

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»
Институт радиоэлектроники и информационной безопасности
Кафедра «Радиоэлектроника и телекоммуникации»

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

по дисциплине

«УСТРОЙСТВА РАДИОФОТОНИКИ»

для обучающихся очной, заочной и очно-заочной форм обучения
специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы»,
направлений подготовки 11.04.01 «Радиотехника» и
11.03.02 «Информационные технологии и системы связи»

Севастополь
2017

УДК 621.396

Рецензент:

канд. техн. наук, доцент **Е. А. Редькина**

Составитель: В. В. Головин

Лабораторный практикум по дисциплине **«Устройства радиофотоники»**: методические рекомендации для обучающихся очной, заочной и очно-заочной форм обучения специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы», направлений подготовки 11.04.01 «Радиотехника» и 11.03.02 «Информационные технологии и системы связи» / СевГУ; сост. В. В. Головин. — Севастополь: Изд-во СевГУ, 2017. — 74 с.

Целью методических рекомендаций является оказание помощи обучающимся очной, заочной и очно-заочной форм обучения в подготовке и выполнении лабораторного практикума по дисциплине «Устройства радиофотоники», а также в получении ими теоретических знаний и приобретении практических навыков исследования устройств радиофотоники и построения систем на их основе.

УДК 621.396

Методические указания рассмотрены и утверждены на заседании кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации», протокол № 1 от 1 февраля 2017 г.

Ответственный за выпуск:

заведующий кафедрой «Радиоэлектроника и телекоммуникации», д.т.н., проф. Афонин И. Л.

Издательский номер 2/17

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1. Общее описание системы автоматизированного проектирования <i>Optisystem</i>	5
2. Лабораторная работа № 1. Исследование влияния характеристик волоконно-оптических линий на распространение импульсных оптических сигналов.....	13
3. Лабораторная работа № 2. Исследование характеристик полупроводниковых лазеров	24
4. Лабораторная работа № 3. Исследование характеристик электрооптического модулятора Маха-Цандера	36
5. Лабораторная работа № 4. Исследование характеристик эрбиевого волоконного усилителя	48
6. Лабораторная работа № 5. Исследование и коррекция характеристик рамановского усилителя	62
Библиографический список.....	73
Приложение А. Образец оформления титульного листа отчета по лабораторной работе.....	74

ВВЕДЕНИЕ

В данную методическую разработку включены пять лабораторных работ.

При выполнении лабораторных работ использовался программный продукт *Optisystem* [1]. Для освоения данного САПР приведен раздел с общими для всех работ рекомендациями по моделированию.

Методические рекомендации по каждой лабораторной работе содержат следующие разделы: цель работы; теоретическая часть; порядок выполнения работы; контрольные вопросы для подготовки к защите работы.

Лабораторные работы выполняются студентами в индивидуальном порядке.

Подготовка к выполнению каждой лабораторной работы предполагает изучение теоретического материала, как приведенного в методическом пособии, так и сведений из лекционного курса по дисциплине «Устройства радиофотоники», а также из рекомендованной учебной литературы по дисциплине.

Моделирование проводится в соответствии с программой исследований и на основании индивидуальных исходных данных, выбираемых студентами из соответствующих таблиц. На основании исходных данных по каждый студент проводит индивидуальное моделирование.

Результаты моделирования: разработанная модель, графики амплитудного спектра сигналов, частотные характеристики, временные осциллограммы и др. оформляются каждым студентом в виде отчета.

В итоге каждый студент оформляет индивидуальный отчет согласно утвержденным требованиям [2], который должен иметь титульный лист и содержать следующие разделы:

- цель работы;
- описание модели исследуемого устройства или системы;
- результаты моделирования;
- анализ полученных результатов теоретического исследования;
- выводы по лабораторной работе.

Образец оформления титульного листа отчета по лабораторной работе показан в Приложении А.

1. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ *OPTISYSTEM*

1.1. Общие сведения о САПР

Система автоматизированного проектирования (САПР) *OptiSystem* — перспективный пакет моделирования оптических систем связи, позволяющий решать задачи разработки, тестирования и виртуальной оптимизации различных видов оптических линий на физическом уровне широкого спектра оптических сетей, от систем вещательного телевидения до магистральных линий.

Развитый пользовательский графический интерфейс контролирует размещение оптических компонентов и таблицу связей, модели компонентов и представление графиков.

Большая библиотека активных и пассивных компонентов включает реалистичные, частотно-зависимые параметры, динамическое изменение которых позволяет исследовать влияние технических характеристик компонентов на работу системы.

САПР ориентирована на потребности исследований ученых, инженеров оптических телекоммуникаций, студентов и др. заинтересованных пользователей.

Преимущества САПР *OptiSystem*:

- быстрое, дешевое создание прототипа;
- широкое понимание процессов в разрабатываемой системе;
- прямой доступ к многочисленным настройкам данных, определяющих характеристики системы;
- автоматическое сканирование и оптимизация параметра;
- визуальное представление опций разработки и сценариев для предложения ее предполагаемым потребителям.

В состав *OptiSystem* входят приложения:

- разработка оптических систем связи от компонентов до системного уровня на физическом уровне;
- разработка сетей абонентского телевидения, мультиплексной передачи с временным или частотным разделением каналов;
- пассивные оптические сети;
- пространственные оптические системы;
- разработка кольцевых синхронных оптических сетей и сетей с синхронной цифровой иерархией;
- разработка передатчиков, каналов, усилителей и приемников;
- разработка дисперсионных карт;
- оценка частоты ошибок по битам (*BER*) и системных браков при различных моделях приемников;
- расчеты *BER* усилительных систем.

1.2. Описание интерфейса САПР *OptiSystem*

Внешний вид графического пользовательского интерфейса *Optisystem* показан на рис. 1.1.

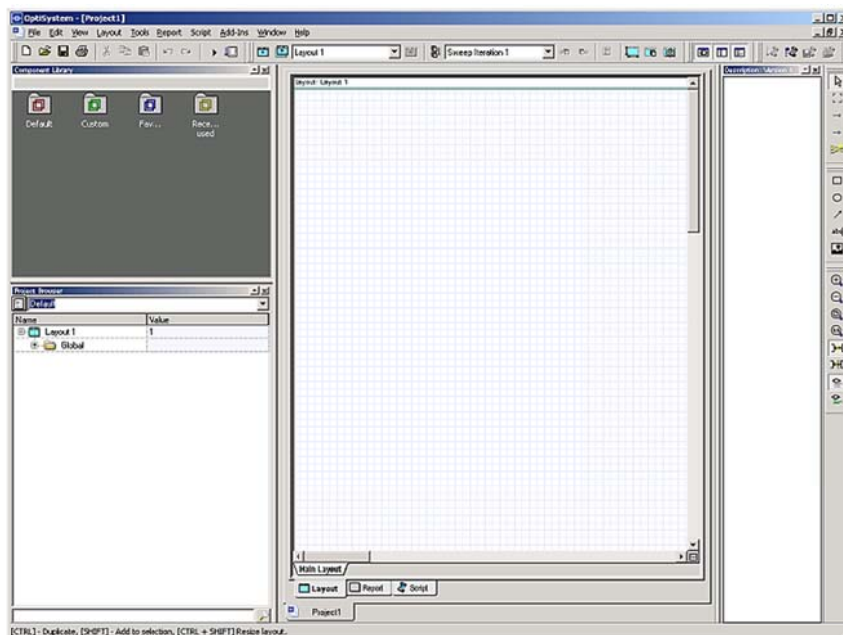


Рис. 1.1 — Внешний вид графического пользовательского интерфейса *OptiSystem*

Графический пользовательский интерфейс содержит следующие основные окна:

- топология проекта;
- навигатор проекта;
- библиотека компонентов;
- окно описания;
- строка текущего состояния.

Окно топологии проекта, показанное на рис. 1.2, представляет собой основное рабочее пространство, где размещаются компоненты топологии, редактируются их параметры и формируются связи между ними.

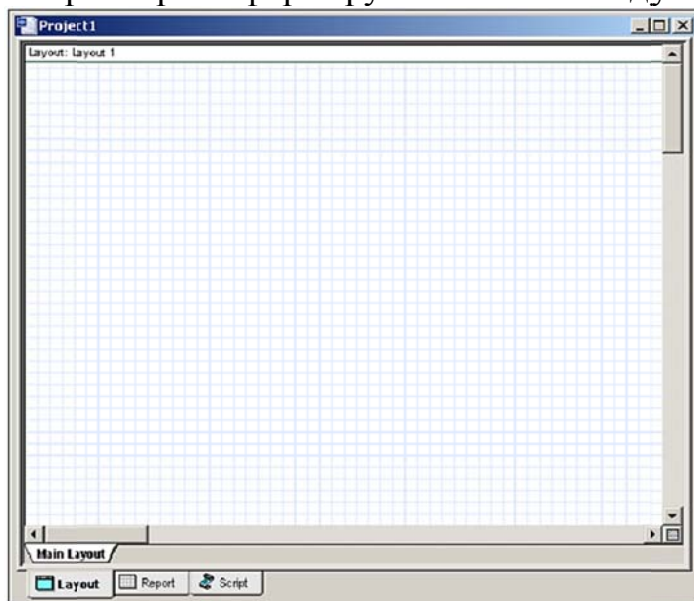
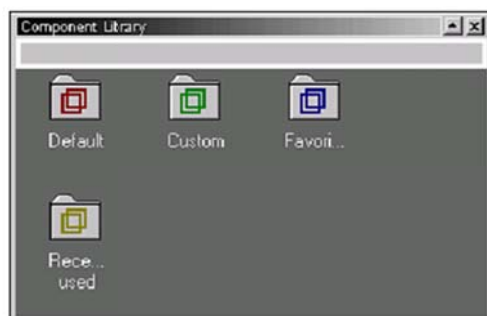


Рис. 1.2 — Окно топологии проекта

Библиотека компонентов (рис. 1.3, а) предоставляет доступ к компонентам для создания структуры системы.

а)



б)

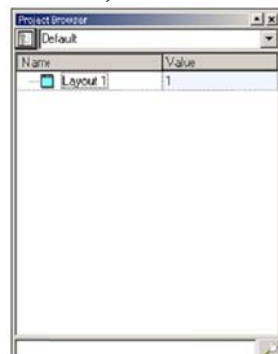


Рисунок 1.3 — Окна библиотека компонентов (а) и браузера проекта (б)

Браузер проекта (рис. 1.3, б) позволяет оптимально организовать проект и обеспечивает навигацию в текущем проекте.

Окно описания (рис. 1.4, а) отображает детальную информацию о текущем проекте.

а)



б)

[CTRL] - Duplicate, [SHIFT] - Add to selection, [CTRL + SHIFT] Resize layout.

Рисунок 1.4 — Окно описания проекта (а) и строка текущего состояния (б)

Строка текущего состояния (*Status Bar*) (рис. 1.4, б) отображает информацию о прогрессе расчета проекта, полезные подсказки по использованию *OptiSystem* и другую информацию.

Библиотека элементов содержит следующие категории:

- библиотека элементов визуализации (оптические, электрические);
- библиотека передатчиков:
 - а) оптические источники;
 - б) генераторы последовательностей битов;
 - в) импульсные генераторы;
 - г) оптические модуляторы;
 - д) оптические передатчики;
 - е) многомодовые источники;
- мультиплексоры с частотным уплотнением каналов:
 - а) мультиплексоры ввода-вывода;
 - б) демультиплексоры;
 - в) мультиплексоры;
 - г) размещенные в решетке волноводы (*AWG*);
- библиотека оптических волокон (многомодовых и одномодовых);
- библиотека усилителей (оптические, электрические);
- библиотека фильтров (оптические, электрические);
- библиотека пассивных элементов (оптические, электрические);

- библиотека элементов тракта:
 - а) частотные преобразователи;
 - б) оптические переключатели;
- библиотека приемников:
 - а) регенераторы;
 - б) фотодетекторы;
 - в) оптические приемники;
 - г) многомодовые сумматоры и селекторы;
- библиотека обработки сигналов:
 - а) арифметические операции;
 - б) инструменты (оптические и электрические);
 - в) логические операции;
- библиотека инструментов;
- элементы программного обеспечения;
- библиотека *MATLAB* (оптические и электрические компоненты);
- библиотека элементов, передающих сигналы по кабелю (*cable access library*):
 - а) генераторы несущей;
 - б) передатчики;
 - в) приемники;
- библиотека элементов для пространственных оптических систем (*free space optic*);
- библиотека автоматизации проектирования электронных приборов.

1.3. Порядок работы в среде САПР *OptiSystem*

Рассмотрим порядок работы в среде данной САПР на примере модели лазерного источника с прямой модуляцией.

В окно топологии проекта из окна библиотеки элементов переносятся основные блоки разрабатываемой системы: генератор псевдо случайной последовательности битов, импульсный генератор, лазерный излучатель (в примере выбран лазер поверхностного излучения с вертикальным объёмным резонатором) и др. (рис. 1.5).

Элементы в схеме размещаются последовательно слева направо. При переносе элемента программа предлагает выполнить соединение портов с близлежащим соответствующим элементом схемы.

После размещения всех элементов и проверки порядка их соединения производится настройка входящих в схему элементов после двойного клика на каждом из них.

В общем случае для реализации проекта нужно определиться с параметрами:

- скорость передачи данных в битах (*Bit rate*);
- длина последовательности битов (*Sequence length*);
- число выборок на бит (*Samples per bit*).

Эти параметры используются для определения временного окна (*time window*), частоты дискретизации (*sample rate*) и числа выборок (*number of samples*).

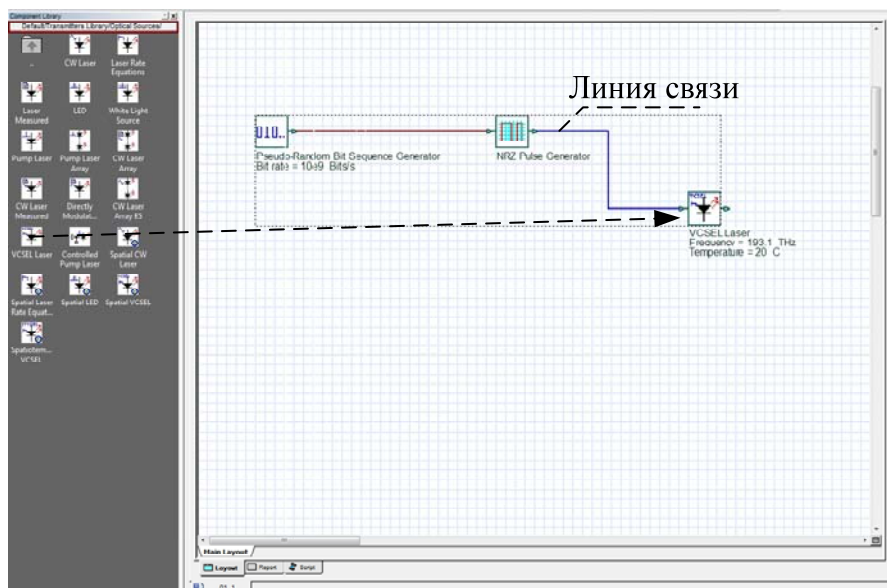


Рисунок 1.5 — Перенос элементов разрабатываемой модели

Зададим $Bit\ rate = 10^{10}$, $Sequence\ length = 256$ и $Samles\ per\ bit = 128$ (рис. 1.6) в окне параметров проекта (двойной клик на свободном пространстве в окне проекта).

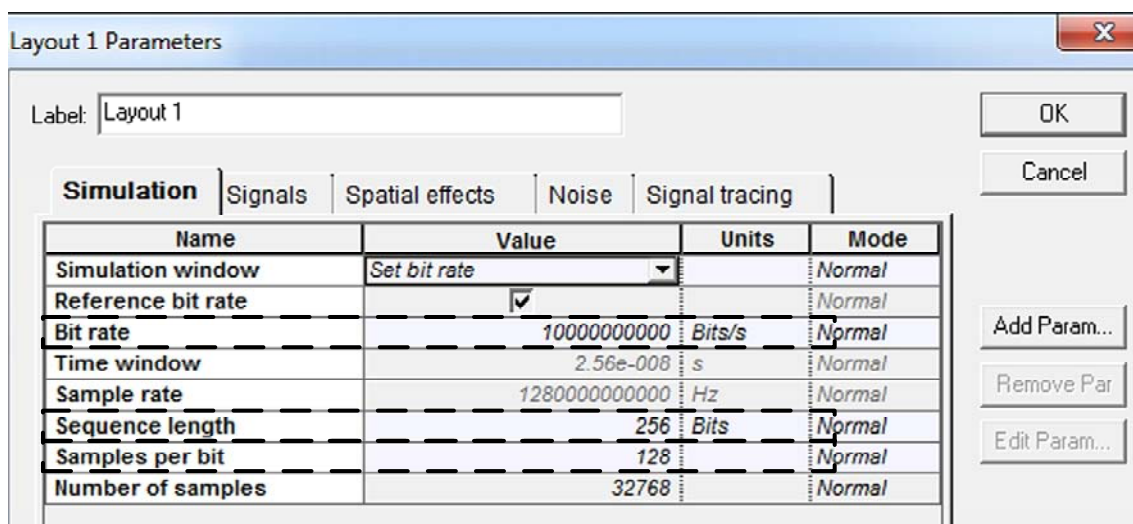


Рисунок 1.6 — Окно исходных параметров проекта

Тогда

$$Time\ window = \frac{Sequence\ length}{Bit\ rate} = \frac{256}{10^{10}} = 25,6\ (нс),$$

$$Number\ of\ samples = Sequence\ length \cdot Samles\ per\ bit = 32768\ (samples),$$

$$Sample\ rate = \frac{Number\ of\ samples}{Time\ window} = 1,28\ ТГц.$$

Частота дискретизации рассчитывается в программе автоматически («script», рис. 1.7).

