системы.

Схема DFB-лазера представлена на рисунке 2.4.

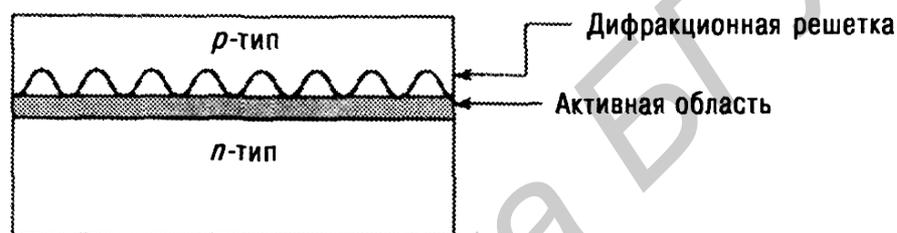


Рисунок 2.4 – Схема DFB-лазера

Для функционирования лазеров типа MLM (Фабри – Перо), SLM и DFB требуется ток порядка нескольких десятков миллиампер. Кроме того, его выходной (расходящийся) луч, подаваемый на стык с круглым оптоволоком, имеет в поперечном сечении эллипс с коэффициентом сжатия 3:1. Такой луч плохо стыкуется с цилиндрической формой луча, который способна принять сердцевина оптоволокну. Нецилиндрический луч часто требует дополнительной оптики, чтобы состыковать его с круглым поперечным сечением сердечника оптоволокну. Круговой луч излучает лазер типа VCSEL – это лазер с вертикальной резонаторной полостью и излучающей поверхностью. Сравнение геометрий пучков этих двух типов излучения проведено на рисунке 2.5.

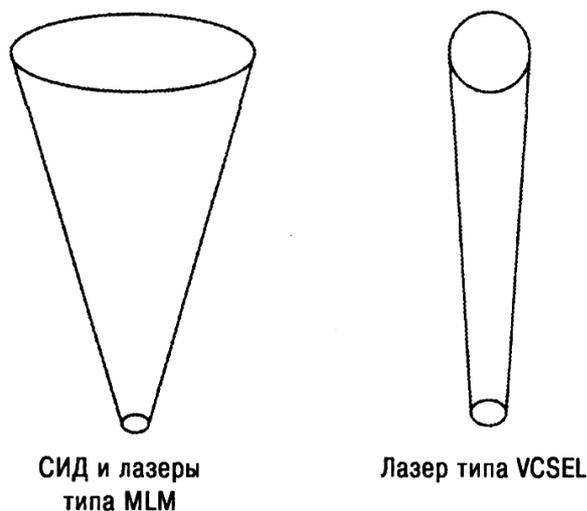


Рисунок 2.5 – Сравнение эллиптического выходного луча СИД и лазеров типа MLM, SLM и DFB с круговым выходным лучом, характерным для лазера типа VCSEL

Лазер типа VCSEL представляет собой вертикальную структуру из ряда слоев p -типа, активной области и ряда слоев n -типа. Число слоев зависит от желаемой длины волны излучения. Указанные наборы слоев охватывают отражатели Брэгга, которые изготавливаются из комбинации In+Ga+As+(Al или P). Например, комбинация In+Ga+As+P используется для лазеров в окне длин волн 1310–1550 нм. Требуемые слои изготавливаются методом эпитаксиального выращивания на основе планарной технологии. Лазеры типа VCSEL работают в одномодовом (продольная мода) режиме, используя резонатор исключительно малой длины (порядка 1 мкм), для которого разнесение мод превышает полосу частот усиления. Они излучают свет в направлении, перпендикулярном плоскости активного слоя, аналогично тому, как это делается в СИД с излучающей поверхностью. Работа такого лазера в одномодовом (поперечная мода) режиме может быть реализована путем уменьшения диаметра VCSEL до 2–3 мкм. Выходная мощность и ширина полосы лазеров типа VCSEL, как правило, ниже, чем аналогичные показатели DFB-лазеров, и VCSEL находит применение как в ВОСП, так и в локальных сетях. Их стоимость относительно низка по сравнению с DFB-лазерами. Другим применением VCSEL являются лазерные массивы, где каждый лазер работает на своей длине волны, что идеально подходит для WDM-систем.

Схема структуры VCSEL-лазера приведена на рисунке 2.6.

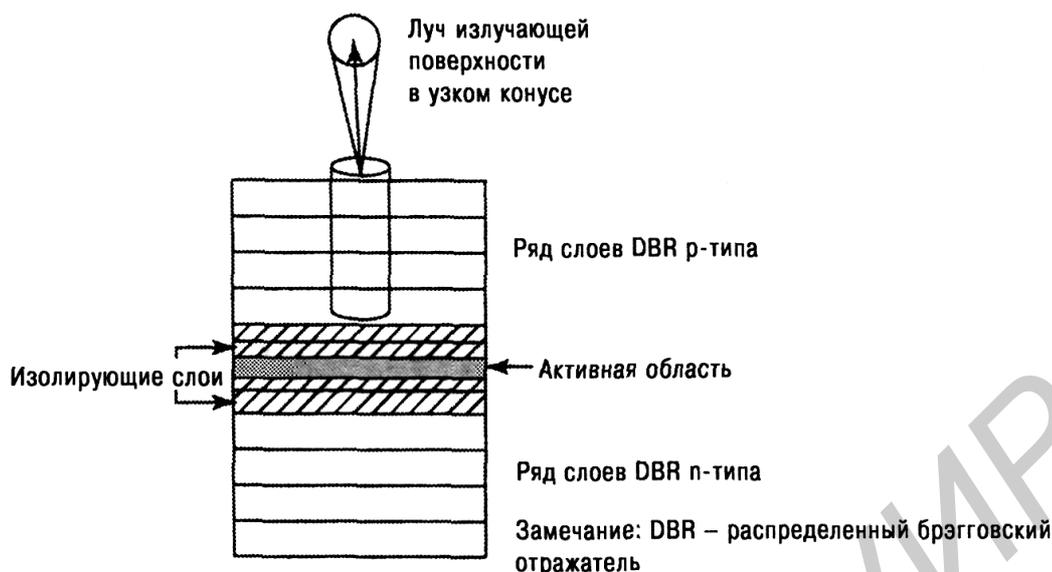


Рисунок 2.6 – Схема структуры VCSEL-лазера

Ватт-амперная характеристика (зависимость мощности излучения от тока накачки) у всех лазеров имеет характерный излом (рисунок 2.7) при пороговом значении тока накачки, вызванный тем, что лазерная генерация начинается при этом значении тока. Необходимо отметить, что пороговый ток накачки увеличивается с ростом температуры. Это явление, обусловленное температурной зависимостью коэффициента усиления, описывается формулой, полученной из эксперимента

$$I_n = I_0 \exp(T/T_0),$$

где I_0 – определяется конструкцией лазера;

T_0 – лежит в интервале температур 50...180 К в зависимости от материала активной области.

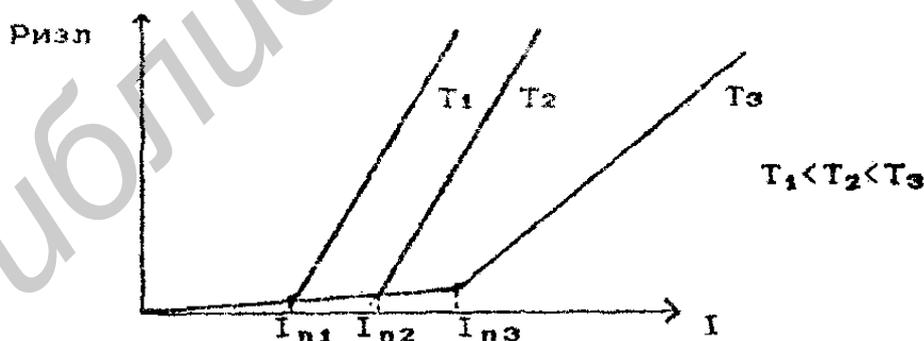


Рисунок 2.7 – ВтАХ полупроводникового лазера при изменении температуры

Модуляция излучения – самый простой метод модуляции излучения ППЛ состоит в модуляции тока инжекции I (прямая модуляция интенсивности излучения), при этом скорость модуляции в импульсном режиме может достигать 10 Гбит/с, а полоса модулирующих частот в аналоговом – до 2 ГГц. При этом

если ток накачки превышает пороговый ток, то наблюдается задержка генерации излучения, описываемая приближенным выражением (рисунок 2.8, а)

$$t_3 = t_0 \ln(I/(I-I_n)),$$

где I и I_n – среднее и пороговое значения тока накачки;

t_0 – спонтанное время жизни электронов, типовое значение $t_0 \approx 1$ нс.

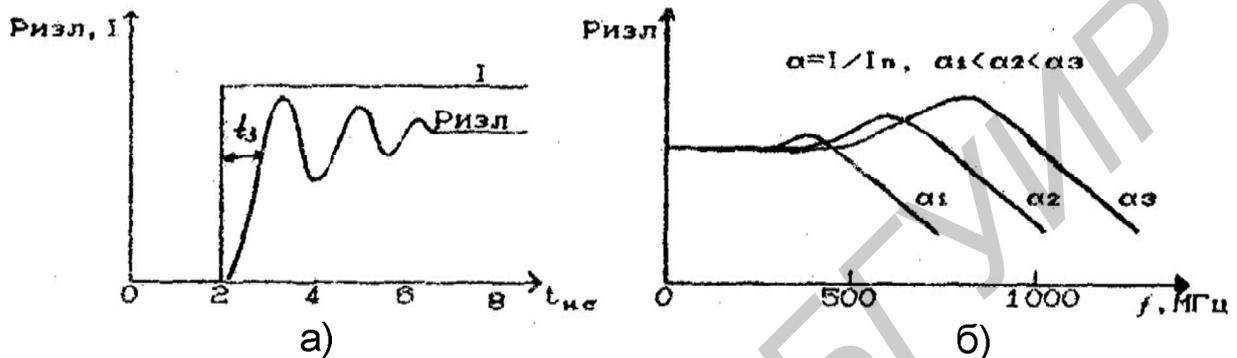


Рисунок 2.8 – Переходная характеристика (а) и характеристика прямой модуляции (б)