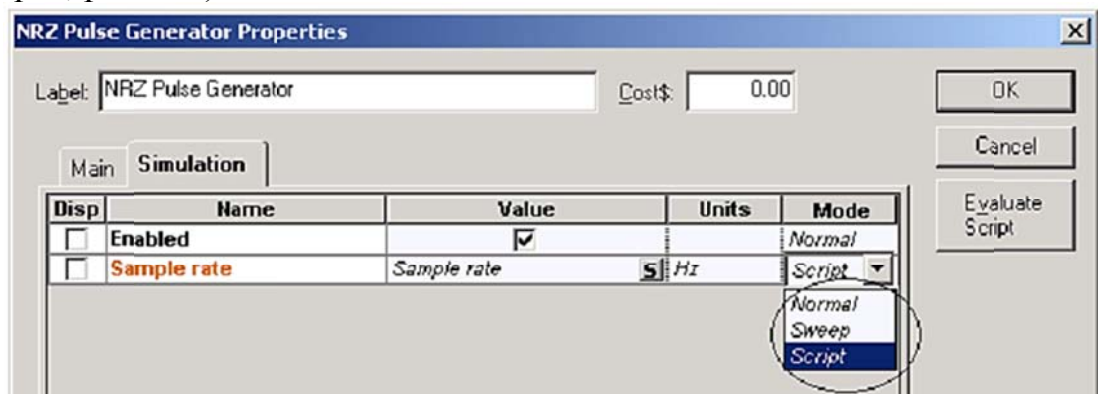


Рисунок 1.7 — Окно параметров настройки генератора импульсов

Программа в дальнейшем использует параметр «*Time window*» для всех компонент одинаковым, в то время как параметры «*sample rate*» и «*number of samples*» могут быть перенастраиваемы.

При изменении размерности заданной величины в окне настроек параметров пересчет производится автоматически (рис. 1.8).

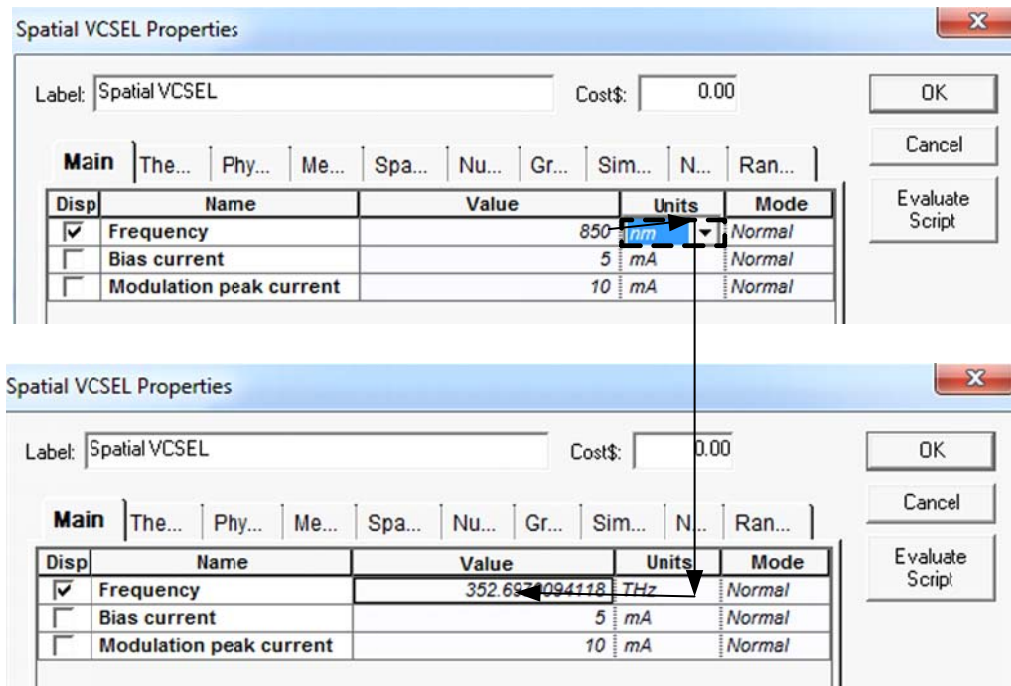


Рисунок 1.8 — Изменение размерности параметра в окне настройки параметров лазерного излучателя

Для того, чтобы задать для конкретного устройства глобальные параметры проекта, необходимо зайти в его настройки и проверить во вкладке «*Simulation*» наличие галочки в строке «*Enabled*».

Закончив соединение узлов устройств и задав их параметры, переходим к введению устройств визуализации (рис. 1.9):

— осциллограф (*Oscilloscope visualization*);

- модуль визуализации оптического сигнала во временной области (*Optical time domain visualizer*);
- анализатор спектра оптического сигнала (*Optical spectrum analyzer*);
- анализатор BER (*BER analyzer*).

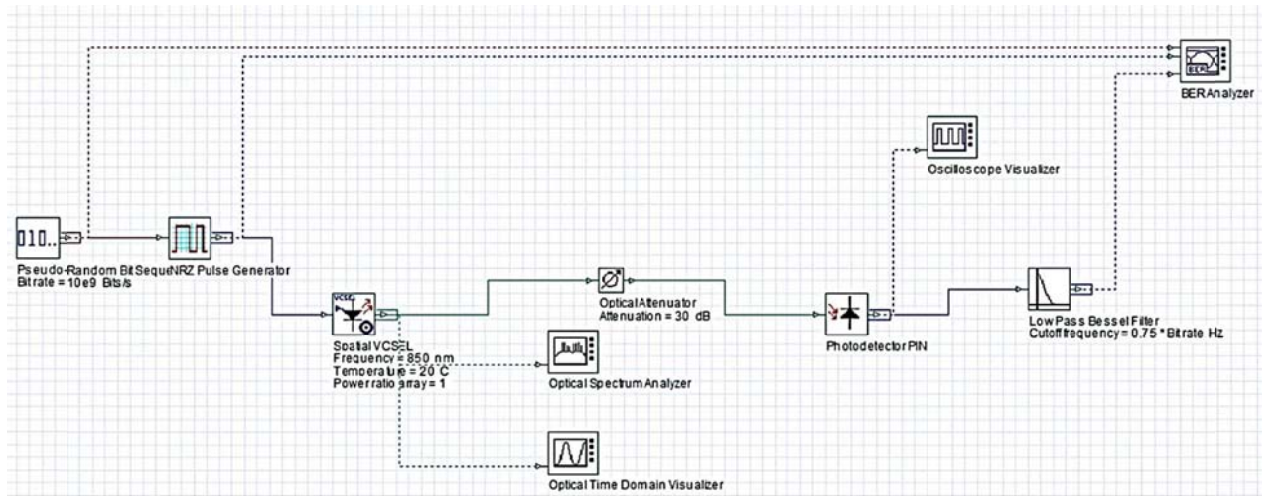


Рисунок 1.9 — Структура разработанной модели с модулями визуализации

Для задания параметров, например, анализатора спектра оптического сигнала нажимаем по нему правой кнопкой мыши и выбираем в всплывающем меню опцию «*Component Properties*».

После завершения всех настроек в верхнем меню программы нажимаем на кнопку «*Calculate*». Открывается окно, показанное на рис. 1.10, в котором нажимаем на кнопку запуска расчетов.

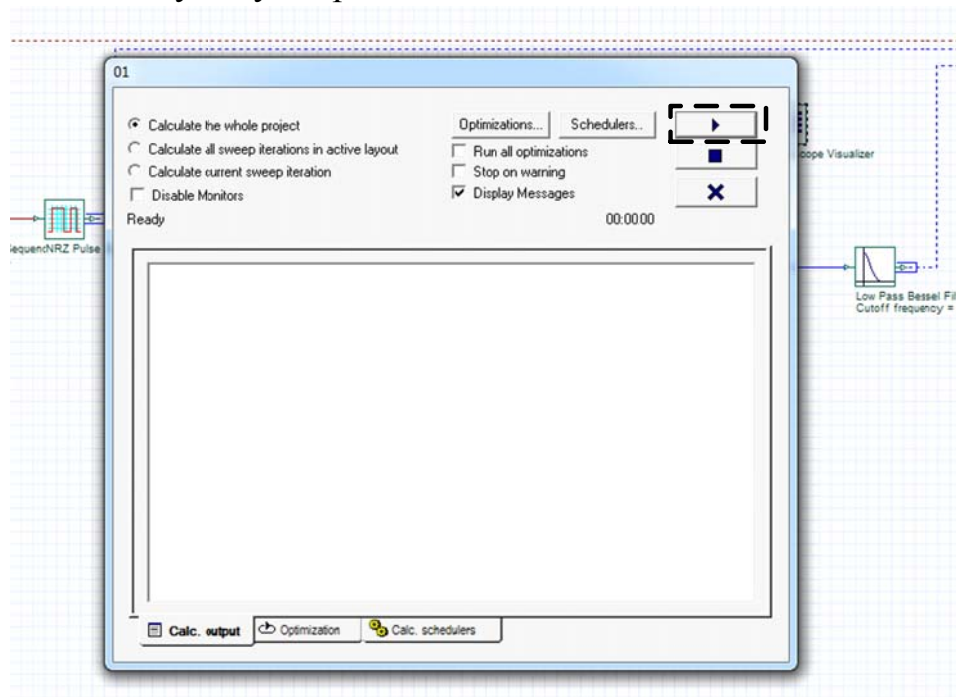


Рисунок 1.10 — Окно моделирования и оптимизации проекта

После завершения вычислений двойным нажатием на модулях визуализации можно перейти к анализу полученных результатов моделирования (рис. 1.11).

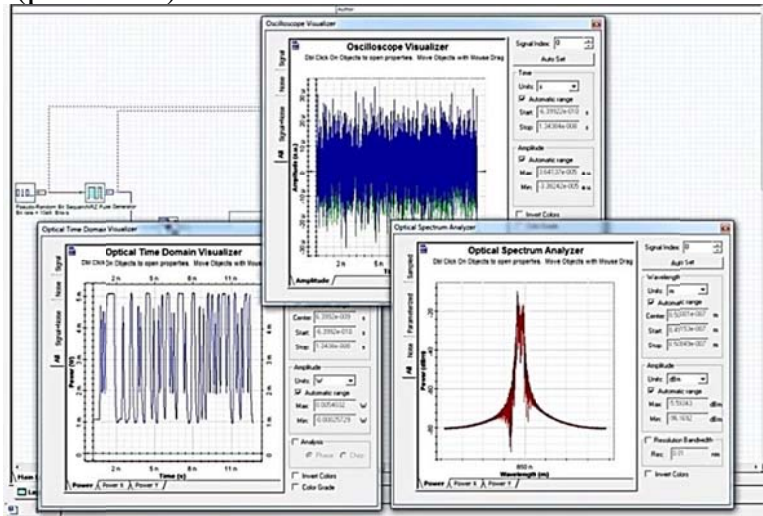


Рис. 1.11 — Результаты моделирования упрощенной системы передачи данных с лазерным излучателем с прямой модуляцией

Также отметим некоторые дополнительные особенности работы с *OptiSystem*.

В программе предусмотрена маркировка по цветам соединительных линий в зависимости от особенностей передаваемого сигнала (таблица 1.1).

Таблица 1.1 — Маркировка соединительных линий

Сигнал	Цвет соединительной линии
Двоичный (<i>Binary</i>)	Красный
Многоуровневый (<i>M-Ary</i>)	Темно-красный
Электрический (<i>Electrical</i>)	Голубой
Оптический (<i>Optical</i>)	Зеленый
Произвольный (<i>Any Type</i>)	Темно-зеленый

В программе предусмотрена возможность введения источника шума, который вводится в дискретизированный сигнал или может существовать как отдельное шумовое заполнение. По умолчанию в параметрах моделей устройств шумы отключены. Поэтому, при необходимости их анализа, следует зайти в настройки всего проекта, как показано на рис. 1.12, и поставить галочку в пункте «*Convert noise bins*».

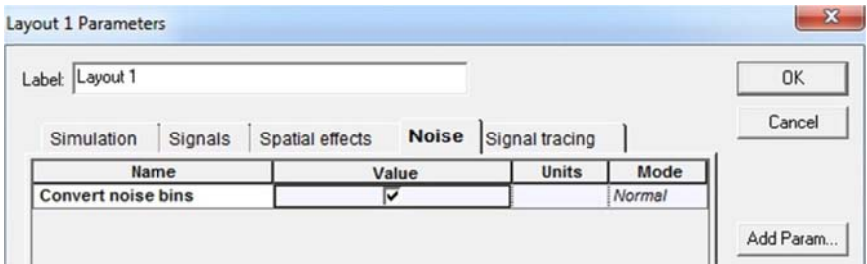


Рис. 1.12 — Окно настроек параметров проекта во вкладке «*Noise*»

2. Лабораторная работа № 1. Исследование влияния характеристик волоконно-оптических линий на распространение импульсных оптических сигналов

2.1. Цель работы

Целью работы является исследование в САПР *OptiSystem* особенностей распространения оптических сигналов в волоконно-оптических линиях с учетом их нелинейных характеристик.

2.2. Исходные данные

Исходные данные для выполнения работы представлены в табл. 2.1, 2.2

Таблица 2.1 — Исходные данные для исследования влияния дисперсии на распространение оптического импульсного сигнала

M	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
λ , нм	1531	1535	1539	1541	1545	1549	1551	1555	1557	1543
<i>Bit rate</i> , Гбум/с	35	40	25	30	25	35	40	45	35	40
P_0 , мВт	5	8	15	9	12	10	18	6	21	7
Опто- волокно	SMF- 28e	SM 332	SM 8/125	SM 9/125	Pure Band	Actale 6900	SM 332	SM 9/125	Pure Band	Actale 6900

Примечание:

В таблице введены следующие обозначения: M — предпоследняя цифра номера зачётной книжки; λ — длина волны оптического сигнала в оптоволокне; *Bit rate* — скорость передачи битов; P_0 — мощность оптического сигнала; параметры оптических волокон приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.2 — Исходные данные для исследования влияния фазовой самомодуляции на распространение оптического импульсного сигнала

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
<i>Bit rate</i> , Гбум/с	1	4	1,25	3	2	1	3	1,25	4	2
λ_1 , нм	1480	1490	1500	1510	1520	1530	1540	1550	1510	1500
P_1 , мВт	25	35	40	45	40	35	30	25	30	35
λ_2 , нм	1481	1491	1501	1511	1521	1531	1541	1551	1511	1501
P_2 , мВт	10	15	10	20	15	10	15	10	15	10
L , км	60	15	52	20	30	60	20	52	15	30

Примечание:

В таблице введены следующие обозначения: N — последняя цифра номера зачётной книжки; $\lambda_{1,2}$ — длины волн 1-го и 2-го оптических сигналов

в оптоволокне; $P_{1,2}$ — мощности 1-го и 2-го оптических сигналов в оптоволокне; L — длина каждого из двух отрезков оптоволоконной линии.

2.3. Особенности распространения световых импульсов в оптоволокне

Изучение характера распространения световых импульсов в волокне является одной из центральных задач волоконной оптики. Практическая важность таких исследований связана с широким использованием оптического волокна в современных сетях связи.

Распространение импульсов длительностью $T \geq 1$ пс в кварцевых волокнах определяется, в первую очередь, двумя эффектами: дисперсией групповой скорости (ДГС) и фазовой самомодуляцией (ФСМ).

В случае с импульсным излучением ширина спектра сигнала $\Delta\nu$ будет определяться не исходной шириной спектра лазера, а фурье-спектром импульсного сигнала из соотношения

$$\Delta\nu \approx \frac{1}{T_0},$$

где T_0 — длительность импульса.

Это справедливо в отсутствие частотной модуляции несущей сигнала.

Дисперсия заключается в том, что разные спектральные компоненты импульса имеют разную скорость распространения по световоду. Это объясняется тем, что, во-первых, показатель преломления световода зависит от частоты — $n(\omega)$, а отсюда от частоты зависит групповая скорость сигнала — это материальная дисперсия. Во-вторых, из-за волноводного способа распространения сигнала по световоду разные компоненты спектра также характеризуются разной скоростью распространения — это волноводная дисперсия. Материальная и волноводная дисперсии в сумме называются хроматической дисперсией. Из-за хроматической дисперсии импульс расширяется.

Кроме того, так как разные спектральные компоненты импульса имеют разную скорость, то при нормальной дисперсии ($\lambda < 1300$ нм для стандартного одномодового волокна) на переднем фронте импульса группируются низкочастотные спектральные компоненты, а на заднем — высокочастотные. При аномальной ($\lambda > 1300$ нм, для стандартного одномодового волокна) будет обратная картина. Линейное изменение частоты на протяжении импульса называется линейной частотной модуляцией сигнала (чирп импульса). Появление чирпа при неизменной длительности импульса приводит к расширению спектра. Однако в случае дисперсии одновременно с частотной модуляцией имеет место увеличение длительности импульса. В итоге спектр сигнала не изменяется. Это является характерным признаком линейности эффекта дисперсии. При линейных режимах спектр сигнала не меняется.

Выражение, описывающее ДГС для распространения оптического импульса без учета потерь и нелинейностей:

$$i \frac{\partial E}{\partial z} = \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2},$$

где z — направление распространения; E — огибающая импульса.

Постоянная распространения в оптическом волокне может быть разложена в общем виде в ряд Тейлора

$$\beta(\omega) = \beta(\omega_0) + \frac{d\beta}{d\omega}(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \frac{d^2\beta}{d\omega^2}(\omega - \omega_0)^2 + \dots$$

Отсюда выделяется как основная составляющая $\beta_2 = \frac{d^2\beta(\omega)}{d\omega^2}$, пс²/км, определяющая дисперсию.

Дисперсия групповой скорости D определяется согласно выражения

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2, \text{ пс}/(\text{км} \cdot \text{нм}). \quad (2.1)$$

График частотной зависимости дисперсии групповых скоростей показан на рис. 2.1.

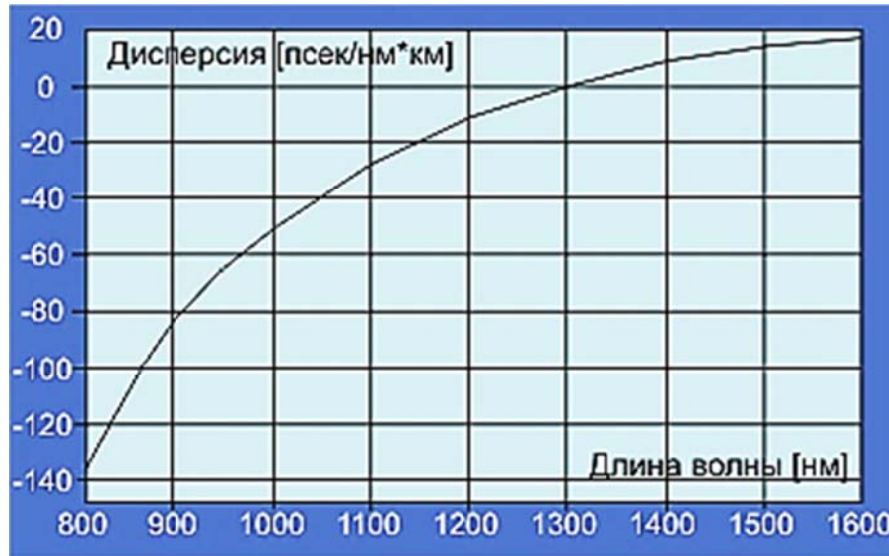


Рисунок 2.1 — Зависимость дисперсии групповых скоростей от длины волны

Величина β_2 определяется из D с учетом размерностей по формуле:

$$\beta_2(\lambda) = -D \frac{\lambda_{[\text{мкм}}^2}{0,6\pi} \text{ (пс}^2/\text{км)}.$$

Если рабочая длина волны $\lambda = 1,55$ мкм, то с учетом графика на рис. 2.1 получена величина $\beta_2 = -20$ пс²/км.

Параметр хроматической дисперсии D стандартного ступенчатого волокна в пс/(нм·км) рассчитывается по формуле

$$D = \frac{S_0}{4} \left(\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right), \quad (2.2)$$

где λ_0 — длина волны нулевой дисперсии, нм;

λ — центральная длина волны, нм;

S_0 — параметр наклона спектральной характеристики дисперсии оптического волокна в точке нулевой дисперсии, пс/(нм²·км).

Таблица 2.3 — Характеристики оптических волокон

Фирма и страна изготовитель ОВ		Corning (США)	OFS Allwave (США)	Hitachi Cable (Япония)	Fujikura (Япония)	Sumitomo Electric (Япония)	Actale (Франция)
Фирменное обозначение		SMF- 28e	SM 332	SM 8/125	SM 9/125	Pure Band	Actale 6900
Тип волокна		SSF	SSF	SSF	SSF	SSF	SSF
Макс. потери, дБ/км	1,31 мкм	0,34	0,35	0,4	0,34	0,33	0,4
	1,383 мкм	0,3	1	0,65	1,5	0,29	0,6
	1,55 мкм	0,2	0,25	0,25	0,24	0,19	0,25
Длина волны нулевой дисперсии λ_0 , мкм		1,301 — 1,321	1,300 — 1,322	1,300 — 1,324	1,301 — 1,322	1,300 — 1,312	1,300 — 1,32
Наклон нулевой дисперсии S_0 , пс/нм ² ·км		0,092	0,092	0,092	0,092	0,086	0,086

Форма гауссова импульса описывается выражением

$$E(z=0, t) = \sqrt{P_0} \exp\left(-\frac{t^2}{2T_0^2}\right),$$

где T_0 — длительность импульса, вводимого в световод; P_0 — мощность в импульсе.

При заданной скорости передачи данных (*Bit rate*) определяется соответствующая длительность одного бита T_{bd} (*bit duration*).

$$T_{bd} = \frac{1}{\text{Bit rate}}. \quad (2.3)$$

При этом, используя установленную в *Optisystem* по умолчанию значение 0,5 для параметра «ширина» («*width*») оптического генератора гауссова импульса, определяем T_{FWHM} по формуле

$$T_{FWHM} = 0,5 \cdot T_{bd}, \quad (2.4)$$

где T_{FWHM} — это время, в течение которого мощность импульса постоянно превышает половину от максимального значения.

Величина T_0 для импульса гауссовского профиля определяется по уровню 1/е от максимального («пикового») значения мощности сигнала и связана с T_{FWHM} соотношением

$$T_{FWHM} = 1,665T_0. \quad (2.5)$$

Длительность импульса при распространении в оптоволокне увеличивается согласно выражения

$$T(z) = T_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{L_D}\right)^2},$$

где L_D — это «дисперсионная» длина оптоволокна, на которой длительность первоначального импульса за счет дисперсии увеличивается в $\sqrt{2}$ раз.

Величина L_D рассчитывается по формуле

$$L_D = \frac{T_{0[\text{пс}]}^2}{|\beta_2|}, \text{ (км)} \quad (2.6)$$

Пиковая мощность благодаря дисперсии будет изменяться согласно выражения:

$$P(z) = \frac{P_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{z}{L_D}\right)^2}}. \quad (2.7)$$

Окна настройки параметров оптоволокна в САПР показаны на рис. 2.2.

В том случае, если импульс линейно частотно модулирован, чирпирован, то

$$E(z=0, t) = \sqrt{P_0} \exp\left(-\frac{1+jC}{2} \frac{t^2}{2T_0^2}\right);$$

$$T(z) = T_0 \sqrt{\left(1 + \frac{C\beta_2 z}{T_0^2}\right) + \left(\frac{\beta_2 z}{T_0^2}\right)^2},$$

где C — индекс ЛЧМ.

Если $C\beta_2 < 0$, то импульс монотонно расширяется с увеличением длины фидера, но при $z < z_{\min}$ наблюдается начальное сужение импульса. Значения $z_{\min}$ и $T(z_{\min})$ определяется согласно выражения

$$z_{\min} = \frac{|C|}{1+C^2} L_D;$$

$$T(z_{\min}) = \frac{T_0}{\sqrt{1+C^2}}. \quad (2.8)$$

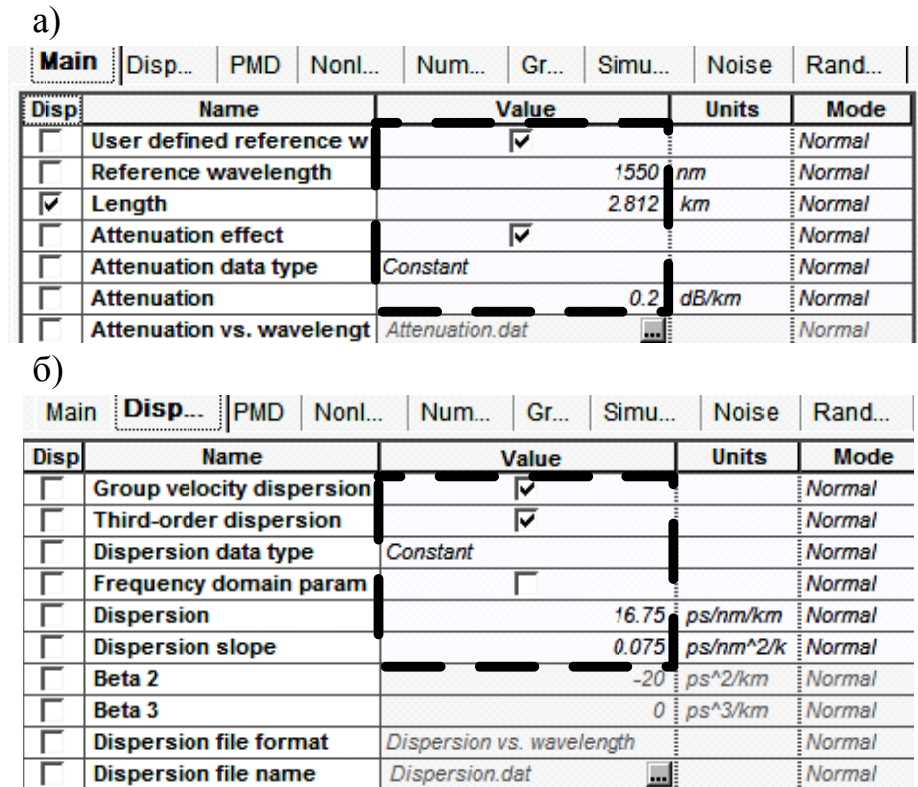


Рисунок 2.2 — Окна настройки длины и ослабления (а), значения хроматической дисперсии (б) оптического фидера в САПР *Optisystem*

Настройка ЛЧМ (*chirp factor*) производится в окне настроек оптического генератора гауссова импульса (рис. 2.3).

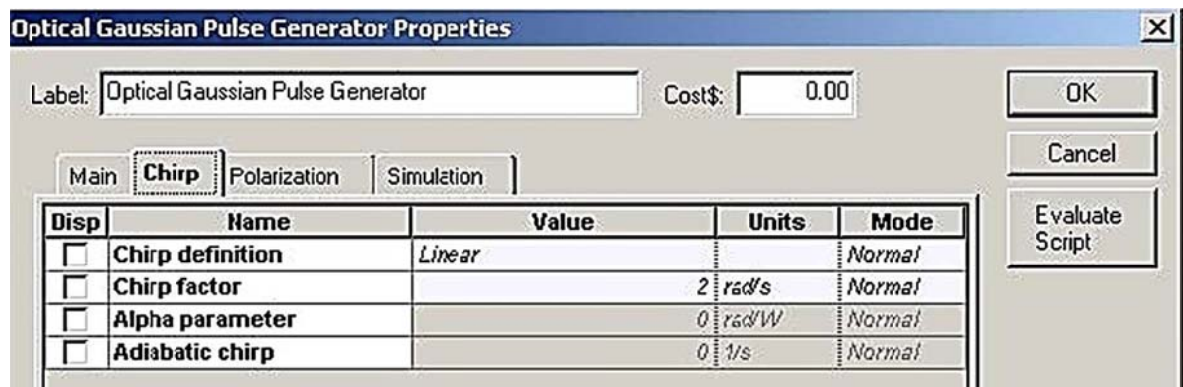


Рисунок 2.3 — Окно настроек ЛЧМ оптического генератора гауссова импульса

Для исследования влияния дисперсии на прохождение импульсного оптического сигнала по оптоволокну может быть использована топология в САПР *Optisystem*, показанная на рис. 2.4.

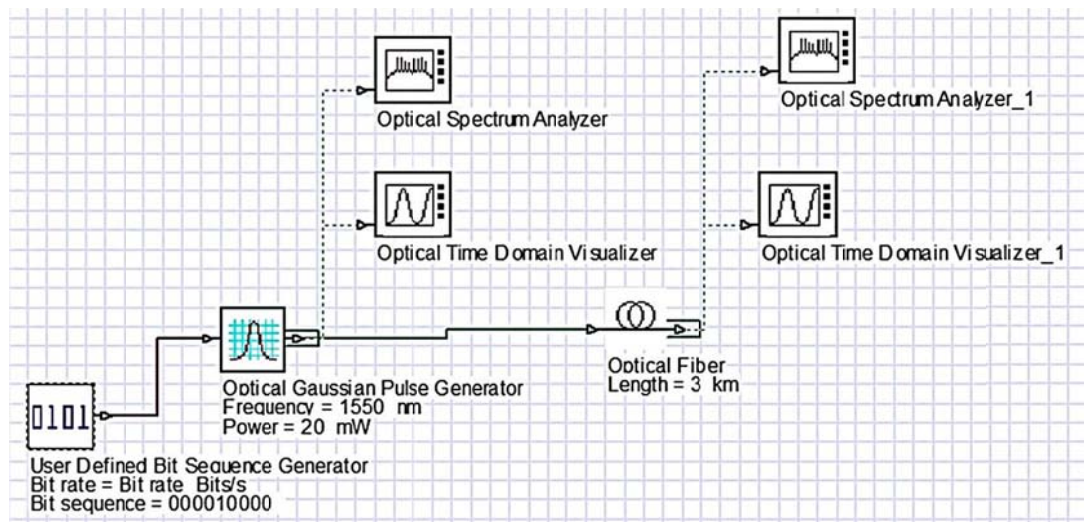


Рисунок 2.4 — Топология в САПР *Optisystem* для исследования влияния дисперсии на прохождение импульсного оптического сигнала по оптоволокну

Одним из нелинейных эффектов, влияющих на параметры импульса, является фазовая самомодуляция (ФСМ), возникающая вследствие нелинейного преломления — зависимости показателя преломления вещества от напряженности электромагнитного поля.

В кварце наблюдается нелинейность, которую можно записать как

$$n = n_0 + n_2 I, \quad (2.9)$$

где n — суммарный показатель преломления, n_0 — линейный показатель преломления, n_2 — нелинейный коэффициент преломления, I — интенсивность света.

Для кварца $n_2 \approx 3 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2/\text{Вт}$. В оптическом волокне свет не только может иметь высокую интенсивность, но ещё и большую длину взаимодействия т.к. распространяется с высокой интенсивностью на большие расстояния, что способствует сильному проявлению нелинейности.

Как следует из (2.9) при ФСМ показатель преломления зависит от интенсивности. Рассмотрим, например, гауссовский импульс. Интенсивность будет разной в разных точках импульса. Следовательно, разным будет и показатель преломления, а значит, и разная величина фазы. Так как мгновенная частота есть производная от фазы по времени, то модуляция фазы при ФСМ приводит к модуляции частоты.

Импульс с частотной модуляцией несущей характеризуется большей шириной спектра по сравнению с импульсом без частотной модуляции. Для гауссового импульса уширение спектра $\delta\omega_{\max}$ равно

$$\delta\omega_{\max} = 0,86\Delta\omega_0\Phi_{\max},$$

где $\Delta\omega_0$ — ширина спектра исходного импульса; $\Phi_{\max}$ — максимальный нелинейный набег фазы.

Для проведения исследования влияния фазовой самомодуляции на характеристики импульсного сигнала разработана топология, показанная на рис. 2.5.

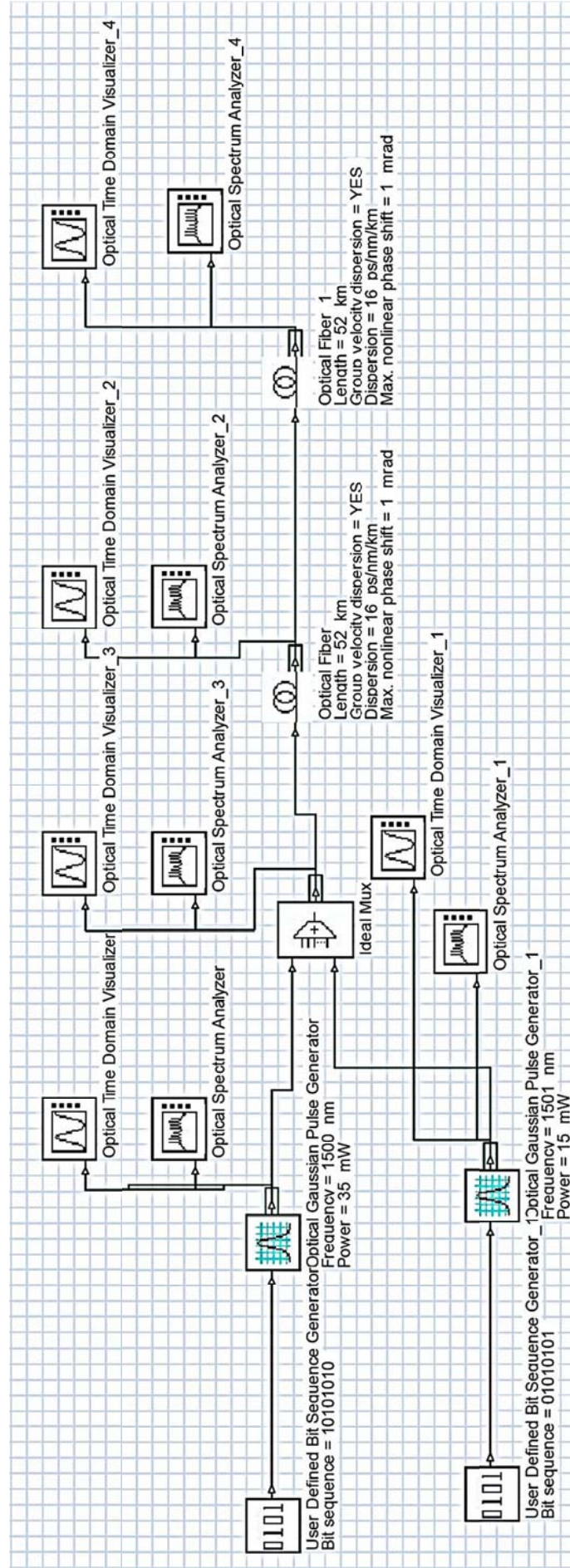


Рисунок 2.5 — Топология в САПР Optisystem для исследования влияния фазовой самомодуляции на прохождение импульсного оптического сигнала по оптоволокну

Для наглядного визуального наблюдения фазовой самомодуляции следует в проекте, показанном на рис. 2.5, задать общие параметры проекта, показанные на рис. 2.6.

Simulation window	Set bit rate	Normal
Reference bit rate	☒	Normal
Bit rate	1250000000 Bits/s	Normal
Time window	3.2e-009 s	Normal
Sample rate	160000000000 Hz	Normal
Sequence length	4 Bits	Normal
Samples per bit	128	Normal
Number of samples	512	Normal

Add Param...
Remove Par
Edit Param...

Рисунок 2.6 — Параметры проекта для исследования ФСМ

В этом случае два наблюдаемых во времени сигнала будут смещены во времени на 800 пс и по длине волны на 1 нм. Величина дисперсии групповой скорости определяется на формуле (2.2).