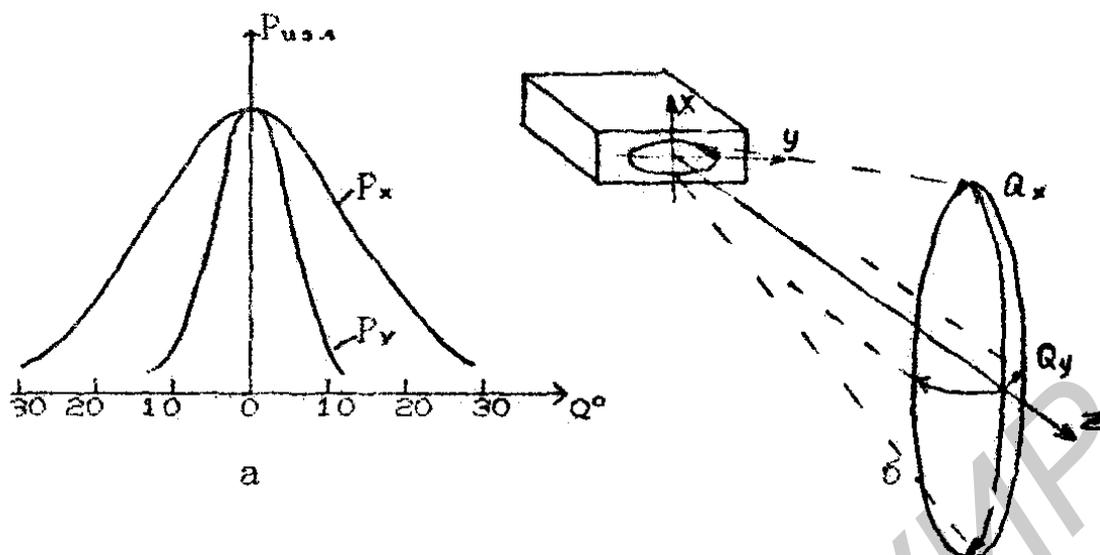
Поскольку электрические и оптические явления в ППЛ взаимосвязаны, при высоких частотах модуляции наблюдается резонанс между инжектируемыми носителями заряда и электрическим полем, т. е. появляются затухающие колебания интенсивности излучения около их стационарных значений (рисунок 2.8, б). Частота этих релаксационных колебаний описывается приближенной формулой

$$F_p = \frac{(I/I_n - 1)^{1/2}}{2p(t_0 t_r)^{1/2}},$$

где t_r – время жизни фотона в резонаторе ($t_r \approx 1$ пс), определяемое потерями в резонаторе.

Таким образом, при импульсной модуляции током накачки с длительностью импульса $t_i \gg (t_0 t_r)^{1/2}$ и при аналоговой модуляции с частотами в спектре сигнала $F_0 \ll F_p$ можно считать, что в каждый момент времени интенсивность принимает стационарное значение в соответствии со статической ВтАХ ППЛ.

Пространственные характеристики излучения ППЛ определяются поперечным распределением поля в резонаторе и размерами излучающей площадки. Диаграмма направленности излучения ППЛ вследствие того, что у большинства конструкций толщина активного слоя d_x в несколько раз меньше его ширины d_y ($d_x < 1$ мкм, $d_y < 10$ мкм), несимметрична: в плоскости, перпендикулярной p - n -переходу, составляет $30^\circ \dots 60^\circ$, в плоскости, параллельной ему, – $5^\circ \dots 10^\circ$ (рисунок 2.9).



а – ширина диаграммы направленности, измеряется по уровню половинной мощности; б – зависимость излучаемой мощности от угла во взаимно перпендикулярных направлениях Q_x и Q_y

Рисунок 2.9 – Диаграмма направленности излучения ППЛ

В настоящее время ведутся интенсивные исследования по совершенствованию конструкций ППЛ, позволяющие получить ППЛ с новыми качественными параметрами: одночастотные лазеры с шириной спектра излучения до 10 кГц, перестраиваемые одночастотные лазерные диоды, лазеры со стабилизацией частоты излучения, что позволяет надеяться на то, что в ближайшее время значительное распространение найдут ВОСП с когерентными методами приема и спектральным разделением каналов.

Спектральная характеристика лазера и ее параметры приведены в приложении А.

4 ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО МАКЕТА

Описание лабораторного макета приведено в лабораторной работе №1 (см. рисунок 1.3).

5 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

5.1 Подготовить к работе измерительный макет лабораторной установки.

5.1.1 Органы управления установить в следующие положения:

- «Сеть» – «выкл»;
- «запуск» – «выкл»;
- «ВтАХ» – «ручн»;
- ручку потенциометра «Рег. $I_{\text{п}}$ » – в крайнее левое положение;
- ручку потенциометра «Усил. X» – в крайнее левое положение;
- переключатель «Чувствит.» – в положение «100»;

– ручку потенциометра «Чувствит. плавно» – в крайнее левое положение.

5.1.2 Установить исследуемый ППЛ на установочной площадке.

5.1.3 Установить тумблер «Сеть» в положение «вкл». При этом должна загореться индикаторная лампочка.

5.1.4 Подключить ППЛ к клеммам «ИИ», строго соблюдая полярность включения.

5.2 Снять ВтАХ ППЛ, изменяя значение тока накачки (в указанных преподавателем пределах), фиксируя при этом показания микроваттметра. Рассчитать величину излучаемой мощности. Результаты измерений свести в таблицу. По данным таблицы построить график зависимости излучаемой мощности $P_{\text{изл}}$ от тока накачки $I_{\text{нак}}$. Определить величину порогового тока, значение крутизны ВтАХ.

5.3 Снять ВтАХ ППЛ в автоматическом режиме. Для этого подсоединить «Вход Y» и «Вход X» осциллографа к гнездам «Y» и «X» лабораторного макета соответственно. Тумблер «ВтАХ» перевести в положение «Авт». Тумблер «Запуск» в положение «вкл». С помощью ручек «Усил. X» на измерительном макете и «Усил. Y» на осциллографе получить изображение ВтАХ, используя при этом полностью размер экрана осциллографа. Зарисовать ВтАХ и сравнить с измеренной по предыдущему пункту.

5.4 Снять пространственную характеристику ППЛ. Для этого установить ток накачки $I_{\text{нак}} = I_{\text{max}}/2$, при этом стрелка микроваттметра должна отклониться вправо.

С помощью переключателя «Чувствит. грубо» и потенциометра «Чувствит. точно» установить стрелку микроваттметра на максимальное значение. Поворачивая установочную площадку с ППЛ от 0 до 90 градусов с шагом 5 градусов, снять показания микроваттметра. Данные измерений свести в таблицу. Установить ППЛ для измерения пространственной характеристики в другой плоскости, повернув его на 90 градусов. Повторить измерения, данные также свести в таблицу.

5.5 Измерить спектральную характеристику ППЛ. Для этого предварительно ознакомиться с приложением А (ISO 13695:2004 «Оптика и фотоника. Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерений спектральных характеристик лазеров») и паспортом оптического анализатора спектра, затем соединить отрезком волокна вход оптического анализатора спектра с выходом ППЛ и снять спектральную характеристику полупроводникового лазера в режиме высокого разрешения.

В соответствии с приложением А рассчитать параметры спектральной характеристики ППЛ.

6 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

- 1 Цель лабораторной работы.
- 2 Структурная схема лабораторного макета.
- 3 Таблицы и графики результатов измерений и расчетов.
- 4 Основные выводы и заключения по работе.

7 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1 Поясните принцип работы ППЛ.
- 2 Назовите основные характеристики ППЛ.
- 3 Поясните влияние различных факторов (температуры, величины тока накачки, конструкции) на основные характеристики ППЛ.
- 4 Опишите принцип действия лазера на ДГС.
- 5 Объясните процесс возникновения релаксационных колебаний при модуляции интенсивности излучения ППЛ импульсным сигналом.
- 6 Поясните спектральную характеристику ППЛ.
- 7 Какие параметры определяют спектральную характеристику ППЛ?

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Алишев, Я. В. Многоканальные системы оптического диапазона / Я. В. Алишев – Минск : Выш. шк., 1988. – 236 с.
- 2 Волоконно-оптические системы передачи: учебник для вузов / М. М. Бутусов [и др.]; под ред. В. Н. Гомзина. – М. : Радио и связь, 1992. – 416 с.
- 3 Фриман, Р. Волоконно-оптические системы связи / Р. Фриман. – М. : Техносфера, 2004. – 496 с.
- 4 Гроднев, И. И. Волоконно-оптические линии связи / И. И. Гроднев – М. : Радио и связь, 1990. – 224 с.
- 5 Слепов, Н. Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи / Н. Н. Слепов. – 2-е испр. изд. – М. : Радио и связь, 2003. – 468 с.
- 6 ЭУМКД по дисциплине ВОСП.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

ИЗУЧЕНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛИНЕЙНОГО ТРАКТА ЦИФРОВОЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1.1 Изучить принцип построения цифровой волоконно-оптической системы передачи (ВОСП).

1.2 Изучить линейные коды в цифровых ВОСП.

1.3 Изучить методику измерения основных характеристик цифровых ВОСП.

2 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЦИФРОВОЙ ВОСП

Линейный тракт волоконно-оптической системы передачи включает в себя передающий оптоэлектронный модуль, оптический кабель и приемный оптоэлектронный модуль.

Передающий оптоэлектронный модуль (ПОМ) – изделие оптоэлектроники, предназначенное для преобразования электрических сигналов в оптические. ПОМ включает в себя источник излучения (полупроводниковый лазер или светодиод), при необходимости оптический модулятор, электронные схемы для преобразования входных электронных сигналов и стабилизации режимов работы, оптический разъем, выполненные в едином конструктивном исполнении.

Передающие оптоэлектронные модули могут быть классифицированы как: аналоговые – для передачи аналоговых сигналов; цифровые, предназначенные для цифровых систем передачи; ПОМ на светодиодах или полупроводниковых лазерах; ПОМ с прямой модуляцией источника излучения и с внешней модуляцией оптического излучения (наличие внешнего модулятора).

Основные характеристики ПОМ: входное напряжение, средняя мощность излучения, рабочая длина волны, ширина спектра излучения, полоса пропускания (для аналогового), скорость передачи (для цифрового).

Аналоговые передающие оптические модули должны обеспечивать необходимую полосу пропускания с заданной неравномерностью и малые нелинейные искажения. Первое требование обеспечивается известными методами коррекции амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик. Для обеспечения малых нелинейных искажений используются в основном два метода: метод отрицательной обратной связи или введение схемы нелинейного предискажения.

Использование схемы предварительного нелинейного искажения позволяет осуществить линеаризацию амплитудной характеристики ЛД при глубокой амплитудной модуляции. Принцип линеаризации состоит в формировании амплитудной характеристики контура нелинейного предискажения противоположной

характеристике источника излучения. Этот метод является наиболее применяемым в системах кабельного телевидения.

Передающий модуль является составной частью линейного тракта цифровых ВОСП. В нем происходит преобразование электрического сигнала в оптический. К передающим оптическим модулям предъявляется ряд требований, характеризующих их работу:

1 Эффективное преобразование электрического сигнала в оптический.

2 Стабильная работа передающего модуля при воздействии внешних дестабилизирующих факторов и деградации характеристик излучающего элемента.

3 Доступность элементной базы.