2.4. Порядок выполнения работы

2.4.1. Предварительные расчеты.

2.4.1.1. Пользуясь данными табл. 2.1, 2.3 и формулой (2.2) определить хроматическую дисперсию.

2.4.1.2. Рассчитать L_D по формуле (2.6) с учетом формул (2.3) — (2.5) и построить график зависимости пиковой мощности от длины оптического кабеля (при $z \in [0, 2L_D]$) по формуле (2.7).

2.4.1.3. Рассчитать $z_{\min}$ и $T(z_{\min})$ по формулам (2.8), полагая $C = 2$ рад/с.

2.4.2. Теоретическое исследование влияния дисперсии на прохождение импульсного оптического импульсного сигнала по оптоволокну.

2.4.2.1. Собрать схему, показанной на рис. 2.4.

Примечание. Место размещения элементов схемы в библиотеке:

— *User Defined Bit Sequence Generator* — папка *Transmitters Library / Bit Sequence Generators*;

— *Optical Gaussian Pulse Generator* — папка *Transmitters Library / Pulse Generators / Optical*;

— Измерительные приборы — папка *Visualizer Library*;

— *Optical fiber* — папка *Optical Fibers Library*;

— *Ideal Mux* — папка *WDM Multiplexers Library / Multiplexers*.

2.4.2.2. Задать общие параметры проекта с учетом данных табл. 2.1. Общие для всех параметры: *Sequence length* = 8 bits; *Samples per bit* = 256.

2.4.2.3. Задать настройки оптического генератора гауссова импульса с учетом данных табл. 2.1; задать *Chirp factor* = 0 рад/с.

2.4.2.4. В блоке «*User Defined Bit Sequence Generator*» задать последовательность символов «00010000».

2.4.2.5. Задать настройки оптоволоконна с учетом рассчитанных дисперсии, длины оптического кабеля L_D и использовать данные табл. 2.1 и 2.3 (см. рис. 2.2).

2.4.2.6. Выполнить моделирование. Получить временные осциллограммы и спектры импульсов. В последнем случае, пользуясь инструментом «Zoom» (клик правой кнопкой мыши по экрану измерительного прибора активирует панель инструментов), улучшить визуальное представление спектров импульсов (максимальное заполнение окна графиков).

Для сохранения графиков показаний измерительных приборов использовать всплывающее меню окна графика, расположенное в левом верхнем углу окна графиков (синяя иконка), в котором выбрать команду «Print to Bmp File»).

2.4.2.7. Задавая длину оптоволоконна равной $2L_D$, $4L_D$ повторить пп. 2.4.2.6. Исследовать только спектр и временную осциллограмму выходного сигнала. Сохранить их с помощью команды «Print to Bmp File».

2.4.2.8. Задать в настройках генератора импульса параметр *Chirp factor* равным 2 рад/с. Задать длину оптоволоконна равную $z_{\min}$ и выполнить пп. 2.4.2.6. Исследовать только спектр и временную осциллограмму выходного сигнала. Сохранить их с помощью команды «Print to Bmp File».

2.4.3. Теоретическое исследование влияния фазовой самомодуляции на прохождение импульсного оптического импульсного сигнала по оптоволокону.

2.4.3.1. Создать проект с топологией, показанной на рис. 2.5.

2.4.3.2. Задать *Sequence length* и *Samples per bit* согласно рис. 2.6. *Bit rate* выбрать из табл. 2.2.

2.4.3.3. В блоках «User Defined Bit Sequence Generator» и «User Defined Bit Sequence Generator_1» задать последовательность символов «10101010» и «01010101», соответственно.

2.4.3.4. Задать настройки оптических генераторов гауссовых импульсов согласно данных табл. 2.2.

2.4.3.5. Задать настройки оптоволоконна согласно данных табл. 2.2, 2.3 и рис. 2.1. Поставить галочку в строке «Self-phase modulation».

2.4.3.6. Выполнить моделирование. Для топологии, показанной на рис. 2.5, получить временные осциллограммы на приборах «Optical time domain visualizer_3, 2, 4» и спектры импульсов на приборах «Optical spectrum analyzer_3, 2, 4». Сохранить их с помощью команды «Print to Bmp File».

2.5. Обработка результатов измерений

2.5.1. Привести рисунки с разработанными измерительными схемами.

2.5.2. По результатам выполнения пп. 2.4 для каждого из модельных экспериментов привести рассчитанные по исходным данным величины.

2.5.3. Привести результаты экспериментальных исследований: осциллограммы и спектры оптических импульсных сигналов.

2.5.4. Сделать выводы по работе.

2.6. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

2.6.1. Чем обусловлены искажения одиночных импульсов при распространении в стандартном одномодовом волокне?

2.6.2. Чем обусловлена материальная дисперсия при распространении оптического сигнала по фидеру?

2.6.3. Чем обусловлена волноводная дисперсия при распространении оптического сигнала по фидеру?

2.6.4. Чем отличаются нормальная и аномальная дисперсии?

2.6.5. В чем выражается линейность эффекта дисперсии?

2.6.6. Как влияет дисперсия в оптоволокне на длительность импульса и его спектр?

2.6.7. Как изменяется эволюция импульса при наличии некоторой начальной ЛЧМ гауссова импульса?

2.6.8. Чем обусловлен эффект фазовой самомодуляции?

2.6.9. В чем проявляется эффект фазовой самомодуляции?

2.6.10. Как изменится спектр распространяющегося по оптоволокну импульсного сигнала, если увеличить Bit rate?

2.6.11. По характеристике хроматической дисперсии как можно классифицировать различные оптические волокна?

2.6.12. Какими нелинейными свойствами обладают оптические волокна?

3. Лабораторная работа № 2. Исследование характеристик полупроводниковых лазеров

3.1. Цель работы

Целью работы является исследование в САПР *OptiSystem* характеристик лазера с распределенной обратной связью (РОС) и лазера с вертикальным резонатором, работающих в режиме с прямой модуляцией.

3.2. Исходные данные

Исходные данные для выполнения работы представлены в табл. 3.1, 3.2

Таблица 3.1 — Исходные данные для исследования характеристик лазера РОС

M	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
λ , нм	1290	1555	1310	1490	1330	1570	1340	1590	1260	1680
$Bit\ rate$, Гбум/с	1,1	1,3	1,2	1,4	1,25	1,5	1,15	1,35	1	1,45
I_{B1} , мА	20	15	20	25	20	15	20	25	15	20
I_{B2} , мА	40									
I_{peak} , мА	40									

Примечание:

В таблице введены следующие обозначения: M — предпоследняя цифра номера зачётной книжки; λ — длина волны оптического сигнала в оптоволокне; $Bit\ rate$ — скорость передачи битов; I_{B1} и I_{B2} — минимальный и максимальный задаваемые токи смещения, соответственно; I_{peak} — пиковый модулирующий ток.

Таблица 3.2 — Исходные данные для исследования характеристик лазера с вертикальным резонатором

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
λ , нм	683	863	1550	683	1550	863	683	1550	863	1550
$Bit\ rate$, Гбум/с	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2	2,1

Примечание:

В таблице введены следующие обозначения: N — последняя цифра номера зачётной книжки.

3.3. Общая характеристика лазерных диодов

Светодиод (СИД) представляет собой полупроводниковый прибор с p - n переходом, протекание электрического тока через который вызывает интенсивное спонтанное излучение. Известно много конструкций СИД, однако наибольшее применение получили поверхностные и торцевые СИД.

В поверхностном светодиоде волоконный световод присоединяется к поверхности излучения через специальную выемку в полупроводниковой подложке. Такой способ стыковки СИД и стекловолокна обусловлен

необходимостью ввода максимальной мощности спонтанного излучения в световод.

В конструкции торцевого светодиода предусмотрен вывод оптической мощности излучения через один из торцов. При этом другой торец выполнен в виде зеркала, которое отражает фотоны в активный слой. Светоизлучающий торец СИД согласуется с волоконным световодом линзовой системой.

Ваттамперная характеристика светодиодов показывает зависимость излучаемой мощности от тока, протекающего через прибор (рис. 3.1, а).

Характеристики имеют линейный и нелинейные участки. Нелинейность обусловлена предельными возможностями по спонтанной рекомбинации электронов и дырок и их ограниченным числом, зависящим от насыщенности примесными компонентами и общего объема активного слоя. Ваттамперная характеристика зависит от температуры кристалла. С ее повышением мощность излучения может значительно снижаться.

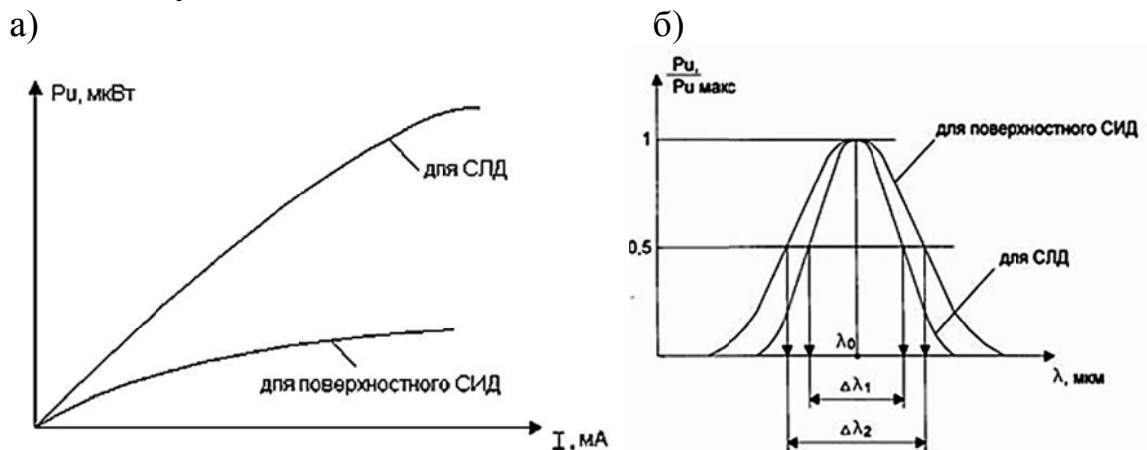


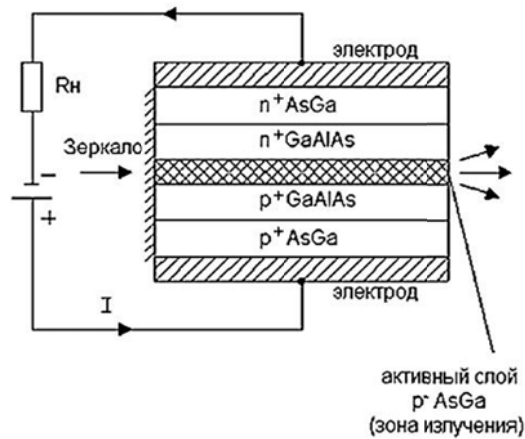
Рисунок 3.1 — Ватт-амперные (а) и спектральные характеристики (б) лазерных диодов

Спектральная характеристика светодиодов показывает зависимость излучаемой мощности от длины волны излучения (рис. 3.1, б). Ширина спектра СЛД составляет около 10 — 30 нм, для поверхностного СИД — около 30 — 60 нм. Более узкий спектр излучения светоизлучающего лазерного диода (СЛД) объясняется волноводным эффектом и некоторой согласованностью (когерентностью) излучательных рекомбинаций.

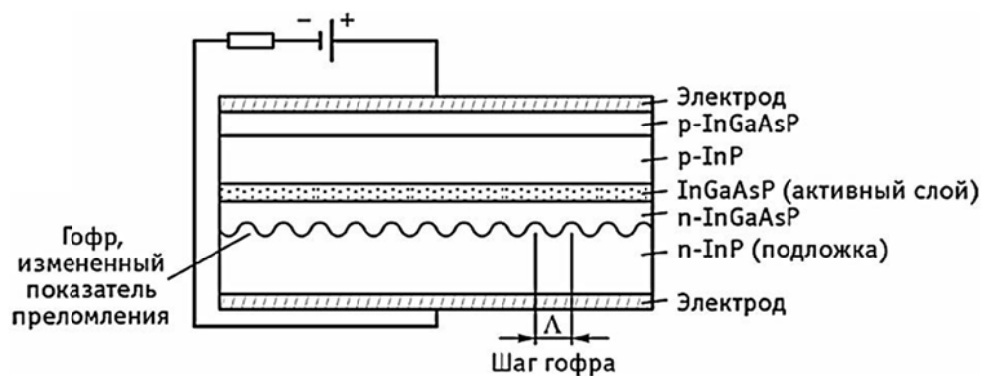
Известно множество типов конструкций полупроводниковых лазеров. Они подразделяются на простейшие (гомолазеры) и двойной гетероструктуры (ДГС), в которых используются резонаторы Фабри-Перо и электронные полосы (полосковые) с селекцией продольных мод, с распределенной обратной связью (РОС), с распределенными брэгговскими отражателями (РБО), с внешней синхронизацией мод и т.д.

Конструкция лазера с резонатором Фабри-Перо представлена на рис. 3.2, а. Название «двойная гетероструктура» обозначает, что эта конструкция имеет двойной слой различных по свойствам полупроводников, прилегающих к активному слою, которые отличают эту конструкцию от простейшего лазера.

а)



б)



в)

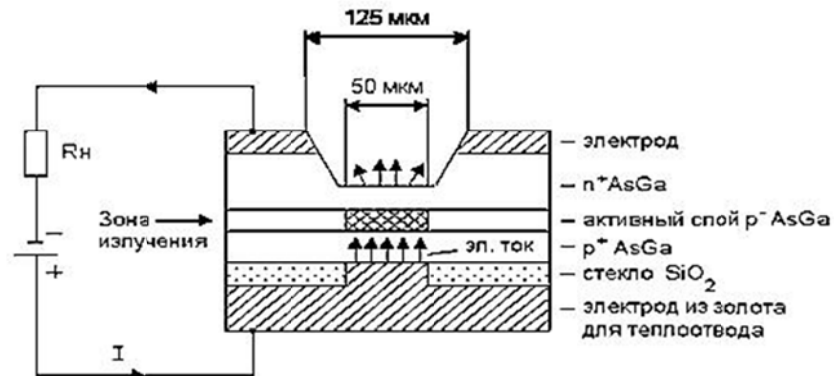


Рисунок 3.2 — Структуры лазерного диода Фабри-Перро с двойной гетероструктурой (а), лазера с распределенной обратной связью (б) и поверхностно излучающего лазера с вертикальным резонатором (в)

Полупроводниковые слои оболочки имеют меньший показатель преломления, чем у активного слоя. Благодаря этому, в активном слое создается волновой канал с высокой плотностью носителей зарядов и фотонов. Активный слой имеет толщину около 0,1 — 1 мкм. В нем с помощью источника электрического тока создается инверсная населенность. Внутренние поверхности торцов кристалла отшлифованы и превращены в зеркала.

Характеристики излучения лазера не остаются постоянными. Например, величина порогового тока сильно зависит от температуры тела лазера. Для

снижения зависимости порогового тока лазера от температуры в конструкциях применяют микрохолодильники на основе эффекта Пельтье.

При изменении величины тока накачки в лазере происходит изменение спектрального состава, что при модуляции тока накачки информационным сигналом приводит к динамическому уширению спектра и перескоку максимальной мощности излучения с одних мод на другие. Для систем, работающих со скоростями передачи данных большими, чем несколько сотен Мбит/с, на волокне с малыми потерями, это явление может стать основным фактором, ограничивающим длину пролета секции. Для преодоления этой проблемы разработаны различные конструкции одномодовых лазеров. Чаще других применяют лазеры с распределенной обратной связью, РОС, (*DFB*, *Distributed Feed Back*) (рис. 3.2, б) и лазеры с брэгговскими отражателями, РБО, (*DBR*, *Distributed Brag Reflector*); поверхностно излучающие лазеры с вертикальными резонаторами, ЛВП, (*VCSEL*, *Vertical-Cavity Surface Emitting Laser*) (рис. 3.2, в). В отличие от лазеров Фабри-Перро (*FP*) в лазерах РОС и РБО положительная обратная связь создается благодаря распределенной структуре под названием «гофр». Это граница между резонатором и другим диэлектрическим слоем.

Одномодовые лазеры РОС (*DFB*) являются одними из основных источников излучения для протяженных волоконно-оптических линий.

DFB-лазер очень чувствителен к оптической обратной связи, в особенности от оптических разъемов, которые служат интерфейсами между лазером и волокном основной линии связи. Можно предпринять ряд шагов, чтобы уменьшить интенсивность обратной связи или ослабить эффект от ее влияния:

- использовать антиотражающие покрытия;
- скалывание кончика волокна под небольшим углом, так чтобы отраженный свет не попал на активную область такого лазера;
- установить изолятор между лазером и интерфейсом оптического разъема.

Лазер типа *VCSEL* (рис. 3.2, в) 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 охватываются снаружи отражателями 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. 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 *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.

Типовые характеристики *VCSEL* с апертурой диаметром 4 мкм и с мощностью излучения 5 мВт показана на рис. 3.3.

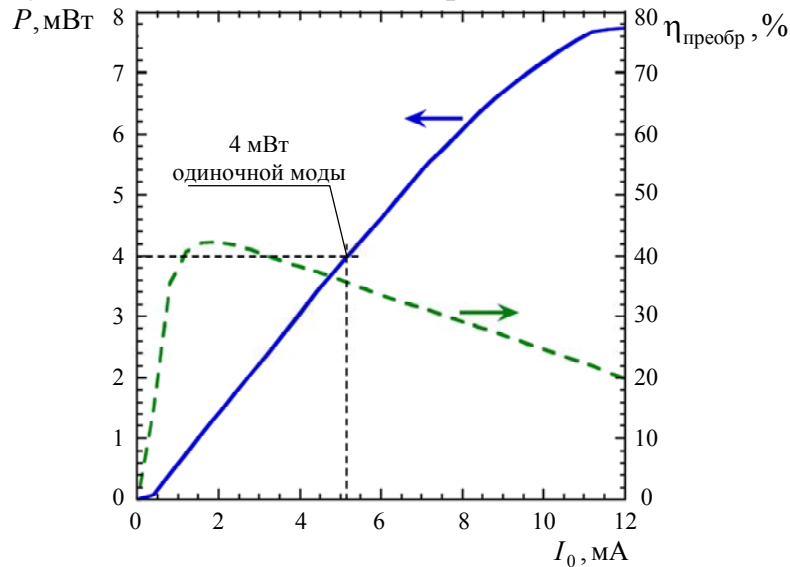


Рисунок 3.3 — Зависимость выходной оптической мощности P и эффективности преобразования мощности $\eta_{\text{преобр}}$ от постоянного тока накачки *VCSEL* лазера при температуре 20 °С

Типовые параметры для *FP*, *DFB* и *VCSEL* лазеров приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 — Сравнительные характеристики типовых *FP*, *DFB* и *VCSEL* лазеров

Характеристика	<i>FP</i>	<i>VCSEL</i>	<i>DFB</i>
Крутизна ВтАХ, Вт/А	0,15	0,2	0,28
Относительная шумовая интенсивность, дБ/Гц	–150	–140	–135
Максимальная выходная мощность, мВт	5	1,5	10
Пороговый ток, мА	~ 10	~ 6	> 15
Усиление по мощности, дБ	~ –25	~ –20	~ –10
Динамический диапазон без интермодуляционной составляющей третьего порядка, дБ·Гц ^{2/3}	~ 110	~ 116	~ 120
Максимальная ширина полосы частот модуляции, ГГц	>1	>2,5	>10
Коэффициент шума, дБ	~ 29	~ 23	~ 32

Топология проекта для проведения исследований характеристик лазерных диодов показана на рис. 3.4.

Для проведения исследований характеристик *VCSEL*, работающих на длинах волн 683, 863 нм, их настройки задаются согласно данным, показанных в табл. 3.4.

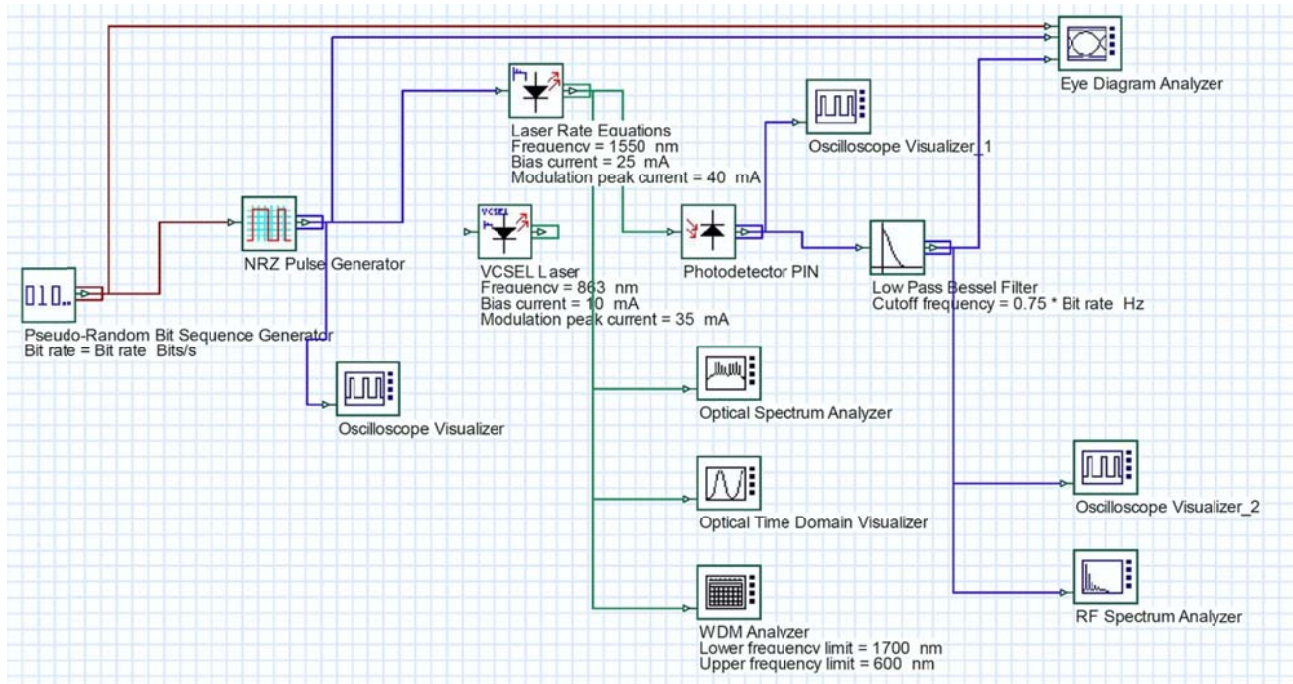


Рисунок 3.4 — Топология для исследования прямой модуляции полупроводникового лазера

Таблица 3.4 — Типовые настройки VCSEL, работающих на длинах волн 683, 863 нм

Параметр	Рабочая длина волны, нм	
	683	863
Тепловое полное сопротивление, К·Вт ⁻¹ (<i>Thermal impedance</i>)	9800	2600
Тепловая постоянная времени, с (<i>Thermal time constant</i>)	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶
Масштабный фактор (<i>Scaling factor</i>)	2,6·10 ⁻⁸	2,6·10 ⁻⁸
Плотность зарядов в излучающем раскрыве, см ⁻³ (<i>Carrier density at transparency</i>)	16540000	19400000
Коэффициент усиления, с ⁻¹ (<i>Gain coefficient</i>)	16000	16000
Время жизни носителей заряда τ_s , с (<i>Carrier lifetime</i>)	5·10 ⁻⁹	5·10 ⁻⁹
Время жизни фотонов τ_p , с (<i>Photon lifetime</i>)	2,064·10 ⁻¹²	2,28·10 ⁻¹²
Фактор спонтанного излучения (<i>Spontaneous emission factor</i>)	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶
КПД накачки (<i>Injection efficiency</i>)	1	1
Максимальный входной ток, мА	5	40

Для проведения исследований характеристик *VCSEL*, работающего на длине волны 1550 нм, его настройки задаются согласно данным, показанных в табл. 3.5.

Таблица 3.5 — Типовые настройки *VCSEL*, работающего на длине волны 1550 нм

Параметр	Значение
Преобразуемые параметры (<i>Reduce parameters</i>)	Неактивен
Температурные эффекты (<i>Thermal effects</i>)	Неактивен
Максимальный ток смещения, мА (<i>Bias current</i>)	38
Максимальный моделирующий ток, мА (<i>Modulation peak current</i>)	28
Объем активного слоя, см ³ (<i>Active layer volume</i>)	$1,5 \cdot 10^{-11}$
Групповая скорость, см/с (<i>Group velocity</i>)	8500000000
Квантовый КПД (<i>Quantum efficiency</i>)	0,4
Коэффициент дифференциального усиления (<i>Differential gain coefficient</i>)	$2,5 \cdot 10^{-16}$
Плотность зарядов в излучающем раскрыве, см ⁻³ (<i>Carrier density at transparency</i>)	10^{18}
Коэффициент удержания моды (<i>Mode confinement factor</i>)	0,4
Время жизни носителей заряда τ_s , с (<i>Carrier lifetime</i>)	$1 \cdot 10^{-9}$
Время жизни фотонов τ_p , с (<i>Photon lifetime</i>)	$3 \cdot 10^{-12}$
Фактор спонтанного излучения (<i>Spontaneous emission factor</i>)	$3 \cdot 10^{-5}$
Коэффициент амплитудных искажений (<i>Gain compression coefficient</i>)	10^{-17}
Коэффициент уширения спектральной линии (<i>Linewidth enhancement factor</i>)	5
КПД накачки (<i>Injection efficiency</i>)	1

В лабораторной работе исследуются лазерные диоды, работающие в режиме прямой модуляции цифровым сигналом. Для его формирования используется «NRZ-генератор».

Принцип формирования цифрового сигнала из аналогового с применением *NRZ*-кода поясняется на рис. 3.5.

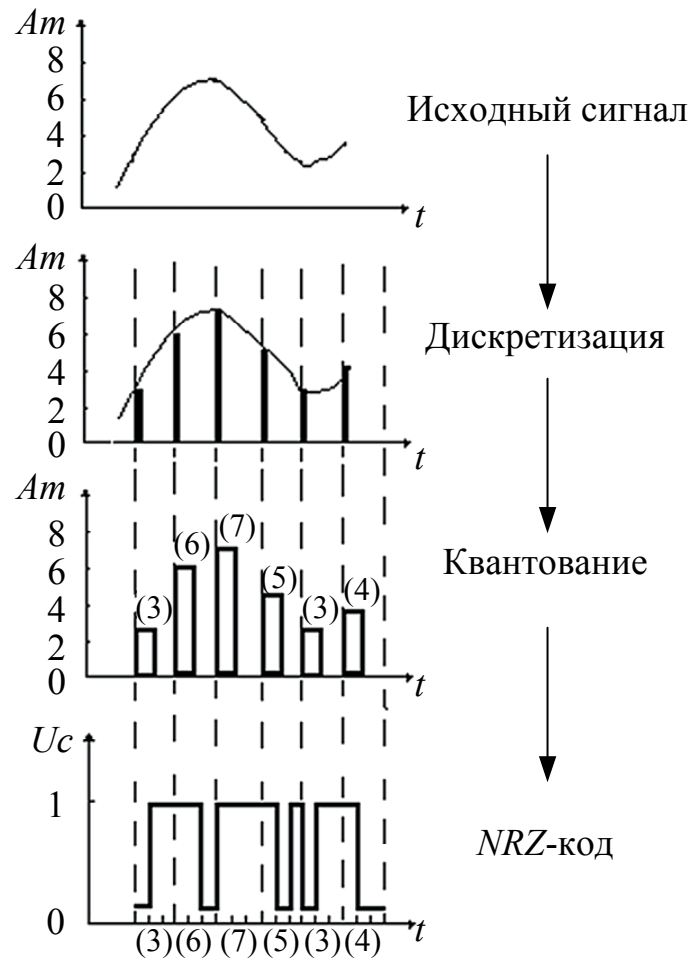


Рисунок 3.5 — Порядок формирования цифрового сигнала из аналогового

Выбор кода передачи является связанным со многими причинами, которые объединены в систему критериев такого выбора:

- код передачи должен отображать любую двоичную последовательность (другими словами, используемый код должен реализовать любую комбинацию из нулей и единиц);

- спектр используемого кода должен быть уже максимально возможного спектра в волокне;

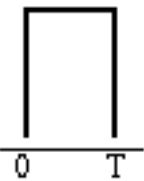
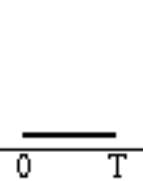
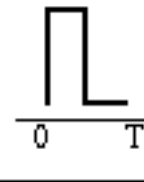
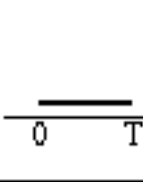
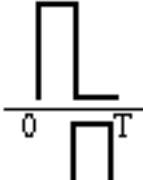
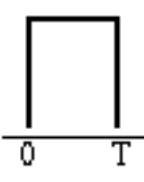
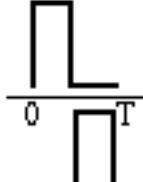
- необходимо, чтобы в спектре сигнала можно было выделить синхроимпульс (идеально, если в спектре имеется отдельная линия, содержащая гармонику частоты синхронизации);

- код должен быть легко реализуем аппаратно, т.е. устройства кодирования декодирования должны быть достаточно простыми конструктивно;

- код (если он не предназначен для минимизации ошибок) должен иметь минимальную информационную избыточность.

В табл. 3.6 приведены практические коды.

Таблица 3.6 — Определение используемых кодов

Код	Определение	Импульсы (1), (0)	
Без возврата к нулю. <i>NRZ</i> -код	«1»: уровень 1 на всем интервале. «0»: уровень 0 на всем интервале.	«1» 	«0» 
С воз- враще- нием к нулю. <i>RZ</i> -код	«1»: уровень 1 на первой половине интервала. «0»: уровень 0 на всем интервале.		
Манчес- терский 1. <i>MAN-1</i> - код	«1»: попеременно уровни 1 или 0 на всем интервале. «0»: переход на середине интервала.		
Манчес- терский 2. <i>MAN-2</i> - код	«1»: аналогично <i>MAN-1</i> . «0»: попеременно уровни 1 на первой и второй половине интервала.		

Одной из ключевых характеристик волоконно-оптической системы является ее «Глаз-диаграмма», которая является одним из наиболее простых и доступных методов контроля качества передачи информации.

Глаз-диаграмма строится на основе анализа сигнала на выходе приемного устройства ВОЛС и представляет собой изображение колебаний сигнала на входе решающего устройства, полученное на экране осциллографа. Период развертки выбирается равным тактовому интервалу. Иногда он составляет несколько тактовых интервалов. Поскольку на вход фотоприемного устройства (ФПУ) поступают самые разнообразные комбинации символов, изображение состоит из большого числа линий. На рис. 3.6 показан возможный вид глаз-диаграммы двухуровневого сигнала.

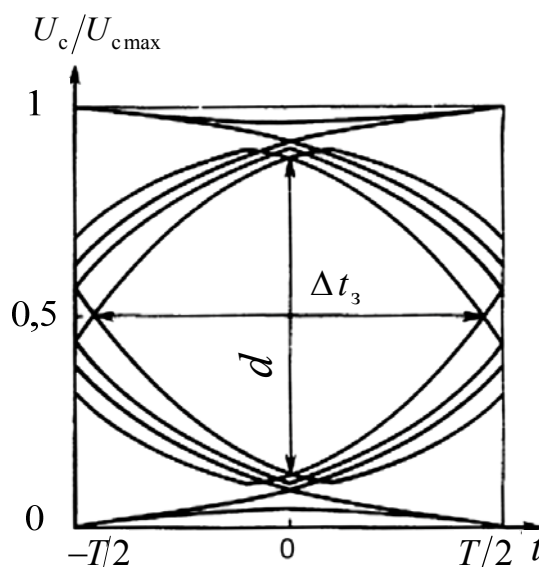


Рисунок 3.6 — Пример глаз-диаграммы двухуровневого сигнала

По оси ординат отложено относительное напряжение сигнала на входе решающего устройства. Таким образом, 0 и 1 на оси ординат соответствуют максимальному уровню сигнала при поступлении посылки (единицы) и минимальному уровню сигнала при поступлении паузы (нуля).

Буквой d обозначен относительный раскрыт глаз-диаграммы. Величина d показывает максимальное уменьшение размаха сигнала вследствие межсимвольной интерференции: $0 \leq d \leq 1$. В отсутствие последней $d = 1$, и минимальная вероятность ошибки будет достигаться, если отсчет произойдет в момент $t_0 = 0$, при максимальном сигнале. Ширина зрчка глаз-диаграммы Δt_s характеризует требования к стабильности синхронизации системы передачи данных. Чем меньше Δt_s , тем выше требования к синхронизации.

3.4. Порядок выполнения работы

3.4.1. Теоретическое исследование характеристик РОС-лазера.

3.4.1.1. Собрать схему, показанную на рис. 3.4.

Примечание. **Место размещения элементов схемы в библиотеке:**

— *Pseudo-Random Bit Sequence Generator* — папка *Transmitters Library / Bit Sequence Generators*;

— *NRZ Pulse Generator* — папка *Transmitters Library / Pulse Generators / Electrical*;

— Лазерные источники — папка *Transmitters Library / Optical Sources*;

— *Photodetector PIN* — папка *Receivers Library / Photodetectors*;

— *Low Pass Bessel Filter* — папка *Filters Library / Electrical*.

3.4.1.2. Задать *Bit rate* с учетом данных табл. 3.1. Общие для всех параметры: *Sequence length* = 128 bits; *Samples per bit* = 256.

3.4.1.3. Задать из табл. 3.1 в настройках лазерного источника параметры «*Bias current*» (I_{BI}) и «*Modulation peak current*» (I_{peak}).

3.4.1.4. Просмотреть и сохранить временные, частотные и индикаторную (*Eye*) диаграммы. Записать уровни мощности полезного сигнала и шума.

Для сохранения графиков показаний измерительных приборов использовать всплывающее меню окна графика, расположенное в левом верхнем углу окна графиков (синяя иконка), в котором выбрать команду «Print to Bmp File»).

3.4.1.3. Задать из табл. 3.1 в настройках лазерного источника максимальный «Bias current» (I_{B2}) и повторить пп. 3.4.1.4.

3.4.2. Теоретическое исследование характеристик лазера с вертикальным резонатором.

3.4.2.1. Собрать топологию схемы, показанной на рис. 3.4, установив в ней VCSEL лазер.

3.4.2.2. Задать *Bit rate* с учетом данных табл. 3.2. Общие для всех параметры: *Sequence length* = 32 bits; *Samples per bit* = 128.

3.4.2.3. Задать в настройках лазера температуру 20 °C.

3.4.2.4. Выбрать рабочую частоту лазера по табл. 3.2 и настроить параметры лазера согласно табл. 3.4 или 3.5.

3.4.2.5. Задать «Modulation peak current» (I_{peak}) в пределах 25 — 40 мА.

3.4.3.6. Для «WDM Analyzer» правой кнопкой мыши вызвать контекстное меню, выбрать в нем «Component Properties» и в открывшемся окне настроек задать «Lower frequency limit» = 1700 нм и «Upper frequency limit» = 600 нм.

3.4.2.6. Изменяя «Bias current» в пределах 1 — 40 мА, в ходе моделирования определить по индикаторной (Eye) диаграмме наилучший режим работы лазера.