4 Простота и надежность схемы.

Передачики на светодиодах отличаются простотой, так как зависимость мощности выходного излучения от тока возбуждения световода практически линейна и мало изменяется во времени. Поэтому в передачиках на светодиодах, как правило, отсутствуют сложные схемы стабилизации параметров и возможно применение простых импульсных схем (ключей, триггера Шмита и т. д.) для накачки светодиода током с заданной амплитудой.

При реализации передающих модулей на полупроводниковых лазерах необходимо применять различные схемы автоматического управления лазером для стабилизации его параметров, отличающихся различной степенью сложности, причем во всех случаях требуются какие-то средства контроля выходных характеристик прибора.

Действительно, при изменении температуры изменяется пороговый ток (начало лазерной генерации), и ватт-амперная характеристика лазерного диода смещается. При этом возрастает пороговый ток, и практически не изменяется наклон рабочего участка ватт-амперной характеристики.

Другим дестабилизирующим фактором является деградация параметров лазерного диода при его старении, которая приводит к изменению наклона рабочего участка.

При этом для поддержания постоянства разности пиковой и остаточной мощностей требуется регулировать импульсный ток накачки.

Известно, что наилучшие характеристики излучения полупроводникового лазера (энергетическая, спектральная и т. д.) получаются тогда, когда лазер смещен постоянным током смещения I_0 выше порогового уровня $I_{\text{пор}}$ ($I_0 > I_{\text{пор}}$). Относительно тока смещения I_0 и подается импульс информационного тока ($I_{\text{имп}}$). В схемах работа лазера вблизи порога обеспечивается за счет введения петли отрицательной обратной связи по средней мощности. Применение петли отрицательной обратной связи по импульсной мощности обеспечивает ее стабилизацию путем изменения импульсного тока накачки.

Дальнейшее улучшение характеристик передающего оптоэлектронного модуля получают, если организуется стабилизация температуры кристалла лазера. Для этого кристалл лазера устанавливается на термохолодильник, вводится терморезистор и обратная связь по температуре кристалла полупроводникового лазера.

Еще лучшие характеристики получают, если лазер излучает постоянную мощность, а модуляция осуществляется внешним модулятором. Такие ПОМ используются в высокоскоростных (10 Гбит/с и выше), а также в оптических системах передачи с волновым разделением каналов.

К основным оптическим параметрам ПОМ в точке оптического выхода относятся:

1 Средняя длина волны излучения λ_0 источника излучения и ширина спектра его излучения $\Delta\lambda$, которая может определяться как среднеквадратическое значение на уровне 0,5 от максимальной величины. Так обычно определяют ширину спектра излучения для светоизлучающих диодов (СИД) и многомодовых лазеров. Для одномодовых одночастотных лазеров ширину спектра излучения определяют на уровне минус 20 дБ (1 % от максимальной величины).

2 Средняя мощность излучения P_0 , вводимая в оптическое волокно, при равной вероятности передачи 1 и 0, которая может измеряться в единицах мощности Вт или в логарифмических единицах дБм. Важным параметром излучателя является нестабильность излучаемой мощности, которая может характеризоваться среднеквадратическим отклонением средней мощности. Эта величина также может измеряться в единицах мощности Вт или в относительных логарифмических единицах дБ.

3 Коэффициент гашения (экстинкции), который определяется отношением мощности излучения при передаче «1» к мощности излучения при передаче «0». Его можно выразить просто отношением или в относительных логарифмических единицах дБ.

4 Форма выходных оптических импульсов (время нарастания и спада, длительность).

Приемный оптоэлектронный модуль (ПРОМ) – устройство, осуществляющее преобразование оптического сигнала в электрический, применяется в оптических системах передачи связи различного назначения. Оптические системы связи предназначены для передачи аналоговых и цифровых сигналов, поэтому ПРОМ классифицируются как аналоговые, так и цифровые. Необходимо отметить, что их различие состоит лишь в блоках конечной обработки сигнала, входные же цепи одинаковые. Подавляющее большинство действующих цифровых оптических систем передачи информации используют двоичный (бинарный) код и простейшую амплитудную модуляцию (модуляцию по интенсивности) с двумя значениями амплитуды сигнала. Цифровой ПРОМ (приемник цифровой волоконно-оптической системы связи с амплитудной модуляцией и прямым детектированием) конструктивно состоит из трех блоков. В первом блоке происходит последовательное преобразование оптических сигналов в электрический ток (оптоэлектронное преобразование). Во втором блоке осуществляется линейное усиление электрического тока, в третьем блоке происходит восстановление данных.

Преобразование модулированного светового излучения (светового сигнала) в модулированный электрический ток происходит в фотодиоде, работаю-

шем на фотоэффекте внутри p - n -перехода. В современных оптических системах используется p - i - n -фотодетекторы или лавинные фотодиоды.

Фотодетектор (ФД) с p - i - n -структурой состоит из n ⁺-подложки, слаболегированного слоя (i -слоя) и очень тонкого p ⁺-слоя. При приложении обратного смещения обедненный слой распространяется на весь i -слой собственной проводимости. В результате уменьшается емкость перехода, расширяется область поглощения света и повышается чувствительность ФД. Падающий свет, затухая по экспоненциальному закону в зависимости от значения коэффициента поглощения α , вызывает появление фотовозбужденных носителей заряда. Фотовозбужденные носители, появившиеся в обедненном слое, ускоряются электрическим полем обедненного слоя до скорости насыщения дрейфа ($\sim 10^7$ см/с). Эту область называют областью дрейфа. Так как фотовозбужденные носители за пределами обедненного слоя в p ⁺ и n ⁺-слоях движутся за счет диффузии, то их скорость движения, равная $\sim 10^4$ см/с, оказывается на три порядка ниже скорости дрейфа. Этот диффузный ток является причиной ухудшения быстродействия ФД. Поскольку эти фотовозбужденные носители перемещаются на расстояние порядка диффузной длины и рекомбинируют, уменьшается квантовый выход. Чтобы одновременно удовлетворить требованиям быстродействия и высокого квантового выхода необходимо, чтобы область поглощения света находилась в обедненном слое. Для этого при проектировании фотодиода делают p ⁺-слой как можно тоньше, а толщину i -слоя выбирают большей длины поглощения света (величина $1/\alpha$). При этом необходимо выбирать поглощение, материал которого имеет большую величину на длине волны, для которой проектируется ФД.

В таблице 3.1 приведены компонентные материалы, используемые для создания фотоприемников для различных диапазонов длин волн.

Таблица 3.1

Материал	Диапазон длин волн, мкм
Кремний	0,40–1
Германий	0,6–1,6
GaAs	0,8–1
InGaAs	1,0–1,7
InGaAsP	1,1–1,6

Если на обычный p - i - n -фотодиод подается настолько большое напряжение обратного смещения, что напряженность поля в запрещенной зоне приближается к пробивной напряженности, то первичные электроны и дырки создают новые пары носителей заряда за счет ударной ионизации. Это умножение носителей происходит в запирающем слое только вблизи пика электрического поля, т. е. только в той зоне, в которой носители заряда на длине свободного пробега в кристаллической решетке достигают кинетической энергии, равной ширине запрещенной зоны. Так как вновь появившиеся носители, в свою очередь, спо-

собствуют ударной ионизации, первоначально слабый фототок увеличивается лавинообразно. Этот эффект положен в основу работы лавинных фотодиодов.

Ток фотодиода (фототок) усиливается малошумящим трансимпедансным или высокоимпедансным усилителем. Трансимпедансный предусилитель обеспечивает преобразование фототока в выходное напряжение. Основное его назначение – обеспечение приемлемого соотношения сигнал/шум. Выходящие из него электрические импульсы тока усиливаются усилителем ограничителем с автоматической регулировкой усиления (АРУ), фильтруются и попадают в блок восстановления данных.

Схема АРУ введена в связи с возможностью достаточно большого разброса уровней оптических сигналов на выходе линии. Предусилитель и усилитель-ограничитель должны обеспечивать работу с допустимым коэффициентом ошибок с учетом возможного их диапазона, определяемого разбросами мощности излучателя и затухания конкретной линии.

Решающее устройство в блоке восстановления данных, стробируемое импульсами, формируемым устройством выделения тактовой частоты, принимает решение о приеме «единицы», если уровень сигнала выше порога (U_n), или «нуля», если уровень сигнала ниже U_n . Таким образом, на выходе ПРОМ формируется сигнал данных и тактовой частоты.

Основные параметры ПРОМ:

- рабочая длина волны, для которой нормированы параметры приемника;
- полоса пропускания, т. е. интервал частот, в котором модуль коэффициента передачи больше или равен половине его максимального значения;
- напряжение шума, т. е. среднеквадратическое значение флуктуации выходного напряжения в заданной полосе частот в отсутствие оптического сигнала на его входном оптическом полюсе;
- отношение сигнал – шум – отношение амплитуды переменной составляющей выходного напряжения при заданных характеристиках принимаемого оптического сигнала к среднеквадратическому значению флуктуации выходного напряжения при приеме немодулированного оптического излучения той же средней мощности;
- коэффициент ошибок – отношение числа ошибок в цифровом сигнале электросвязи на выходе ПРОМ за данный интервал времени к числу символов в этом интервале;
- порог чувствительности – минимальная средняя мощность оптического сигнала на входе при заданных характеристиках этого сигнала, при которой обеспечивается заданное отношение сигнал – шум или заданный коэффициент ошибок. Усреднение обычно проводится в течение интервала времени, во много раз превышающего период модулирующей частоты или длительность светового импульса. Порог чувствительности измеряется в ваттах или децибелах по отношению к одному милливатту (дБм);
- динамический диапазон – отношение максимальной средней мощности оптического сигнала на входном полюсе ПРОМ, при котором характеристики

модуля не выходят за допустимые пределы, к его порогу чувствительности, выраженное в децибелах.

При передаче по оптическому волокну большое значение имеет правильный выбор типа линейного кода. К линейным кодам предъявляются следующие требования:

1 Спектр линейного сигнала должен быть максимально узким.

Это условие позволяет использовать для передачи информации оптические волокна с меньшей полосой пропускания или при заданном значении величины дисперсионных искажений линии увеличить дальность передачи.

С другой стороны, использование кода с меньшей шириной спектра сигнала позволяет уменьшить необходимую полосу пропускания приемного устройства и за счет этого снизить шумы приемника.

2 Непрерывная составляющая спектра линейного сигнала не должна иметь постоянной составляющей.

Это значительно облегчает построение приемного устройства, так как в этом случае возможно использование емкостных связей между каскадами усиления. При больших требуемых значениях коэффициента усиления приемника этот факт играет большое значение.

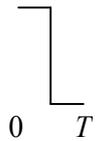
3 Простота выделения сигнала тактовой синхронизации.