3.4.2.7. Просмотреть и сохранить временные, частотные и индикаторную (Eye) диаграммы (с помощью команды «Print to Bmp File»). Записать уровни мощности полезного сигнала и шума для данного случая.

3.4.2.8. Изменяя *Bit rate* от величины, заданной в табл. 3.2 до 10 Гбит/с, измерять и записывать в таблицу уровни мощности полезного сигнала и шума, снимая показания с прибора «WDM Analyzer».

Произвести не менее 10 измерений. Следует сохранить временные осциллограммы оптического сигнала для трех точек диапазона изменения параметра *Bit rate* (минимальный, средний и максимальный).

3.5. Обработка результатов измерений

3.5.1. Привести рисунки со схемами, выполненными для проведения исследований.

3.5.2. По результатам выполнения пп. 3.4.1. привести измеренные величины, осциллограммы сигналов и спектры сигналов.

3.5.3. По результатам выполнения пп. 3.4.2. привести осциллограммы сигналов и спектры сигналов, а также зависимость отношения сигнал/шум в зависимости от *Bit rate*.

3.5.4. Сделать выводы по работе.

3.6. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

3.6.1. Поясните принцип работы гомогенного лазера.

3.6.2. Что конструктивно представляет собой гетерогенный лазер?

3.6.3. Поясните, как выглядит ватт-амперная характеристика лазерного диода и какое значение имеет пороговый ток накачки.

3.6.4. На основании ватт-амперной характеристики лазерного диода поясните отличие в режимах работы лазера в аналоговой и цифровой волоконно-оптических системах передачи.

3.6.5. Поясните, что входит в состав конструкции передающего оптического модуля.

3.6.6. Поясните, для чего в передающем оптическом модуле используются элемент Пельтье и вспомогательный фотодетектор.

3.6.7. Поясните, физический смысл частотно-модуляционной характеристики лазерного диода?

3.6.8. Чем отличается спектр излучения лазера с резонатором Фабри-Перро и лазера с распределенной обратной связью?

3.6.9. Опишите структуру и поясните принцип работы лазера с распределенной обратной связью.

3.6.10. Опишите структуру и поясните принцип работы поверхностно-излучающий лазер с вертикальным резонатором.

3.6.11. Сравните характеристики лазерных излучателей и светоизлучающих диодов.

3.6.12. Какими шумовыми характеристиками обладает лазерный излучатель?

3.6.13. Какие нелинейные искажения присутствуют в лазерном излучателе?

3.6.14. Поясните, как реализуется прямая модуляция лазерного диода.

3.6.15. Поясните, какие цифровые коды используются для передачи информации по оптоволоконным линиям.

3.6.16. Поясните назначение глаз-диаграммы.

3.6.17. Поясните, как изменится форма огибающей промоделированного оптического сигнала при увеличении *Bit Rate* управляющего радиочастотного сигнала от 1 до 10 Гбит/с и чем это изменение обусловлено?

3.6.18. Поясните, какими достоинствами и недостатками обладает метод прямой модуляции лазера.

4. Лабораторная работа № 3. Исследование характеристик электрооптического модулятора Маха-Цандера

4.1. Цель работы

Целью работы является исследование принципа работы и основных характеристик электрооптического модулятора (ЭОМ) Маха-Цандера в САПР *OptiSystem*.

4.2. Исходные данные

Исходные данные для выполнения работы представлены в табл. 4.1, 4.2.

Таблица 4.1 — Исходные данные для лабораторной работы

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
<i>Bit rate</i> , Гбум/с	15	10	17	20	14	24	18	22	25	30
λ , нм	1500	1600	1510	1590	1520	1590	1530	1580	1540	1560
P_0 , мВ	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4
<i>Bit sequence</i>	0110011001010101					1010110010100111				

Примечание.

В таблице введены следующие обозначения: N — последняя цифра номера зачётной книжки; *Bit rate* — скорость передачи битов; λ — рабочая длина волн оптического сигнала; P_0 — мощность оптического излучения на выходе лазера; *Bit sequence* — передаваемая последовательность битов.

Таблица 4.2 — Исходные данные для лабораторной работы

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
P_0 мВт	2	3	4	3,5	2,5	2	3	4,5	3,5	4

Примечание.

В таблице введены следующие обозначения: N — последняя цифра номера зачётной книжки; P_0 — оптическая мощность лазерного излучателя.

4.3. Принцип работы и основные характеристики электрооптического амплитудного модулятора Маха-Цандера

Работа ЭОМ Маха-Цандера (ММЦ) основана на квантовой модели электрооптического фазового модулятора с учетом ряда особенностей. Типовая модель электрооптического **фазового модулятора** показан на рис. 4.1, которая включает волновод, образованный диффузией электрооптического материала (обычно *Ti*) в подложку (обычно *LiNbO₃*) на глубину около 5 — 10 мкм, а также систему управляющих электродов,

которые охватывают оптический волновод на участке длиной l вдоль оси распространения оптической волны.

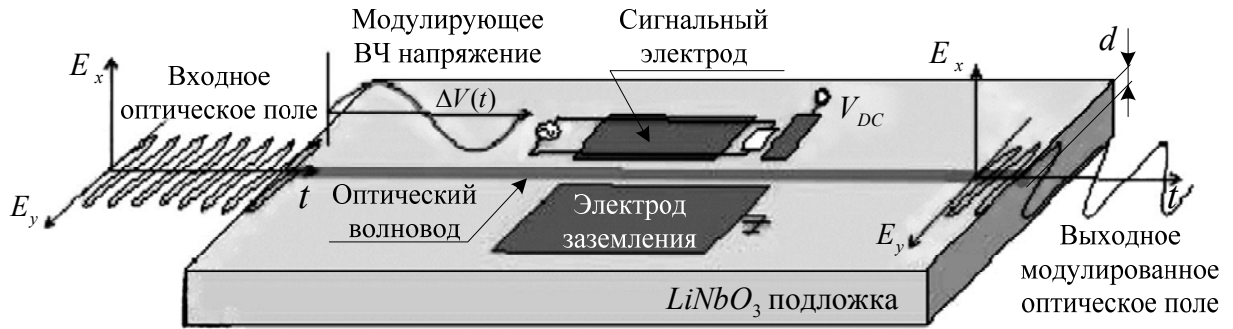


Рисунок 4.1 — Модель электрооптического фазового модулятора

Электроды делятся на две части. Одна часть имеет сосредоточенную структуру и служит для введения в систему постоянного напряжения смещения V_{DC} , другая часть используется как согласованная в нагрузке линия передачи, предназначенная для распространения переменного напряжения с групповой скоростью, максимально близкой к соответствующей скорости оптической волны. Это согласование скоростей особенно важно для обеспечения максимально широкой полосы рабочих частот модулятора.

Под действием приложенного к электродам напряжения статический показатель преломления электрооптического материала изменяется практически по линейному закону

$$n(V) = n_0 + \left(\frac{rn_0^3 V}{2d} \right),$$

где r — электрооптический коэффициент, который для $LiNbO_3$ принимает значения в пределах 5—18 pm/V .

Также желательно обеспечить ориентацию поляризации распространяющейся оптической волны вдоль одной из осей поперечного сечения волновода.

Достоинство данного фазового модулятора: малые вносимые потери 0,1 — 0,2 дБ, по сравнению с конфигурациями, образованными на основе многослойных структур.

Управляющее модулятором радиочастотное напряжение описывается соотношением

$$V(t) = V_{DC} + \Delta V(t).$$

На выходе модулятора волна описывается соотношением

$$\begin{aligned} E_{out}(l, t) &= E_0 \exp(-i\omega_0 t) \exp(i\varphi_B) \exp\left(-i\pi \frac{\Delta V(t)}{V_\pi}\right) = \\ &= E_{in}(0, t) \exp(i\varphi_B) \exp\left(-i\pi \frac{\Delta V(t)}{V_\pi}\right), \end{aligned}$$

где φ_B — постоянный фазовый сдвиг, обусловленный приложенным постоянным напряжением смещения, определяется по формуле

$$\varphi_B = \frac{w_0}{c} \left(n_0 l - \frac{n_0^3}{2} r V_{DC} \frac{l}{d} \right) = kl - \pi \frac{V_{DC}}{V_\pi};$$

$k = \frac{w_0 n_0}{c}$ — волновое число;

$V_\pi = \frac{\lambda_0 d}{n_0^3 r l}$ — **полуволновое напряжение** модулятора, которое определяется

как необходимое V_{DC} для обеспечения фазового сдвига на величину 180° .

Если управляющий сигнал $V(t)$ модулирован по амплитуде, то фазовая модуляция описывается в виде медленно изменяющихся комплексных огибающих

$$\begin{aligned} E_{in}(0, t) &= A_{in}(t) \exp(-i w_0 t); \\ E_{out}(l, t) &= A_{out}(t) \exp(-i w_0 t), \end{aligned}$$

где $A_{out}(t) = A_{in}(t) \exp(i \varphi_B) \exp\left(-i \pi \frac{\Delta V(t)}{V_\pi}\right)$.

Полагая $A_{in}(t) = E_0$ и рассматривая случай амплитудной модуляции в виде

$$\Delta V(t) = V_m \cos(\Omega_0 t + \theta),$$

получим

$$A_{out}(t) = E_0 \exp(i \varphi_B) \exp(-i m \cos(\Omega_0 t + \theta)),$$

где $m = \frac{\pi V_m}{V_\pi}$ — индекс модуляции.

Кроме приведенных общих положений для электрооптического фазового модулятора необходимо учитывать также дисперсию, которая приводит к рассогласованию фаз волн внутри модулятора, что приводит к уменьшению рабочей полосы частот.

На основании данной модели с учетом ряда ее особенностей формируется квантовая модель **электрооптического амплитудного модулятора Маха-Цандера (ЭОММЦ)**, показанная на рис. 4.2.

ЭОММЦ реализуется на основе двух электрооптических фазовых модуляторов, встраиваемых в интерферометрическую установку Маха-Цандера. Наиболее часто используемые формы сборки интерферометра представлены на рис. 4.3. Среди них выделяются схемы с одним внутренним фазовым модулятором (рис. 4.3, б, г, е) — *асимметричные ЭОММЦ* и с двумя модуляторами (рис. 4.3, а, в, д) — *ЭОММЦ с двойным управлением*.

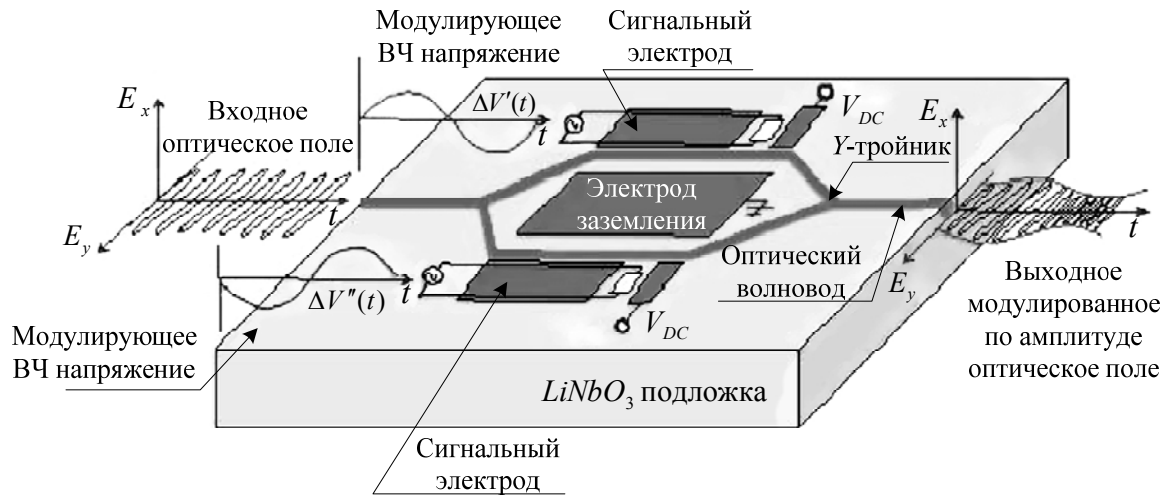


Рисунок 4.2 — Модель электрооптического амплитудного модулятора Маха-Цандера

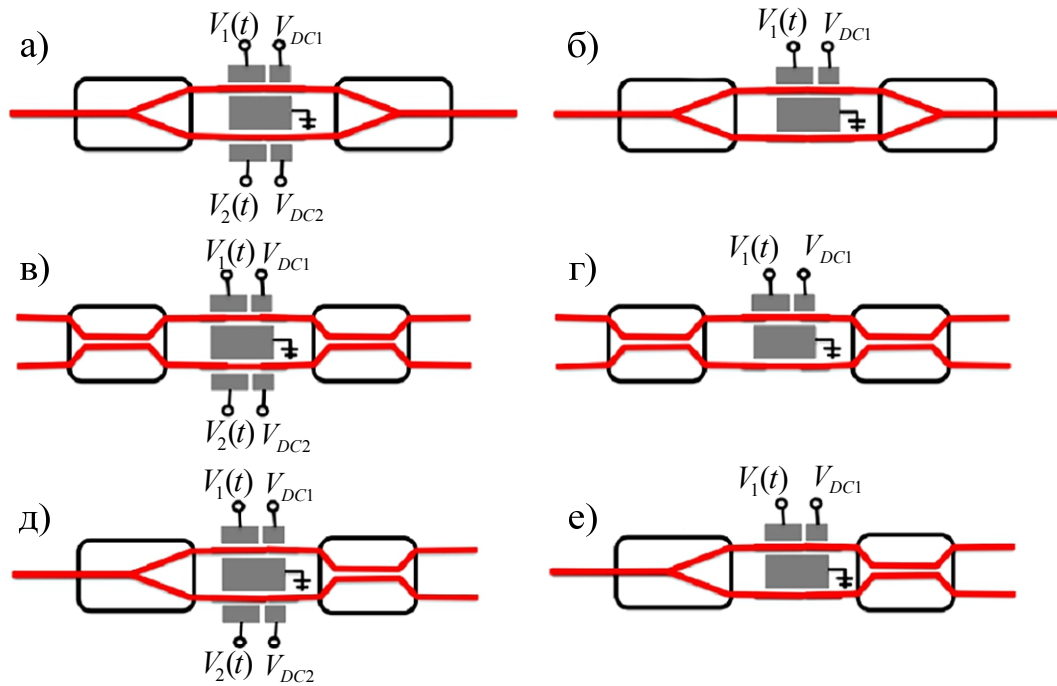


Рисунок 4.3 — Схемы построения ЭОММЦ

В схемах ЭОММЦ на рис. 4.3, а, б входной и выходной лучевые делители образованы Y-тройниками. Данные схемы наиболее часто используются на практике. В схемах ЭОММЦ на рис. 4.3, в, г входной и выходной лучевые делители образованы направленными ответвителями. Эти модуляторы характеризуются наличием дополнительного входного и выходного портов и являются более дорогостоящими, так как изготовление симметричного направленного ответвителя является более сложной задачей, по сравнению с реализацией Y-тройника. Данные схемы на сегодняшний день используются довольно редко. На рис. 4.3, д, е рассмотрены гибридные схемы ЭОММЦ, которые на практике используются главным образом в системах кабельного телевидения.

Зависимость мощности выходного оптического сигнала ЭОММЦ от моделирующего радиочастотного сигнала описывается формулой:

$$P_{out}(t) = P_{in} \frac{1}{2} [1 + \cos(\Phi(t))],$$

где $\Phi(t) = \varphi_B + \frac{\pi V_m \cos(\Omega_0 t + \theta)}{V_\pi}$ — фазовый сдвиг (без учета его знака),

вносимый фазовыми модуляторами в каждом из плеч ЭОММЦ;

φ_B — постоянный фазовый сдвиг, обусловленный приложенным постоянным напряжением смещения.

Результирующее выражение для передаточной функции ЭОММЦ имеет следующий вид

$$T_{\text{ММЦ}}(V) = \frac{1}{2} \left[1 + \cos \left(\varphi_B + \frac{\pi V}{V_\pi} \right) \right].$$

Внешний вид передаточной характеристики ЭОММЦ показан на рис. 4.4.

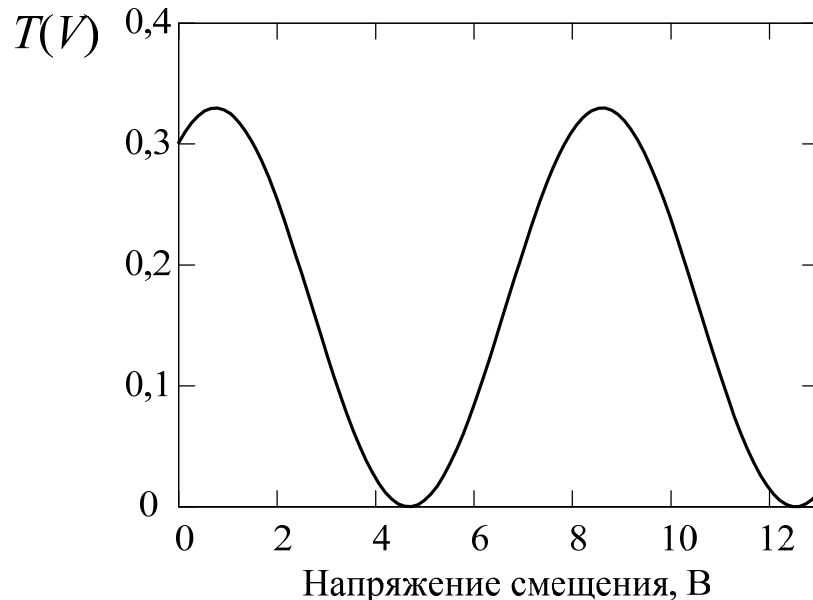


Рисунок 4.4 — Пример передаточной характеристики ЭОММЦ

Показанная на рис. 4.4 передаточная характеристика ЭОММЦ позволяет задать режим работы модулятора. Для этого задается определенное положение рабочей точки на характеристике $T(V)$ модулятора за счет подачи на управляющие электроды такого постоянного напряжения смещения V_{DC} , при котором обеспечивается требуемый начальный сдвиг фазы φ_B в каждом из плеч ЭОММЦ. В большинстве случаев рабочая точка выбирается на середине линейного участка передаточной характеристики модулятора.