Желательно, чтобы в спектре линейного сигнала имелась дискретная составляющая на частоте синхронизации или ее гармонике, которую можно было бы выделить с помощью полосового фильтра.

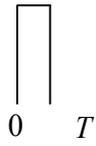
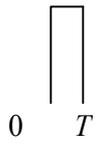
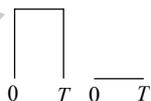
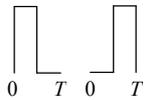
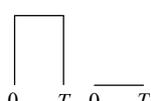
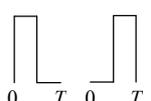
В настоящее время в волоконно-оптических системах передачи со скоростью меньше 100 Мбит/с используется биимпульсный код (типа «Манчестер»).

Были предложены и экспериментально проверены многие специальные, оригинальные коды для ВОСП. Простейшие из них приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2

Код	Определение	Импульсы		Ширина полосы (при 90 % энергии)
		"1"	"0"	
1	2	3	4	5
Без возврата к нулю	"1": уровень 1 на всем интервале; "0": уровень 0 на всем интервале;			$0,86/T$
С возвратом к нулю	"1": уровень 1 на всем интервале; "0": уровень 0 на всем интервале;			$1,72/T$

Продолжение таблицы 3.2

1	2	3	4	5
Двухфазный типа L («Манчестер»)	"1": уровень 1 на первой половине интервала; "0": уровень 1 на второй половине интервала;			$2,96/T$
Двухфазный типа S	"1": переход в начале интервала; "0": переход в начале и в середине интервала;			$2,96/T$
С обращением	"1": попеременно уровни 1 и 0 на всем интервале; "0": уровень 1 на пер- вой половине интервала;			$1,70/T$
Электронно- фотонный 1	"1": попеременно уровни 1 и 0 на всем интервале; "0": переход в середине интервала;			$1,52/T$
Электронно- фотонный 2	"1": попеременно уровни 1 и 0 на всем интервале; "0": попеременно уро- вень 1 на первой и второй полови- не интервала;			$1,70/T$

Осциллограммы сигналов в линейных кодах показаны на рисунке 3.1, а соответствующие спектральные энергетические плотности – на рисунке 3.2. Эти кривые рассчитаны предполагая, что кодируются случайные сигналы, в которых вероятности появления логических нулей и единиц равны $\frac{1}{2}$, и позволяют оценить ширину спектра сигнала. Если полоса пропускания системы передачи (излучатель – оптическое волокно – приемник) слишком узкая по сравнению с шириной спектра сигнала, то это приведет к чрезмерному искажению формы импульсов, а если слишком широкая – к нежелательному увеличению шума.

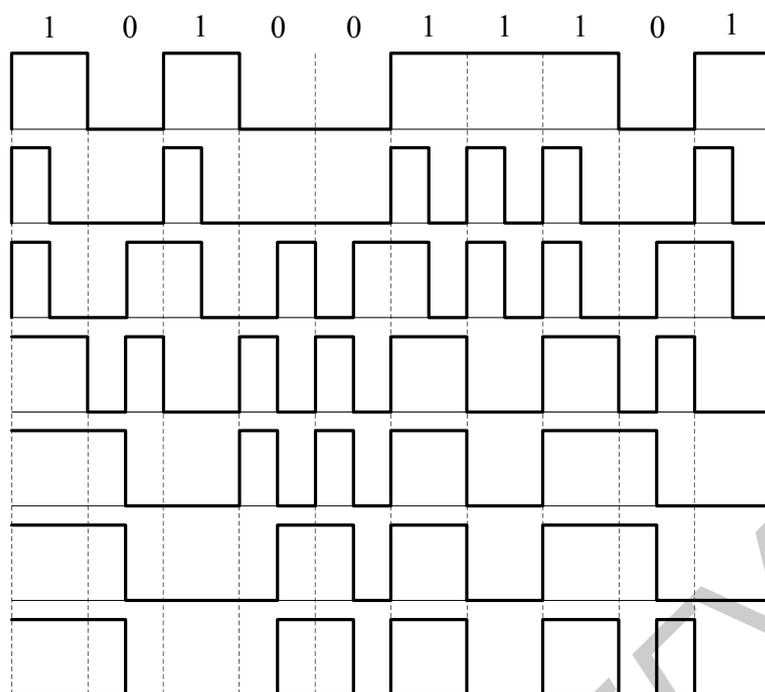


Рисунок 3.1 – Осциллограммы сигналов в линейных кодах

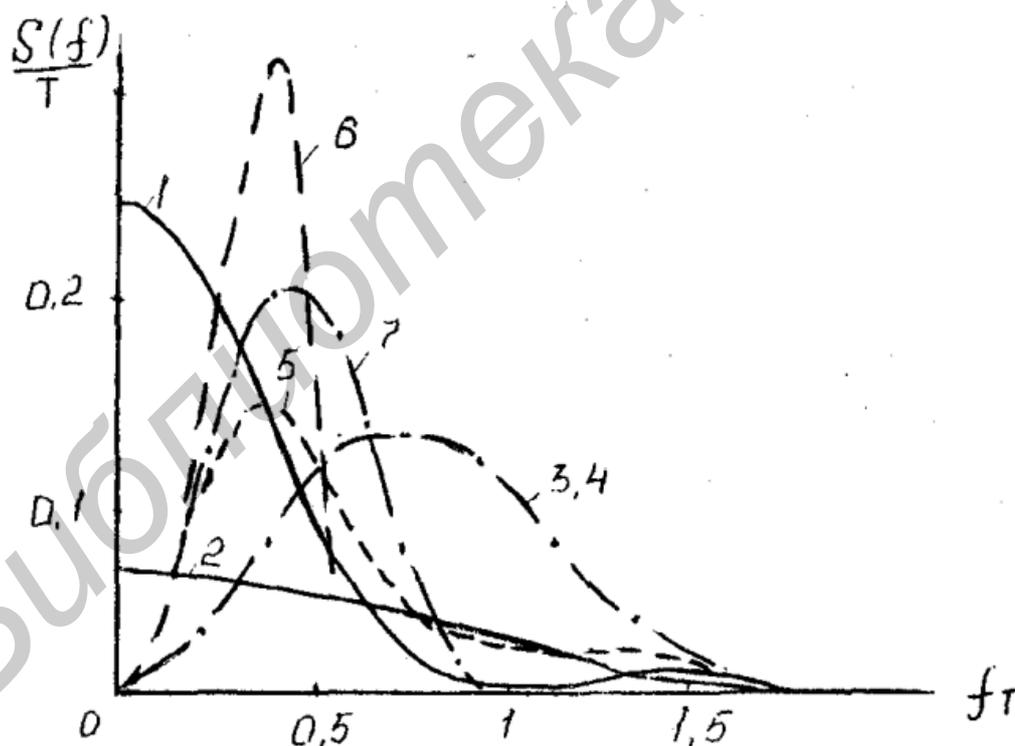


Рисунок 3.2 – Спектральные плотности линейно-кодированных сигналов

Коды без возврата к нулю и с возвратом к нулю, хотя и указаны в таблице, не отвечают критерию равенства нулю постоянной составляющей; кроме того, длинные последовательности нулей не дают информации о тактовой частоте.

Тем не менее, благодаря своей простоте и узкой спектральной полосе код без возврата к нулю получил достаточно широкое распространение. Чтобы устранить длинные последовательности нулей или единиц, информационный сигнал пропускают через специальное устройство – скремблер на передающей стороне и восстанавливающее устройство – дескремблер в приемнике. Можно осуществлять автоматическое измерение коэффициента ошибок, добавляя к каждому m битам ($m \geq 15$) контрольный разряд четности.

В ВОСП высших уровней плезиохронной цифровой иерархии (скорости 34 и 140 Мбит/с) используют блочные коды типа $mBnB$.

Каждое кодовое слово передаваемого сообщения объемом m бит по определенному правилу преобразуется в слово, состоящее из n бит ($n > m$).

При низкой скорости передачи информации отношение сигнал/шум обычно довольно велико, и поэтому можно использовать кодирование с широким спектром частот, очень простое в осуществлении. И наоборот, при высокой скорости передачи важно не расширять спектр частот, чтобы, с одной стороны, эффективно отфильтровать шум в приемнике, а с другой – упростить структуру усилительных схем и схем восстановления частоты синхроимпульсов. При этом с учетом экспериментов, проводимых в настоящее время, можно ввести следующую классификацию.

1 Скорость передачи ниже 30 Мбит/с: код двухфазный типа L и S , NRZ , электронно-фотонный код ЭФ1 и ЭФ2.

2 Скорость передачи от 30 до 200 Мбит/с: код с возвратом к нулю NRZ и с устранением длинных последовательностей нулей и единиц, код типа $3B6B$, $5B6B$.

3 Скорость передачи выше 200 Мбит/с: код без возвратом к нулю и с устранением длинных последовательностей.

3 ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО МАКЕТА

3.1 Мультиплексированная волоконно-оптическая цифровая система передачи данных (ЦСПД) предназначена для преобразования параллельных форматов данных в последовательный формат, передачи их по оптическому линейному тракту и обратного преобразования последовательного формата в параллельный.

Структурная схема линейного тракта исследуемой цифровой волоконно-оптической системы передачи (рисунок 3.3) включает в себя передающее устройство, оптический кабель и приемное устройство. В качестве источника сигнала используется генератор псевдослучайной последовательности, формирующий цифровой поток в коде NRZ . В передающем устройстве осуществляется преобразование цифрового сигнала в линейный код и далее с помощью модуляции излучения полупроводникового лазера осуществляется преобразование в оптический сигнал. С выхода оптического кабеля сигнал поступает на оптическое приемное устройство. С помощью фотодетектора осуществляется

преобразование оптического сигнала в электрический. Усилитель-корректор предназначен для усиления и восстановления формы импульсного сигнала, исказившегося в оптическом тракте. Далее сигнал поступает на пороговое устройство, где происходит восстановление исходной формы сигнала. Входное устройство осуществляет обратное преобразование сигнала из линейного кода в код NRZ.

3.2 Области применения. Мультиплексированные системы сбора и распределения информации; информационные комплексы межмашинного обмена; вычислительные машины с развитой периферией; автоматизированные системы управления и контроля.

4 ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦСПД

Таблица 3.3

№ п/п	Наименование параметра, единицы измерения	Норма	Примечание
1	Число параллельных входов/выходов	19	
2	Уровни входных/выходных сигналов	ТТ ЛОГИКИ	
3	Тип последовательного кода	Манчестер	
4	Частота смены сигнала по любому входному каналу, кГц, не более	150	
5	Скорость передачи информации, Мбит/с	8	
6	Вероятность ошибки в линейном тракте, не более	10^{-9}	
7	Напряжение питания, В	$\pm 5 \pm 0,25$ $\pm 10 \pm 0,5$	
8	Потребляемая мощность, В·А, не более	8	
9	Строительная длина оптического линейного тракта, м, не более	300	
10	Допустимый радиус изгиба оптического кабеля, мм, не менее	50	
11	Коэффициент затухания, дБ, не более	12	на 300 м

5 УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ

Для подключения питания, подачи и снятия информационных сигналов на боковых стенках блоков ПДП и ПМП около каждого разъема вынесена маркировка. Излучатель имеет маркировку Вых, фотоприемник – Вх.

Структурная схема (рисунок 3.3) мультиплексированной волоконно-оптической цифровой системы передачи данных состоит из следующих конструктивно законченных блоков: передатчика-преобразователя – ПДП, модуля волоконно-оптического – МВО; приемника-преобразователя – ПМП.

Преобразователь-передатчик состоит из блока МП-8-19, передатчика МИ-8-3.

Приемник-преобразователь состоит из блока ДМП-8-19, приемника МФ-8-3.

Модуль волоконно-оптический представляет собой оптический кабель на основе световода СК-8I200-20 с концами, размещенными в ответных частях соединителей.

Функциональная схема ЦСПД приведена на рисунке 3.4.

Передатчик-преобразователь состоит из 19-канального универсального регистра (УР), предназначенного для преобразования параллельного формата данных в последовательный формат в коде *NRZ* преобразователя кода (ПК), предназначенного для формирования цифрового последовательного потока в *NRZ*-коде в последовательный цифровой поток в коде типа «Манчестер»; генераторного оборудования (ГО), обеспечивающего управление универсальным регистром (УР) и преобразователем кода (ПК); согласующего устройства функционального (СУФ), необходимого для согласования по входу передатчика МИ-8-3 с любыми базовыми съемами ТТЛ, а также для удаления искажений и формирования фронта и спада коротких импульсных сигналов длительностью до 8 нс.

Согласующее устройство функциональное имеет два равновесных информационных входа (ВХ 1, ВХ 2) и один управляющий вход (ВХ 3) для организации разрешения или запрета передачи информации по обоим сигнальным входам; ограничителя амплитудного (ОА), выполняющего задачу ограничения амплитуды импульсных сигналов на выходе СУФ; эмиттерного повторителя (ЭП), играющего роль буферного каскада между ОА и ГТН; генератора тока накачки (ГТН), предназначенного для выработки тока инжекции соответствующего кодовой последовательности передаваемой информации и управления излучателем; излучателя (ИЗ), осуществляющего преобразование электрического тока инжекции ГТК в световой поток энергии квантов света.

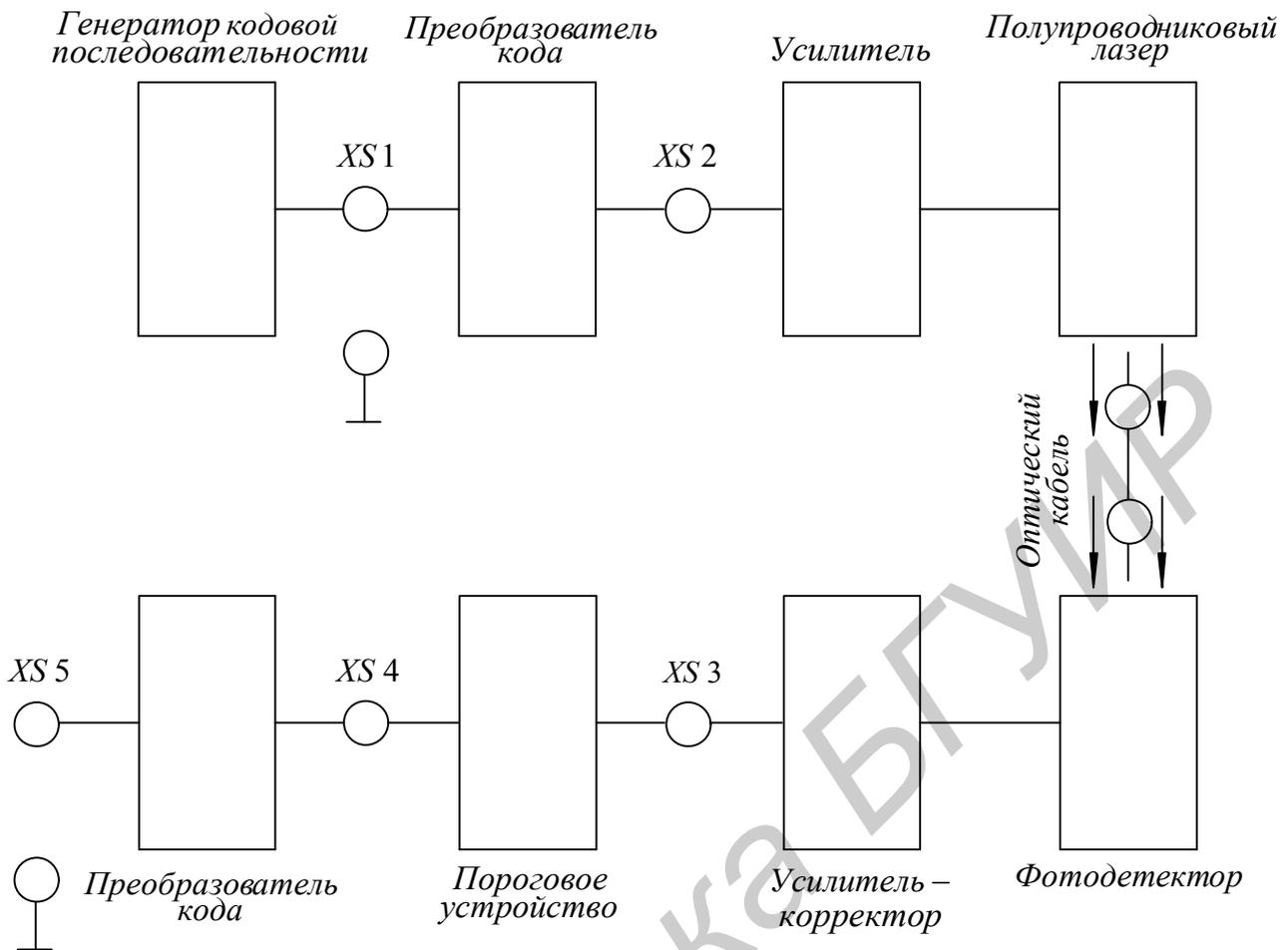


Рисунок 3.3 – Структурная схема ЦСПД

Приемник-преобразователь состоит из фотоприемного устройства (ФП), осуществляющего преобразование светового потока в электрический ток; трансимпедансного усилителя (ТИУ), являющегося преобразователем сигнального тока в сигнальное напряжение (при этом происходит интегрирование сигнала); усилителя корректора (УК), предназначенного для усиления и восстановления формы импульсного напряжения сигнала; порогового устройства (ПУ), предназначенного для формирования цифрового сигнала в уровнях ТТЛ и уменьшения изменений скважности выходного сигнала в динамическом диапазоне МФ-8-3; входного устройства (ВУ), предназначенного для преобразования цифровой последовательности в код «Манчестер», поступающего с ПУ, в последовательный цифровой код *NRZ*, а также для выделения из данной цифровой последовательности тактовой частоты $f_T = 8$ МГц; преобразователя последовательного кода в параллельный (ППК), формирующего из последовательного формата цифровых данных, поступающих с входного устройства в *NRZ*-коде, 19-канальный параллельный формат данных, а также для выделения импульса записи «Имп. зап.»; регистра памяти (РП), служащего для записи и хранения информации, поступающей в ППК и выдачи ее на вход системы.

Модуль волоконно-оптический служит для передачи оптических сигналов с выхода ПДП на расстояние до 300 м ко входу МПМ.

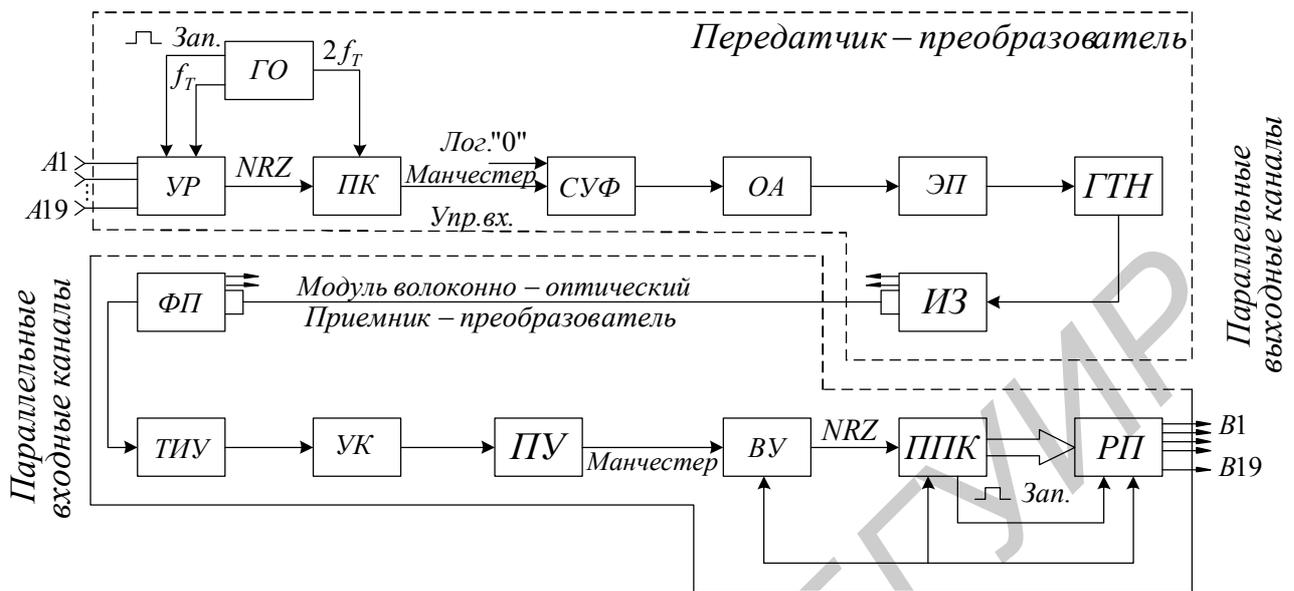


Рисунок 3.4 – Функциональная схема ЦСПД

6 ПРИНЦИП РАБОТЫ

6.1 Принцип работы ПДП

На параллельные входные каналы (A1-A19) универсального регистра (УР) поступает цифровая информация. Одновременно с генераторного оборудования (ГО) подается тактовая частота $f_T = 8$ МГц на тактирующие входы данного регистра и импульс записи с периодом $T_{пер} = 5$ мкс на вход «Выбор режима» УР.