При построении канала с внешней модуляцией с применением ЭОММЦ с полным управлением (см. рис. 4.3, а, в, д) необходимо для двух плеч соблюсти условие квадратуры возбуждения, когда

$$V_1(t) = -V_2(t).$$

Нарушение этого условия приводит:

- к уменьшению глубины модуляции;
- к паразитной линейной частотной модуляции на интервале времени нарастания моделированных по интенсивности оптических импульсов;
- к заплыванию нулей передаточной характеристики модулятора.

При одинаковых характеристиках плеч дифференциального модулятора Маха-Цандера величина индекса чирпа (ЛЧМ) определяется выражением:

$$\alpha(t) = \frac{V_1(t) + V_2(t)}{V_1(t) - V_2(t)},$$

где $V_1(t)$ и $V_2(t)$ — мгновенные амплитуды моделирующего напряжения двух плеч модулятора.

Наличие чирпа (ЛЧМ) критично для высокоскоростных ВОСП, так как чирп может привести к ограничению протяженности ВОСП.

Делая выбор между волоконными линиями связи, использующими прямую модуляцию излучения лазера током накачки или внешнюю модуляцию с применением, например, модулятора Маха-Цандера, важно ответить на вопрос, что лучше: непосредственно модулировать применяемый лазер или использовать его как оптический источник для внешнего модулятора? Для ответа на этот вопрос необходимо перечислить основные свойства обоих волоконных каналов.

а) Неустранимые потери в модуляторе приводят к тому, что коэффициент потерь СВЧ сигнала в схеме с внешней модуляцией всегда на 30 дБ выше. Однако, если средняя оптическая мощность P_L , вводимая в модулятор, велика, это приводит к большему усилению в канале с внешней модуляцией.

б) В каналах с внешней модуляцией преобладают тепловые шумы оконечного усилителя и фотодетектора по сравнению с шумами лазерного диода, а отношение сигнал/шум меньше по сравнению с каналами с прямой модуляцией. Это происходит из-за дополнительных оптических потерь в модуляторе и меньшего коэффициента глубины линейной модуляции.

в) Линии с прямой модуляцией работают на частотах ниже резонансной частоты релаксационных колебаний, где велико значение относительной шумовой интенсивности лазера. Основным источником шума в канале с прямой модуляцией, обладающем меньшими оптическими потерями, прямо пропорционален RIN лазера (относительный шум интенсивности излучения лазера, составляет -135 — -150 дБ/Гц в рабочей полосе моделирующих частот лазера) и практически не зависит от уровня вносимых потерь.

г) Когда в канале необходим входной оптический сигнал P_L с высокой мощностью, в волоконных линиях с прямой модуляцией существенно снижается отношение сигнал/шум в связи с увеличивающейся относительной интенсивностью шумов. Однако, для малых значений P_L шумы линии определяются шумами фотодиода и усилителя.

д) Линии с внешней модуляцией могут использовать лазеры на частотах, существенно превышающих их резонансную частоту релаксационных колебаний. В этом случае вклад лазера в общий уровень шумов линии может быть пренебрежимо мал. Если оптические потери в канале с внешней также относительно малы, то шумы линии с внешней модуляцией могут оказаться даже ниже, чем в канале с прямой модуляцией.

Подводя итог под вышеперечисленными свойствами, можно сделать вывод, что, конечно, лучше применять прямую модуляцию лазерного диода, чем использовать оптический источник для внешнего модулятора. Однако, малая нелинейность, высокий динамический диапазон, широкий диапазон моделирующих частот и возможность повышения уровня усиления в канале делают волоконные каналы с внешней модуляцией более предпочтительными для практических задач.

Топология схемы, разработанная для проведения исследования характеристик оптического сигнала при внешней модуляции, реализованной с применением модулятора Маха-Цандера, показан на рис. 4.5.

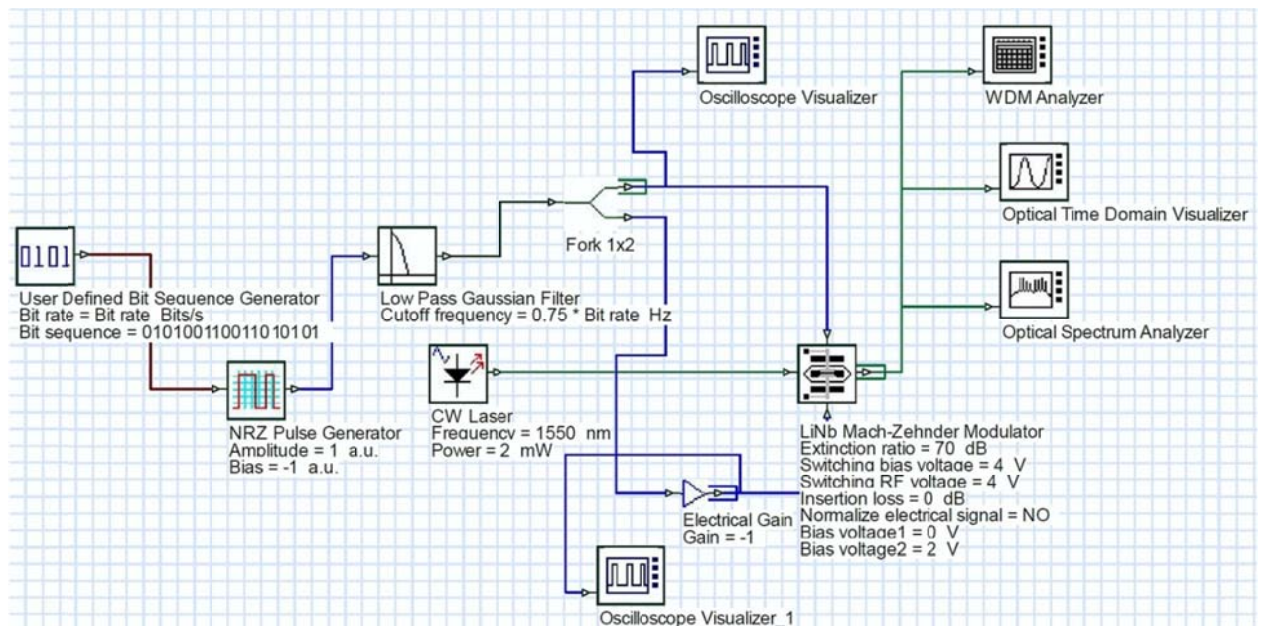


Рисунок 4.5 — Топология схемы для исследования характеристики электрооптического модулятора Маха-Цандера

В современных волоконно-оптических линиях связи широко используется однополосная амплитудная модуляция с передачей или с подавлением несущей частоты, что позволяет уменьшить ширину полосы оптического спектра, выделенную на один оптический канал (при многоволновом уплотнении); это особенно важно при использовании моделирующих частот миллиметрового диапазона частот (более 30 ГГц).

На рис. 4.6 показана топология схемы для исследования режима однополосной модуляции, реализованного на основе двух ЭО ММЦ.

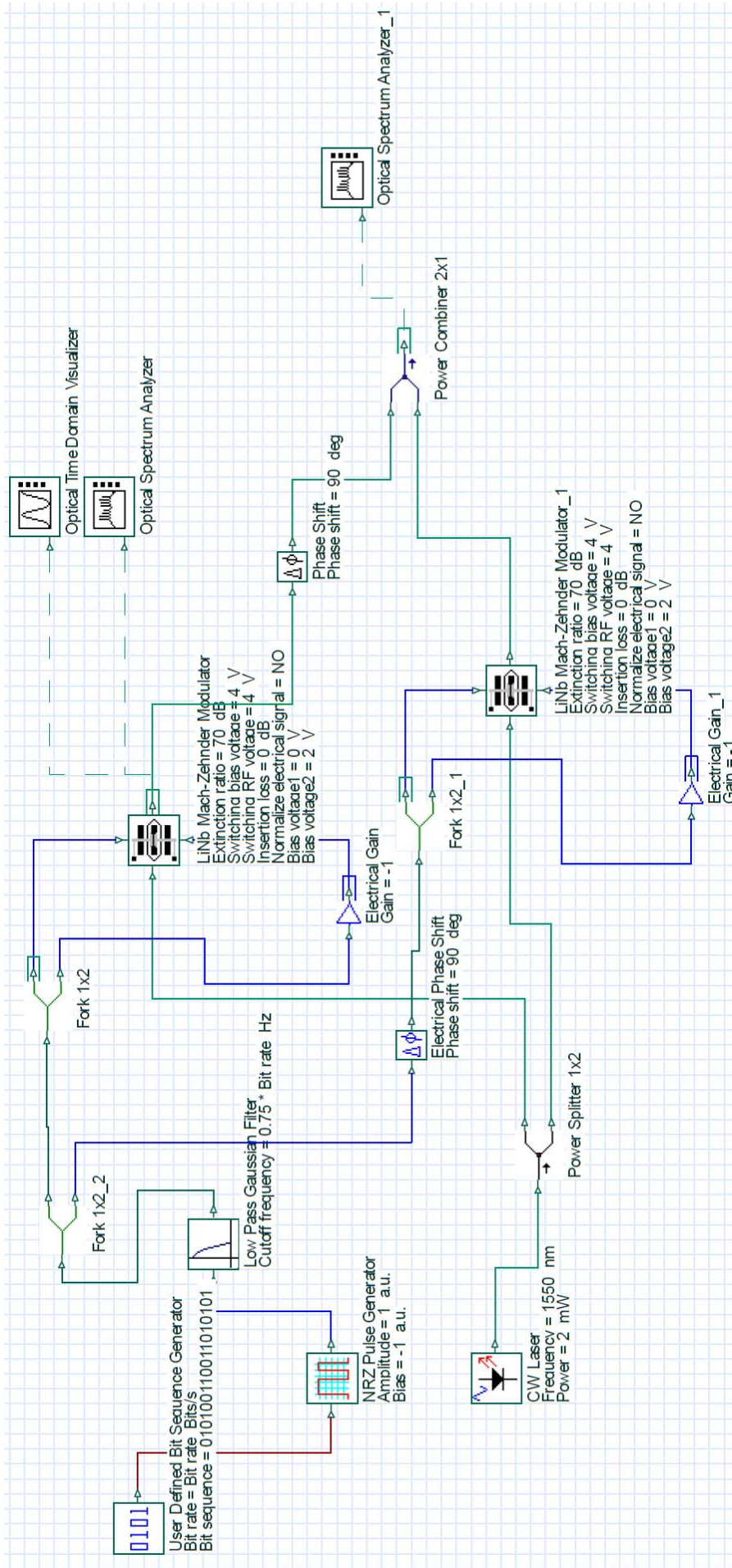


Рисунок 4.6 — Топология схемы для исследования режима однополосной модуляции, реализованного на основе двух ЭО ММЦ

С применением двух-трех внешних модуляторов можно реализовать продвинутые виды модуляции оптического излучения, такие как:

- двубинарная амплитудно-фазовая модуляция (*duobinary AM/PSK modulation*);
- дифференциальная (двухфазная) манипуляция (*DPSK*);
- дифференциальная квадратурная фазовая манипуляция (*DQPSK*).

В данной работе рассматриваются способы реализации двубинарной амплитудно-фазовой модуляции, для чего разработана схема, показанная на рис. 4.6.

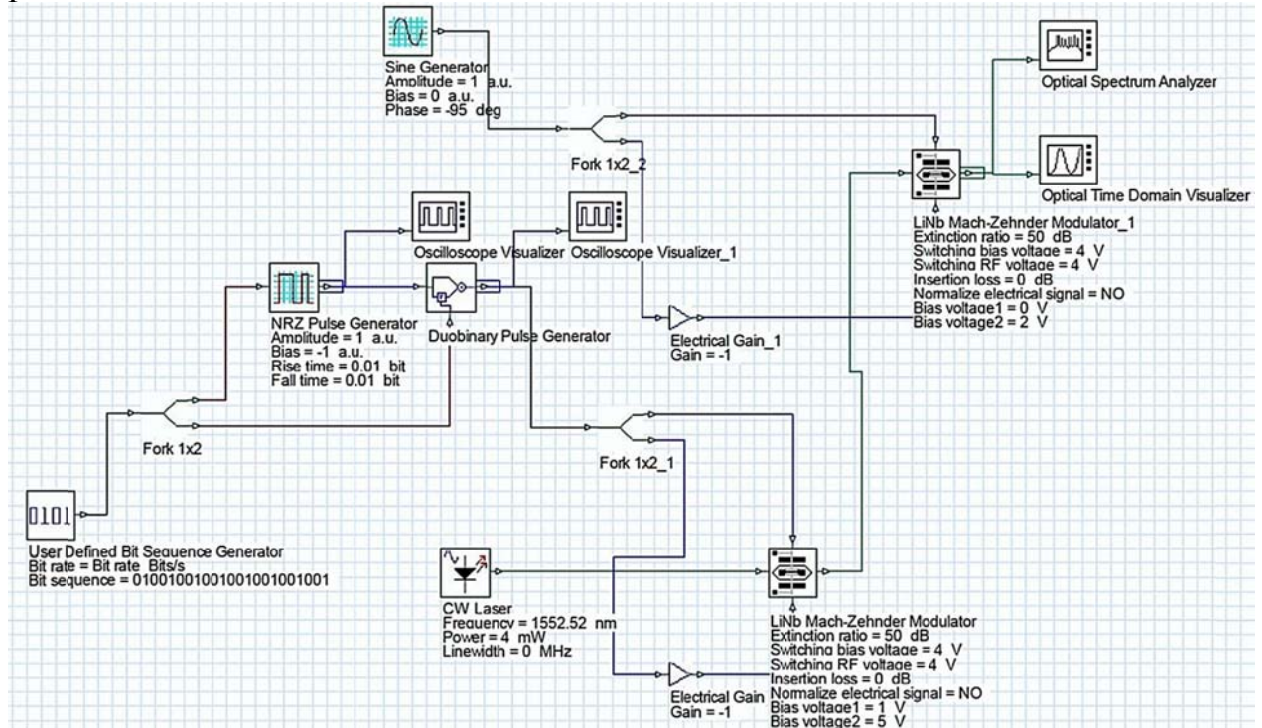


Рисунок 4.6 — Схема для исследования двубинарной амплитудно-фазовой модуляции

4.4. Порядок выполнения работы

4.4.1. Исследование характеристик электрооптического модулятора Маха-Цандера.

4.4.1.1. Собрать схему, показанную на рис. 4.5 и задать параметры лазера и генератора последовательности битов с учетом данных табл. 4.1.

Примечание. Место размещения элементов схемы в библиотеке:

- *Electrical Gain* — папка *Signal Processing Library/Arithmetic/Electrical*;
- *Fork 1x2* — папка *Tools Library*;
- *LiNb Mach-Zehnder Modulator* — папка *Transmitters Library / Optical Modulators*;
- *Duobinary Pulse Generator* — папка *Transmitters Library / Pulse Generators / Electrical*.

4.4.1.2. Задать *Bit rate* с учетом данных табл. 4.1. Общие для всех параметры: *Sequence length* = 32 bits; *Samples per bit* = 32. Для модуля

«Electrical Gain» () задать значение $Gain = -1$. В настройках модулятора отключить опцию «Normalize electrical signal» и задать параметр «Extinction ratio» (коэффициент контрастности модулятора) равным 200 дБ.

4.4.1.3. Для «NPZ Pulse Generator» задать значения: $Amplitude = 1$; $Bias = -1$.

4.4.1.4. Правой кнопкой мыши вызвать контекстное меню на модуле «Optical Time Domain Visualizer» и выбрать пункт «Component Properties». Задать настрой аналогично показанным на рис. 4.7.

4.4.1.5. Выполнить моделирование и сохранить показания измерительных приборов. Для модуля «WDM Analyzer» после двойного клика выбрать вкладку «Details» и записать Общие данные по уровню сигнала, шума и отношения сигнал/шум на выходе модулятора.

Graphs Downsampling Enhanced Simulation Random num...				
Disp	Name	Value	Units	Mode
☐	Plot individual mode	☐		Normal
☐	Individual mode number	0		Normal
☐	Time unit	s		Normal
☐	Reference bit rate	Bit rate	5 Bits/s	Script
☐	Autocorrelation	Off		Normal
☐	Calculate phase and chirp	☒		Normal
☐	Phase unit	deg		Normal
☐	Unwrap phase	☒		Normal
☐	Calculate alpha parameter	☐		Normal
☐	Power unit	W		Normal
☐	Minimum value	-100	dBm	Normal
☐	Limit number of points	☒		Normal
☐	Max. number of points	128000		Normal
☐	Invert colors	☐		Normal
☐	Enable color grade	☐		Normal
☐	Number of color bins	500		Normal
☐	Color grade palette	Default		Normal

Рисунок 4.7 — Настройки модуля «Optical Time Domain Visualizer»

4.4.1.6. Правой кнопкой мыши вызвать контекстное меню на модуле «Optical Time Domain Visualizer» и выбрать пункт «Component View». В открывшемся окне перейти во вкладку «2D Graphs» слева от окна графиков расположены две группы раскрывающихся меню опций: «Left Display» и «Right Display». В группе «Left Display» поставить галочку напротив «Signal Power». В группе «Right Display» поставить галочку напротив «Signal Chirp X». Сохранить полученные графики (с помощью команды «Print to Bmp File» из всплывающего меню окна графиков).

4.4.1.7. Для «NPZ Pulse Generator» задать значения: $Amplitude = 1,5$; $Bias = -1,5$. Для модуля «Electrical Gain» задать значение $Gain = -0,333$.