Синхронный параллельный ввод информации осуществляется в том случае, когда на вход «Выбор режима» УР будет подан уровень логической единицы. С приходом периода тактовой частоты происходит заполнение регистра. По окончании импульса записи под воздействием тактовой частоты происходит последовательный вывод информации из УР в NRZ-коде.

Данная импульсная последовательность (в NRZ-коде) поступает на вход ПК. Одновременно на другой вход ПК с ГО поступает двойная тактовая частота $f_T = 16$ МГц. В ПК происходит формирование из кода NRZ в последовательный код типа Манчестер. Цифровая импульсная последовательность в коде Манчестер поступает на один из информационных входов блока СУФ, а на второй информационный вход должен быть подан логический "0" или нулевой потенциал. На управляющий вход подается логическая "1" в случае «разрешения» или логический "0" в случае «запрета» передачи информации. На выходе СУФ импульсный сигнал ограничивается по амплитуде с помощью ОА. Затем огра-

ниченный по амплитуде импульсный сигнал через ЭП поступает на ГТН, который управляет излучателем (ИЗ). На выходе излучателя получаем световой поток, промодулированный импульсной последовательностью. Данный световой поток поступает в модуль волоконно-оптический.

6.2 Принцип работы ПМП

Промодулированный световой поток, попадая на светочувствительную площадку ФП, преобразовывается последним в импульсы электрического тока, которые поступают на вход ТИУ. Последний представляет собой широкополосный усилитель с обратной связью по постоянному току с низким уровнем шума и большим входным импедансом. С выхода ТИУ поступает напряжение усиленного и проинтегрированного сигнала на вход УК, который, являясь дифференцирующим усилителем, восстанавливает форму сигнала до импульсного напряжения. ПУ, выполненное на основе чувствительного компаратора напряжения, включенного по схеме триггера Шмидта, преобразует аналоговый сигнал с выхода УК в цифровой сигнал в уровнях ТТЛ.

На выходе приемного модуля (МФ-8-3) имеем прямой и инверсный сигналы импульсного напряжения, соответствующие оптическому сигналу в коде «Манчестер». Данная цифровая последовательность поступает на вход ВУ. В входном устройстве происходит преобразование кода Манчестер в *NRZ* и выделение $f_T = 8$ МГц. Последовательный *NRZ*-код поступает на вход «Ввода информации» ППК, работающего в режиме сдвига. Одновременно на тактирующие входы ППК поступает тактовая частота с ВУ. В момент времени по заполнению ППК информационной импульсной последовательностью и с приходом следующего информационного кадра происходит сравнение двух принимаемых кадровых последовательностей импульсов. При правильно принятой информации ППК вырабатывается импульс записи «Имп. зап.», поступающий на вход «Выбор режима» регистра памяти (РП). С приходом тактовой частоты на тактирующие входы РП происходит параллельная запись принятой информации в данный регистр памяти и выдача ее на выходной разъем приемника-преобразователя.

7 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

7.1 Включить блоки питания лабораторного макета и осциллограф С1-65.

7.2 Зарисовать осциллограммы в контрольных точках лабораторного макета.

7.3 Измерить амплитуду и длительность сигналов в контрольных точках лабораторного макета.

7.4 Подключить к точке XS 2 анализатор спектра, измерить спектральную характеристику сигнала в линейном коде.

8 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1 Отчет по работе должен содержать: цель работы и лабораторное задание; перечень приборов, используемых при выполнении работы; структурную схему измерительной установки; осциллограммы в контрольных точках; заключение в виде выводов по всем разделам работы.

2 Отчет по лабораторной работе оформляется на стандартных листах бумаги. Структурные схемы вычерчиваются с необходимыми обозначениями и пояснениями. Результаты измерений сводятся в таблицы, которые должны соответствовать рекомендованным в методических указаниях. Графики вычерчиваются на миллиметровой бумаге в таком масштабе, чтобы форма кривых четко отражала исследуемые зависимости. Текст отчета должен содержать всю информацию о проделанной работе и полученных по ее результатам выводах и рекомендациях.

9 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1 Какие требования предъявляются к выбору линейного кода?

2 Дать определения используемых кодов.

3 Нарисовать функциональную схему ЦСПД.

4 Применение ЦСПД.

5 Привести технические характеристики ЦСПД.

6 Объяснить устройство и принцип работы ЦСПД.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алишев, Я. В. Многоканальные системы передачи оптического диапазона / Я. В. Алишев. – Минск : МРТИ, 1986.
- 2 Алишев, Я. В. Многоканальные волоконно-оптические системы связи / Я. В. Алишев. – Минск : МРТИ, 1979.
- 3 Элион, Г. Волоконная оптика в системах связи / Г. Элион, Х. Элион. – М. : Мир, 1981.
- 4 Фриман, Р. Волоконно-оптические системы связи / Р. Фриман. – М.: Техносфера, 2004. – 496 с.
- 5 Слепов, Н. Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи / Н. Н. Слепов. – 2-е испр. изд. – М. : Радио и связь, 2003. – 468 с.
6. Фокин, В. Г. Оптические системы передачи и транспортные сети / В. Г. Фокин. – М. : Эко-Трендз, 2008. – 288 с.
- 7 ЭУМКД по дисциплине ВОСП.

Библиотека БГУИР

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

Основные положения международного стандарта ISO 13695:2004
«Оптика и фотоника. Лазеры и лазерные установки (системы).
Методы измерений спектральных характеристик лазеров»

В данном приложении приведены определения основных параметров, описывающих спектральные характеристики лазера, и рекомендованы методики измерений этих параметров для распространенных типов лазеров.

Спектральные характеристики лазера, такие как максимальная (пиковая) длина волны или ширина спектральной линии, являются важными для различных возможностей его применения. Примерами служат специфические требования к спектральным характеристикам лазеров, применяемых в интерферометрии и литографии.

Допустимый уровень неопределенности измерений длины волны зависит от предполагаемого применения лазера. Следовательно, выбор аппаратуры, методики измерений и оценки их результатов предопределен тремя классами точности выполняемых спектральных измерений.

1 Термины и определения

В настоящем приложении применены термины по МСМ, ISO 11145, МЭК 60747-5-1, а также следующие термины с соответствующими определениями:

1.1 Длина волны в вакууме, λ_0 . Длина бесконечной плоской электромагнитной волны, распространяющейся в вакууме.

Соотношение частоты f и длины волны λ_0 в вакууме описывается формулой $\lambda_0 = c / f$, где $c = 299792458$ м/с.

1.2 Длина волны в воздухе, λ_{air} . Длина волны излучения, распространяющегося в воздухе, связана с длиной волны в вакууме соотношением

$$\lambda_{air} = \lambda_0 / n_{air},$$

где n_{air} – показатель преломления воздуха.

1.3 Спектральное распределение мощности излучения, $P_\lambda(\lambda)$. Отношение мощности излучения $dP(\lambda)$ (в случае импульсного лазера), содержащейся в распространяющемся лазерном пучке в интервале длин волн $d\lambda$ к этому интервалу:

$$P_\lambda(\lambda) = \frac{dP(\lambda)}{d\lambda}.$$

Мощность излучения в лазерном пучке, ограниченном длинами волн λ_{low} до λ_{high} , описана интегралом

$$P = \int_{\lambda_{low}}^{\lambda_{high}} P_{\lambda}(\lambda) d\lambda .$$

1.4 Длина волны максимума спектрального распределения мощности излучения, λ_p . Длина волны лазерного излучения (максимальная, пиковая), при которой кривая спектрального распределения достигает максимума (рисунок А.1).

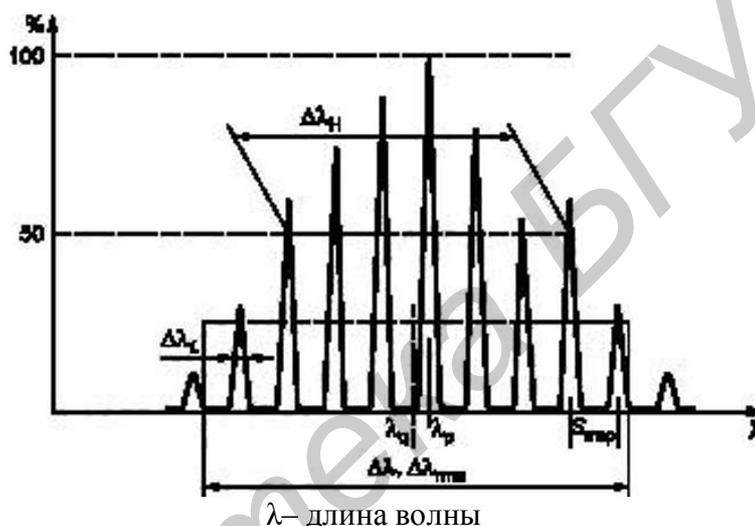


Рисунок А.1 – Спектральные характеристики лазеров – иллюстрация определяемых параметров

1.5 Среднее взвешенное значение длины волны (момент первого порядка), λ_g . Длина волны излучения, отображающая центр тяжести спектрального распределения мощности, описывается выражением

$$\lambda_g = \frac{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \lambda S(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} S(\lambda) d\lambda} ,$$

где $S(\lambda)$ – спектральное распределение мощности $P_{\lambda}(\lambda)$ для непрерывного излучения (см. рисунок А.1).

1.6 Центрированная длина волны, $\bar{\lambda}$. Среднее взвешенное длин волн спектральных линий или мод излучения

$$\bar{\lambda} = \frac{\int_{i=i_{\min}}^{i=i_{\max}} I_i \lambda_i}{\int_{i=i_{\min}}^{i=i_{\max}} I_i},$$

где λ_i – длина волны i -й спектральной линии или i -й моды излучения;

I_i – относительное значение мощности излучения в i -й спектральной линии или в i -й моде излучения;

i_{\max}, i_{\min} – предельные (граничные) спектральные линии или моды излучения ниже и выше λ_p .

Обычно пределы интегрирования выбирают таким образом, чтобы относительные значения мощности в спектральных линиях или модах излучения вне этих пределов не превышали 1 % относительного значения мощности при длине волны λ_p . Это ограничение, в частности, полезно в случае многомодового лазера.

1.7 Средняя длина волны, λ_{av} . Отношение скорости света c к средней частоте f_{av} оптического излучения

$$\lambda_{av} = c / f_{av}.$$

Средняя частота f_{av} оптического излучения может быть измерена непосредственно (например гетеродинным методом).

1.8 Среднее квадратическое значение спектральной полосы (спектрального интервала) излучения (момент второго порядка), $\Delta\lambda$. Момент второго порядка спектрального распределения мощности (энергии) излучения описывает выражение

$$\Delta\lambda = \sqrt{\frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} (\lambda - \lambda_g)^2 S(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S(\lambda) d\lambda}},$$

где $S(\lambda)$ – спектральное распределение мощности $P_\lambda(\lambda)$ для непрерывного излучения (см. рисунок А.1).

1.9 Среднее квадратическое значение спектральной полосы (спектрального интервала), $\Delta\lambda_{rms}$. Среднее квадратическое значение $\Delta\lambda_{rms}$ определяют по формуле

$$\Delta\lambda_{rms} = \sqrt{\frac{\int_{i=i_{\min}}^{i=i_{\max}} I_i (\lambda_i - \bar{\lambda})^2}{\int_{i=i_{\min}}^{i=i_{\max}} I_i}},$$

где λ_i – длина волны i -й спектральной линии или i -й моды излучения;

I_i – относительное значение мощности излучения в i -й спектральной линии или в i -й моде излучения;

$\bar{\lambda}$ – центрированная длина волны; i_{\max}, i_{\min} – предельные (граничные) спектральные линии или моды излучения ниже и выше (см. рисунок А.1).

Обычно пределы интегрирования выбирают таким образом, чтобы относительные значения мощности в спектральных линиях или модах излучения вне этих пределов не превышали 1 % относительного значения мощности при длине волны λ_p . Это ограничение, в частности, полезно в случае многомодового лазера.

1.10 Ширина спектральной полосы (на уровне половины максимальной интенсивности), $\Delta\lambda_n$. Максимальный интервал между длинами волн, при которых ординаты кривой спектрального распределения мощности (энергии) излучения равны половине ее пикового значения (см. рисунок А.1).

1.11 Ширина спектральной линии (на уровне половины максимальной интенсивности), $\delta\lambda_L$. Максимальный интервал между длинами волн в пределах $\delta\lambda$, при которых ординаты огибающей спектральной линии в спектральном распределении мощности излучения равны половине ее пикового значения.

1.12 Межмодовый интервал $F_{msp}(S_{msp})$. Интервал между соседними продольными модами, выраженный в единицах частоты F_{msp} или длины волны S_{msp} излучения (см. рисунок А.1).

1.13 Число продольных мод, N_m . Число продольных мод в пределах выделенной ширины полосы (обычно в пределах среднего квадратического значения спектральной полосы $\Delta\lambda_{rms}$).

1.14 Коэффициент подавления побочной моды, SMS . Коэффициент, отражающий соотношение относительных значений мощности излучения для наиболее интенсивной моды I_p при длине волны λ_p и второй наиболее интенсивной побочной моды при длине волны λ_s :

$$SMS = 10 \lg \left(\frac{I_p}{I_s} \right) \text{ (рисунок А.2).}$$

На практике эквивалентным считают соответствующее отношение пиковых значений спектрального распределения для наиболее интенсивной моды при длине волны λ_p и второй наиболее интенсивной побочной моды при длине волны λ_s

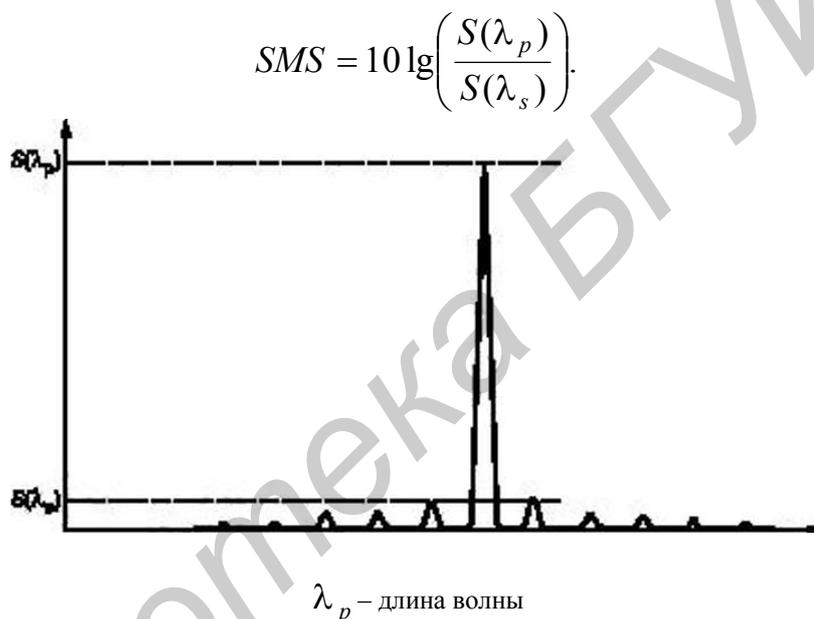


Рисунок А.2 – Коэффициент подавления побочной моды

1.15 Частота следования импульсов. Количество импульсов излучения в секунду в режиме генерации их регулярной последовательности.

1.16 Температурная зависимость длины волны, $\delta\lambda_T$. Смещение (сдвиг) длины волны при изменении температуры T лазера

$$\delta\lambda_T = \frac{d\lambda}{dT}.$$

1.17 Зависимость длины волны от тока возбуждения генерации лазерного излучения, $\delta\lambda_p$. Смещение (сдвиг) длины волны при изменении тока I возбуждения генерации лазерного излучения

$$\delta\lambda_p = \frac{d\lambda}{dI}.$$

2 Измерение длины волны и ширины полосы

2.1 Общие сведения

2.1.1 Подготовка

В зависимости от вида спектральных характеристик при выбранном для испытаний (измерений) типе лазера и требуемого уровня неопределенности измерения U_λ или U_ν длины волны (частоты) определению подлежат различные значения параметров $U_\lambda / \lambda = U_\nu / \nu$.

В случае, когда измеряемые характеристики лазера неизвестны, следует выполнить предварительные измерения для выбора наиболее подходящей измерительной аппаратуры и измеряемых параметров.

В данном приложении изложены данные с учетом предположения, что спектральные характеристики лазерного пучка одинаковы во всех точках пространственного распределения мощности (энергии) в пучке. В противном случае необходимо выполнить измерения с соответствующей пространственной разрешающей способностью с использованием аппаратуры, имеющей меньшую апертуру.

Рекомендованы три уровня точности выполняемых измерений спектральных характеристик.

2.1.2 Измерения с низкой точностью

Результаты этих измерений полезны в типичном интервале неопределенности $U_\lambda / \lambda = U_\nu / \nu > 10^{-4}$. Это относится к широкополосным (например, импульсным или многомодовым непрерывным) лазерам, а также к измерениям, выполняемым с использованием средств измерений с низкой разрешающей способностью.

При выполнении этих измерений не требуется разложение излучения на отдельные моды, а определению подлежат λ_g и $\Delta\lambda$, а также $\delta\lambda_T$ и /или $\delta\lambda_p$.

При определении λ_g пределы интегрирования λ_{\min} и λ_{\max} обычно выбирают таким образом, чтобы вне интервала между ними спектральное распределение было менее 1 % его максимального значения. При выборе других пределов интегрирования их следует указать в протоколе измерений.

Возможны случаи, когда спектральное распределение не превышает 1 % его максимального значения в очень широком диапазоне длин волн (например, при наличии узкого пика на широком слабоинтенсивном фоне). В этих случаях значительная доля суммарной мощности может находиться вне пределов интегрирования. Кроме того, при сверхузких распределениях мощности разрешающая способность применяемого средства измерений может оказывать влияние на результат измерений максимального значения $S(\lambda)$ при длине волны λ_p , что, в свою очередь, оказывает влияние на выбор пределов интегрирования. Поэтому следует принять необходимые меры, ограничивающие влияние перечисленных факторов на результат вычисления λ_g .

2.1.3 Измерения со средней точностью

Результаты этих измерений полезны в типичном интервале неопределенности $U_\lambda / \lambda = U_\nu / \nu$, в пределах $10^{-4} \dots 10^{-5}$. Это относится к узкополосным импульсным или непрерывным многомодовым лазерам.

При выполнении этих измерений излучение обычно разлагается на отдельные моды и определению подлежат F_{msp} или S_{msp} , N_m и SMS . Кроме того, должны быть определены $\bar{\lambda}$ и $\Delta\lambda_{rms}$, а также $\delta\lambda_T$ и/или $\delta\lambda_p$.

2.1.4 Измерения с высокой точностью

Результаты этих измерений полезны в типичном интервале неопределенности $U_\lambda / \lambda = U_\nu / \nu < 10^{-5}$. Это относится к одномодовым или узкополосным импульсным лазерам.

При выполнении этих измерений должны быть идентифицированы возможные побочные моды и определен коэффициент SMS . Определению подлежат также λ_p или λ_{av} , $\Delta\lambda_L$, $\delta\lambda_T$ и/или $\delta\lambda_p$. Кроме того, необходимо измерить $\sigma_y^2(2, \tau)$.

2.2 Выбор средств измерений

Выбор средства измерений зависит от требуемой точности результата и типа лазера. Например, спектрометр с дифракционной решеткой необходим при измерениях с разрешающей способностью $R = \lambda / \Delta\lambda_{rms}$ порядка от 10^5 до 10^6 .

При измерениях с импульсными лазерами, когда длительность импульса τ_n больше величины, обратной ширине полосы пропускания средства измерений, следует применять интерферометры. Для интерферометра Фабри – Перо с полосой пропускания ν_{FSR} и добротностью F минимальная длительность импульса равна F/ν_{FSR} . Для двухволнового интерферометра с максимальной разностью хода L минимальная длительность импульса равна L/c , где c – скорость света.

Требования к точности измерений длины волны часто могут быть низкими. Однако для широкополосных излучателей измерения амплитуды (уровня) спектрального распределения мощности при этом необходимо выполнять с высокой точностью (например, плоскостность кривой распределения, высоты пучков и т. д.).

Все оптические элементы системы, формирующие измеряемый пучок лазерного излучения (линзы, зеркала, оптические волокна и т. д.), должны быть либо неселективными, либо сертифицированными по спектральной чувствительности в пределах диапазона измерений длин волн. Во всем диапазоне измерений длин волн должна быть обеспечена независимость от состояния поляризации лазерного излучения. При наличии зависимости от длины волны она должна быть охарактеризована, например, с использованием матриц Мюллера (см. ISO 12005). Поляризационно-зависимая спектральная чувствительность средства измерений должна быть принята во внимание и учтена при обработке получаемых результатов. Особенно это относится к входящим в измеритель-

ную установку приемникам излучения и монохроматорам с дифракционными решетками.

Для пучков узкополосных лазеров пропускание оптической системы измерительной установки можно считать неизменным и не зависящим от состояния поляризации.

Поскольку многие типы лазеров подвержены влиянию оптической обратной связи, любые отраженные в обратном направлении и попадающие в выходную апертуру лазера потоки излучения (например, оптическими окнами, фильтрами или линзами) должны быть устранены путем наклона соответствующих оптических элементов или применения оптических изоляторов.

2.3 Измерения с низкой разрешающей способностью

2.3.1 Принцип измерений

Если параметры излучения измеряемого (испытываемого) лазера неизвестны, следует провести предварительные измерения λ_g и $\Delta\lambda_n$, позволяющие выбрать подходящую измерительную аппаратуру. Наиболее подходящим для выполнения подобных предварительных измерений является умеренных размеров дифракционный монохроматор с фокусным расстоянием порядка 30 см. Однако выбор дополнительных оптических элементов и вспомогательных принадлежностей зависит от спектрального диапазона, в котором будут производиться измерения.

2.3.2 Методика измерений

Пучок лазерного излучения или его часть, отклоненная расщепителем пучка, должны быть направлены во входную апертуру измерительного прибора (например, во входную щель монохроматора). Относительное отверстие (светосила) прибора должно быть согласовано с размерами пучка с помощью подходящей оптической системы. Обычно это требует фокусировки пучка. При этом необходимо помнить о возможности разрушения входной апертуры прибора (например, краев щели монохроматора), если плотность мощности излучения превысит предел лучевой стойкости оптических элементов системы. Поэтому должна быть предусмотрена возможность и необходимость применения оптических ослабителей.

Проверку $\Delta\lambda_{rms}$ осуществляют с помощью узкополосного вспомогательного лазера, геометрия пучка которого максимально приближена к измеряемому (испытываемому), а ширина полосы и флуктуации дрейфа длины волны по крайней мере в 10 раз меньше $\Delta\lambda_{rms}$. Во многих случаях гелий-неоновый лазер в режиме свободной генерации при $\lambda = 633$ нм является подходящим для решения этой задачи.

Если измерительный прибор сканирует измеряемую спектральную полосу, шаг сканирования должен быть согласован с требуемой разрешающей способностью. Постоянная времени регистрирующего устройства должна быть существенно меньше временного интервала, необходимого для сканирования половины ширины спектральной линии. Например, десятикратное соотношение

между указанными промежутками времени эквивалентно сдвигу на $0,1$ ширины спектральной линии.

Динамический диапазон приемника излучения по интенсивности должен охватывать не менее двух декад.

2.4 Измерения с высокой разрешающей способностью

2.4.1 Предупреждение

Все измерения спектральных характеристик лазерного излучения с неопределенностью измерений $U_\lambda / \lambda = U_\nu / \nu < 10^{-5}$ следует выполнять в условиях стабилизации механических и тепловых воздействий окружающей среды.

2.4.2 Предварительные измерения

Если параметры излучения измеряемого (испытываемого) лазера неизвестны, следует провести предварительные измерения λ_g и $\Delta\lambda_n$, позволяющие выбрать подходящую измерительную аппаратуру. Этот выбор необходим для дальнейшего исследования (испытания) лазера в зависимости от следующих его свойств:

- а) ожидаемые моды колебаний;
- б) непрерывный или импульсный режим излучения (в последнем случае следует обратить внимание на длительность импульса τ_n);
- в) измеряемые спектральные характеристики: длина волны или спектральное распределение мощности (энергии) излучения.

2.4.3 Измерения дифракционным спектрометром

В этом режиме предпочтительно использование дифракционной решетки с высокой разрешающей способностью, поскольку возможны измерения как длины волны, так и ширины спектральной полосы.

2.4.4 Измерения интерферометром

Для измерений длины волны с высокой точностью предпочтительно применение интерферометра Физо (оптического клина) или группы интерферометров Физо. Надлежащие сочетания наиболее подходящих углов клиньев и баз нескольких интерферометров в многокаскадной схеме позволяют снизить погрешность измерений длины волны до 10^{-8} . Интерферометр Физо может быть использован при испытаниях (измерениях) непрерывных и импульсных лазеров.

При измерении только спектрального распределения мощности (энергии) излучения может быть использован сканирующий интерферометр Фабри – Перо или тот же интерферометр с фиксированными зеркалами (эталон). Однако при работе с импульсными лазерами возникают ограничения. Длительность импульса τ_n должна быть больше произведения добротности F и времени пролета t волны между зеркалами интерферометра, описываемого формулой

$$t = 2nD/c,$$

где n – показатель преломления материала активной среды лазера;

D – расстояние между зеркалами интерферометра Фабри – Перо.

При сверхкоротких импульсах лазерного излучения предпочтителен дифракционный спектрометр.

Сканирующий интерферометр Фабри – Перо предпочтителен при измерениях спектрального распределения мощности непрерывных лазеров, а эталон Фабри – Перо – при измерениях спектрального распределения энергии импульсных лазеров. В любом случае оптическая длина пути между зеркалами nD и/или добротность резонатора F должна быть достаточно большой, чтобы разрешающая способность интерферометра $\Delta\lambda_{rms}$ была по крайней мере в 10 раз меньше ширины полосы измеряемого спектрального распределения. Полоса пропускания интерферометра Фабри – Перо $\nu_{FSR} = c / 2nD$ должна превышать ширину полосы измеряемого спектрального распределения в 10 раз.

В сканирующем интерферометре поперечный размер входного пучка должен быть согласован (должен соответствовать) с входной апертурой прибора. Применительно к интерферометру Фабри – Перо это означает коллимированность пучка. Фокусирующая линза на выходе интерферометра Фабри – Перо должна собирать все лучи на входной поверхности приемника излучения. Профиль интенсивности излучения на чувствительной площадке приемника излучения, формируемый сканированием подвижного зеркала, отображает измеряемое спектральное распределение. Повторное сканирование спектрального распределения в каждом интервале полосы пропускания обеспечивает линейность частотной шкалы. Разрешающая способность прибора зависит от коэффициента отражения зеркал и степени коллимированности входного пучка.

Несканирующий (с фиксированными зеркалами) интерферометр требует коллимирования входного пучка в случае схемы Физо или расходящегося входного пучка в случае эталона Фабри – Перо. Обе схемы интерферометров пригодны для спектрального анализа излучения и измерений длин волн как непрерывных, так и импульсных лазеров. В плоскости изображений интерферометра Физо формируется интерференционная картина в виде прямых линий, а в схеме Фабри – Перо – кольцевая картина. Для регистрации интерферограммы может быть использована ПЗС-камера или ПЗС-линейка фотодиодов (центрированная в случае круговой интерферограммы). Спектральное распределение лазерного излучения оценивают путем сравнения либо с шагом интерферограммы (расстоянием между ее полосами), либо с ν_{FSR} . В интерферометре Физо это соотношение линейно, а в интерферограмме интерферометра Фабри – Перо представляет собой зависимость в виде квадратного корня из диаметров колец. Расстояние между зеркалами и размеры пикселей камеры должны быть согласованы с требуемой разрешающей способностью.

При измерениях длин волн любым из двух типов интерферометров проводят сравнение интерферограмм, сформированных излучениями испытываемого (измеряемого) и опорного (референтного) лазеров.

Для измерений максимальной (пиковой) длины волны λ_p , наиболее подходящим является интерферометр Майкельсона. Несмотря на то, что разре-

шающая способность этого интерферометра обратно пропорциональна перемещению подвижного зеркала, разрешающая способность может быть увеличена при обработке интерферограммы путем определения дробных порядков интерференции.

При измерениях длины волны коллимированный пучок измеряемого лазера и пучок излучения опорного (референтного) лазера с известной длиной волны должны быть съюстированы в интерферометре таким образом, чтобы волновые фронты обоих пучков проходили по двум плечам прибора и интерферировали на выходе. Измерения длины волны проводят путем счета интерференционных полос при одновременном наблюдении в процессе перемещения зеркала интерференционных картин, формируемых обоими лазерными пучками. При этом

$$\lambda_t = \lambda_\tau \frac{N_\tau}{N_t},$$

где λ_t, λ_τ – длины волн испытываемого (измеряемого) и опорного (референтного) лазеров соответственно;

N_t, N_τ – числа полос в интерферограммах испытываемого (измеряемого) и опорного (референтного) лазеров соответственно.

Разрешающая способность увеличивается по мере возрастания числа полос, т. е. при перемещении зеркала.

Для получения спектрального распределения с помощью интерферометра Майкельсона необходимо зарегистрировать всю интерферограмму (интенсивность прошедшего излучения в зоне интерференции как функцию от перемещения зеркала) и затем выполнить преобразование Фурье. Особое внимание должно быть уделено выбору базы интерферометра, частоты дискретизации и коду компьютера, при этом следует изучить документацию производителя.

Все сказанное об интерферометре Майкельсона в полной мере относится к интерферометру Маха – Цендера.

При работе с интерферометрами из-за периодичности их передаточной функции необходимо также избегать влияния на результаты измерений остаточных побочных мод.

2.4.5 Измерения способом фотоэлектрического смещения

При измерениях спектральной ширины полосы лазерного излучения между видимым и средним ИК-диапазонами длин волн полезен гомодинный способ с самозапаздыванием (самозадержкой). Для измерений $\Delta\lambda_L$ испытываемого (измеряемого) лазера пучок вводится в оптическое волокно, разделенное на две ветви, в результате чего формируется оптическая разность хода обеих частей введенного пучка.

В результате их смещения на выходе волокна образуются колебания с частотой биений, а спектральную полосу пропускания измеряют радиочастотным спектроанализатором. Разрешающая способность этого способа обратно про-

порциональна длине отрезка оптического волокна, используемого в качестве оптической линии задержки.

В отличие от гомодинного, способ гетеродинирования – наиболее подходящий для измерений спектральных характеристик как непрерывных, так и импульсных лазеров. При этом необходимо применение опорного (референтного) лазера. Следует предварительно оценить ширины полос пропускания обоих лазеров, поскольку разрешающая способность и точность измерений длины волны в данном случае зависит только от качества опорного (референтного) лазера.

Для измерений спектрального распределения излучения в области оптических частот коллимированный пучок излучения испытываемого (измеряемого) лазера смешивают для образования частоты биений с пучком опорного (референтного) лазера. Разность частот и спектральное распределение в частотной области оптического излучения определяют радиочастотным спектрометром по частоте биений. Усредненное значение частоты биений может быть также определено с помощью электронного счетчика. Длину волны излучения в вакууме определяют по формуле

$$\lambda_{vac} = \frac{c}{\nu_r \pm \delta\nu},$$

где $c = 299792458$ м/с – скорость света;

ν_r – частота колебаний опорного (референтного) лазера;

$\delta\nu$ – частота биений.

Учебное издание

Бунас Виталий Юрьевич
Тарченко Надежда Владимировна
Урядов Владимир Николаевич

***ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ.
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ***

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Редакторы *Т. Н. Крюкова, М. А. Зайцева*
Корректор *Е. Н. Батурчик*

Компьютерная правка, оригинал-макет *А. А. Лысеня*

Подписано в печать 28.06.2013. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 3,37. Уч.-изд. л. 3,4. Тираж 100 экз. Заказ 168.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.
220013, Минск, П. Бровки, 6