4.4.1.8. Повторить операции в пп. 4.4.1.5 и 4.4.1.6.

4.4.2. Исследование методики реализации однополосной модуляции на основе двух ЭО ММЦ

4.4.2.1. Собрать схему, показанную на рис. 4.6.

Примечание. **Место размещения элементов схемы в библиотеке:**

Electrical Phase Shift — папка *Passive Library / Electrical*;

Phase Shift — папка *Passive Library / Optical*.

4.4.2.2. Задать параметры проекта согласно пп. 4.4.1.2. Задать параметры «NPZ Pulse Generator» согласно пп. 4.4.1.3. Задать параметры лазера и генератора последовательности битов с учетом данных табл. 4.1.

4.4.2.3. Выполнить моделирование и сохранить показания измерительных приборов.

4.4.3. Исследование методики реализации двубинарной амплитудно-фазовой модуляции оптического сигнала.

4.4.3.1. Собрать схему, показанную на рис. 4.5 и задать параметры лазера и генератора последовательности битов с учетом данных табл. 4.1.

4.4.3.2. Задать *Bit rate* с учетом данных табл. 4.1. Общие для всех параметры: *Sequence length* = 16 bits; *Samples per bit* = 128.

4.4.3.3. Задать параметры для «NPZ Pulse Generator», модуляторов Маха-Цандера согласно данным, приведенным на рис. 4.6.

4.4.3.4. В настройках лазера задать длину волны согласно данным табл. 4.1. Мощность лазера задать согласно данным табл. 4.2.

4.4.3.5. В настройках генератора синусоидального сигнала частоту задать равной величине «*Bit rate*» согласно данным табл. 4.1.

4.4.3.6. Правой кнопкой мыши вызвать контекстное меню на модуле «*Optical Time Domain Visualizer*» и выбрать пункт «*Component View*». В открывшемся окне перейти во вкладку «*2D Graphs*». В группе «*Left Display*» поставить галочку напротив «*Signal Power*». В группе «*Right Display*» поставить галочку напротив «*Signal Phase X*». Сохранить полученные графики (с помощью команды «*Print to Bmp File*»), которые должны быть аналогичны показанным на рис. 4.8.

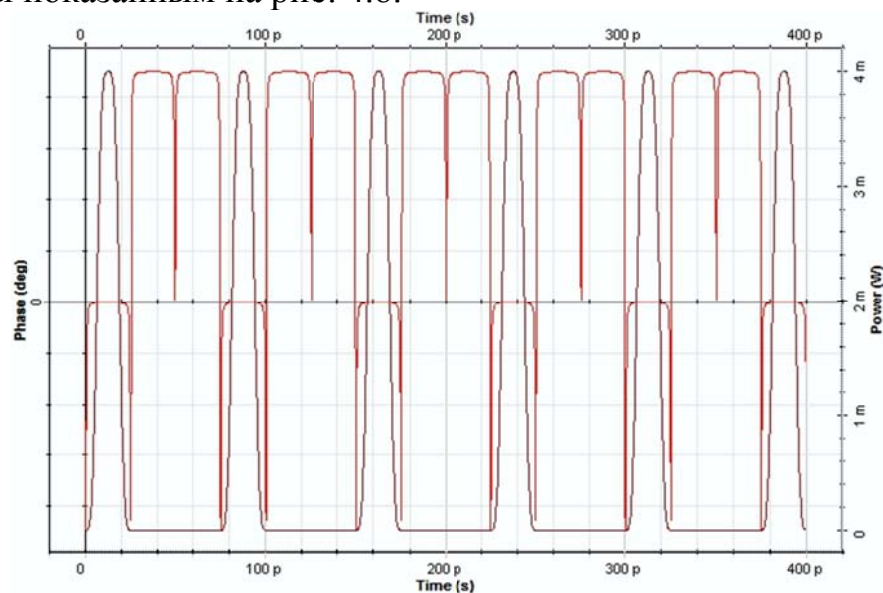


Рисунок 4.8 — Пример двубинарной амплитудно-фазовой модуляции

4.4.3.8. Сохранить изображение спектра оптического сигнала на модуле «*Optical Spectrum Analyzer*» (с помощью команды «*Print to Bmp File*»).

4.5. Обработка результатов измерений

4.5.1. Привести рисунки со схемами, выполненными для проведения исследований.

4.5.2. По результатам выполнения пп. 4.4.1. привести результаты измерений, осциллограммы сигналов и спектры сигналов.

4.5.3. По результатам выполнения пп. 4.4.2. привести осциллограмму сигнала и спектры сигналов.

4.5.4. По результатам выполнения пп. 4.4.3. привести осциллограммы сигналов и спектры сигналов.

4.5.5. Сделать выводы по работе.

4.6. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

4.6.1. Поясните отличие в методике реализации прямой и внешней модуляции оптического сигнала.

4.6.2. Поясните принцип работы электрооптического модулятора Маха-Цандера.

4.6.3. Поясните, какие варианты конструкции электрооптического модулятора Маха-Цандера применяются на практике.

4.6.4. Поясните, из каких соображений выбирается постоянное напряжение смещения, подаваемое на электроды электрооптического модулятора Маха-Цандера?

4.6.5. Сформулируйте определение для полуволнового напряжения модулятора.

4.6.6. Поясните, что собой представляет передаточная характеристика электрооптического модулятора и для чего она нужна.

4.6.7. Как влияет отличие по амплитуде радиосигналов в двух плечах электрооптического модулятора Маха-Цандера на его характеристики?

4.6.8. Какие виды модуляции можно реализовать с применением от одного до трех модуляторов Маха-Цандера?

4.6.9. Поясните методику реализации двубинарной амплитудно-фазовой внешней модуляции.

4.6.10. В чем преимущества внешней модуляции сравнительно с прямой модуляцией?

4.6.11. В чем преимущества прямой модуляции сравнительно с внешней модуляцией?

4.6.12. Поясните, прямая или внешняя модуляции позволяют обеспечивать более высокую скорость передачи информации?

5. Лабораторная работа № 4. Исследование характеристик эрбиевого волоконного усилителя

5.1. Цель работы

Целью работы является исследование характеристик эрбиевого волоконного усилителя (ЭВУ) в САПР *OptiSystem*.

5.2. Исходные данные

Исходные данные для выполнения работы представлены в табл. 5.1, 5.2.

Таблица 5.1. — Характеристики легированного эрбием оптоволокна

Обозначение оптоволокна	Легированный Er оптический кабель	Концентрация ионов Er, м^{-3}	Длина волны накачки, нм	Числовая апертура	Диаметр сердцевины, мкм	Ослабление на 980 нм, дБ/м	Ослабление на 1550 нм, дБ/м
OK1	EDFC-980-HP	$3 \cdot 10^{24}$	980	0,23	3,2	0,015	0,01
OK2	EDFL-1480-HP	$5 \cdot 10^{24}$	1480	0,25	4,5	15	0,01
OK3	EDFL-980-HP-80	$4 \cdot 10^{24}$	980	0,25	2,8	0,015	0,01
OK4	SM-ESF-7/125	$10 \cdot 10^{24}$	1480	0,15	7	18	0,01
OK4	SM-ESF-3/125	$8 \cdot 10^{24}$	980	0,28	3	0,015	0,01

Таблица 5.2 — Исходные данные для лабораторной работы

M	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
P_{pump} , Вт	0,5	0,75	1	0,75	0,5	0,5	0,75	1	0,75	0,5
λ_0 , нм	1530	1535	1540	1545	1550	1555	1535	1540	1545	1550
N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Тип оптоволокна ЭВУ	OK1	OK2	OK3	OK4	OK5	OK1	OK2	OK3	OK4	OK5
P_{in} , дБм	10	12	13	15	17	10	12	13	15	17
$L_{\text{ЭОК0}}$, м	5	6	5	6	5	6	5	6	5	6

Примечание:

В таблице введены следующие обозначения: M , N — предпоследняя и последняя цифры номера зачётной книжки, соответственно; λ_0 — длина волны излучения сигнального лазера; P_{pump} — мощность лазера накачки; L_{total} — общая длина волоконнооптической линии; ЭВУ — эрбиевый волоконный усилитель; P_{in} — мощность каждого из лазеров во входной матрице; $L_{\text{ЭОК0}}$ — начальная длина легированного эрбием оптоволокна.

5.3. Особенности построения и основные характеристик эрбиевого волоконного усилителя

5.3.1. Области применения и основные свойства эрбиевого волоконного усилителя

В оптических сетях большое распространение получили квантовые оптические усилители *EDFA* (*Erbium-Doped Fiber Amplifier* — оптический усилитель легированный эрбием). Длины волн усиливаемых простыми *EDFA* оптических сигналов лежат в диапазоне от 1525 нм до 1565 нм, что идеально подходит для усиления мощности излучения в «С-диапазоне» *DWDM* (плотное многоволновое уплотнение) систем. Для усиления сигналов из «L-диапазона» используются *LWEDFA* (*Long Wavelength EDFA*: длинноволновые *EDFA*), работающие в диапазоне от 1570 нм до 1605 нм. Использование усилителей *EDFA* для увеличения мощности сигнала в системах *DWDM* (системы с многоволновым уплотнением) позволило конструктивно упростить эти системы и снизить общую стоимость комплекса оборудования *DWDM*.

EDFA не имеют зависимости от используемых для передачи данных протоколов, скорости передачи данных. Эта особенность *EDFA* является еще важным аргументом в пользу их использования в *DWDM* системах, в которых зачастую совмещается множество разнородных каналов. Так же *EDFA* не зависят от типа сигнала, будь он дискретный цифровой или аналоговый. Поэтому усилители *EDFA* нашли применение и в сетях кабельного телевидения, в которых, в силу специфики, повышенные требования к мощности сигнала и его качеству (например, отношению сигнал/шум). Широкое применение эрбиевые волоконные усилители получили также в пассивных оптических сетях (*PON*) с большим числом абонентов, со сложной структурой делителей и огромными потерями.

Основные свойства эрбиевых волоконных усилителей:

- возможность одновременного усиления сигналов с различными длинами волн;
- непосредственное усиление оптических сигналов, без их преобразования в электрические сигналы и обратно;
- практически точное соответствие рабочего диапазона эрбиевых усилителей области минимальных оптических потерь световодов на основе кварцевого стекла, легированного германием;
- низкий уровень шума и простота включения в волоконно-оптическую систему передачи данных.

В зависимости от применения оптические усилители классифицируют следующим образом:

- предварительный усилитель, включаемый в линию перед оптическим приемником для увеличения отношения мощности полезного сигнала к шуму (обладает низким уровнем вносимого шума);
- линейный усилитель включают на выходе участка оптического волокна для компенсации потерь мощности, вносимых волокном;

— усилитель мощности «бустер» — используется для увеличения мощности источника оптических сигналов, передаваемых в линию; устанавливается после оптического передатчика.

5.3.2. Принцип работы эрбиевого волоконного усилителя

Принцип работы оптических эрбиевого волоконного усилителя (ЭВУ) основан на квантовом явлении усиления света в отрезке волокна, легированного эрбием, при вынужденном излучении. Это тоже самое явление, которое обеспечивает возникновение генерации излучения в лазерах.

ЭВУ — это отрезок оптоволокна длиной в несколько метров, легированный в больших концентрациях ионами эрбия *Er* (а также дополнительно легированный *Al* и *Ge*). Ионы *Er* возбуждаются несколькими определенными длинами волн: 514, 532, 667, 800, 980 и 1480 нм. Самая короткая, 514 нм, возбуждает ион эрбия на самый высокий возможный уровень энергии. С этого уровня он может опуститься на один из четырех промежуточных метастабильных уровней с испусканием фононов. С низшего метастабильного уровня он переходит в основное состояние, излучая фотоны на длине волны около 1550 нм. Похожие процессы происходят и при других указанных длинах волн, только число метастабильных уровней уменьшается с ростом длины волны. Так, излучение с длиной волны 1480 нм возбуждает ион на низший метастабильный уровень. С метастабильного уровня он переходит в основное состояние со средней задержкой около 10 мс, излучая фотоны на длине волны около 1550 нм. На рис. 5.1. показаны три основных энергетических уровня эрбия (нижний — основной, верхний — короткоживущий (около 1 мкс) и промежуточный — метастабильный (около 10 мс)), а также процессы переходов между ними.

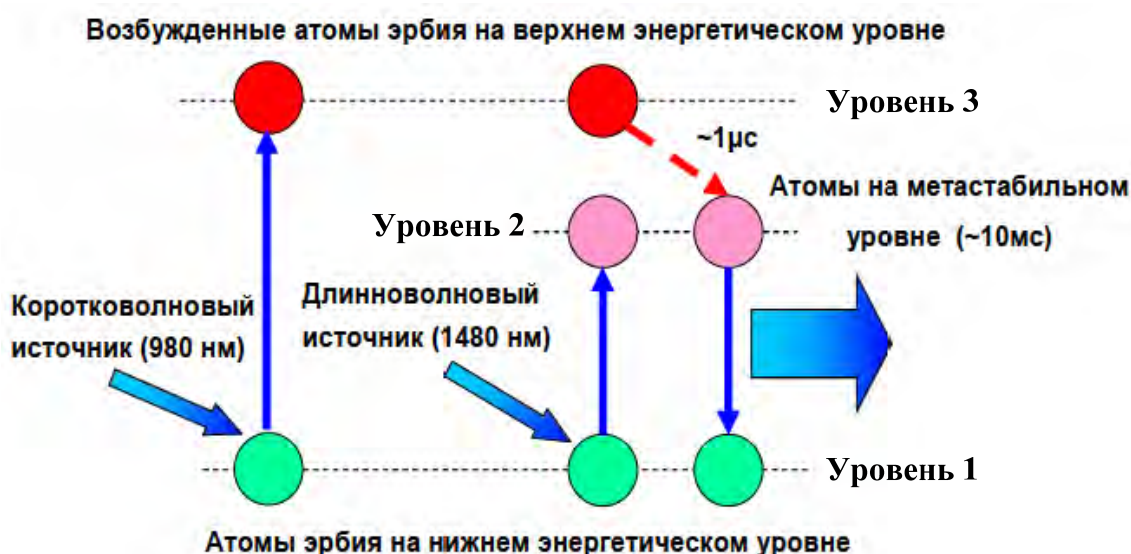


Рисунок 5.1 — Упрощенные схемы возбуждения ионов эрбия и их переходов в основное состояние с излучением

Две основные длины волны накачки — 980 и 1480 нм. Распространяясь по волокну, легированному эрбием, излучение накачки переводит ионы эрбия в возбужденное состояние, создавая активную среду для усиления или спонтанного излучения с испусканием фотонов в диапазоне 1520 — 1620 нм. Если идет слабый сигнал на длине волны в области 1520 — 1620 нм, то происходит «сталкивание» фотонов с метастабильного уровня и усиление сигнала за счет вынужденного излучения.

Усилители, которые работают в области 1525 — 1565 нм, называются «усилителями *C*-диапазона», а усилители, работающие в диапазоне 1568 — 1620 нм — «усилителями *L*-диапазона».

Когда *EDFA* накачивается на длине волны 980 нм, то примерно через 1 мкс возбужденные ионы переходят на метастабильный уровень, на котором они могут находиться до 10 мс, пока через усилитель не пройдет сигнал, после чего ионы переходят в основное состояние, испуская свет с той же длиной волны, что и проходящий сигнал. Если за 10 мс через накачанный усилитель не пройдет сигнал, то ионы эрбия спонтанно перейдут в основное состояние, испуская свет с длиной волны порядка 1550 нм. В коммуникациях эффективная скорость передачи информации очень высока (Гбит/с), а время передачи единицы информации очень мало (пс) по сравнению с временами жизни метастабильных уровней (мс), поэтому межсимвольной интерференции не происходит. Тем не менее, спонтанное излучение усиливает общий шум.

Не все ионы эрбия находятся в метастабильном состоянии и обеспечивают усиление. Часть ионов находится на уровне 1 (см. рис 5.1), и эти ионы, взаимодействуя с генерируемыми фотонами, энергия которых совпадает с энергией перехода, эффективно их поглощают, переходя на уровень 2. При этом спектр усиления ионов эрбия практически совпадает со спектром поглощения (рис. 5.2). Если количество ионов, находящихся на уровне 2, меньше числа ионов, находящихся на основном уровне 1, то наблюдается поглощение.

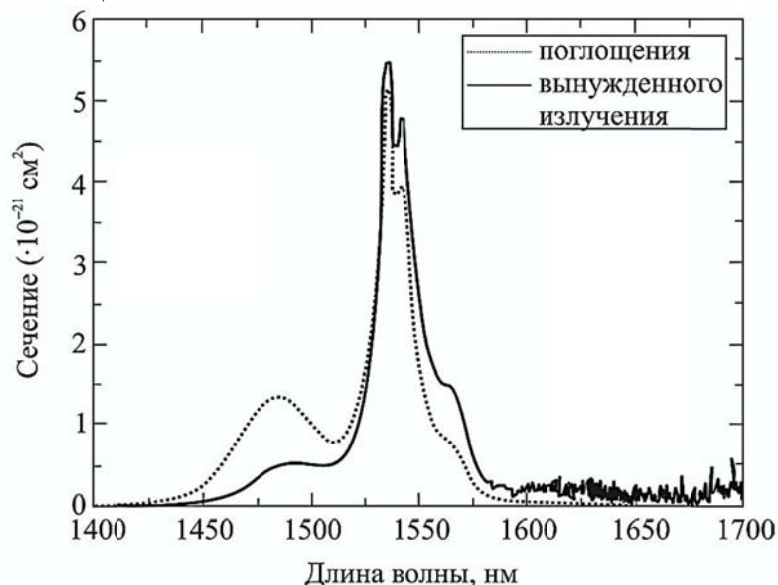


Рисунок 5.2 — Спектры поглощения и излучения эрбия в области 1500 нм

Именно поэтому необходимым условием усиления света является создание инверсии населенностей между двумя рабочими уровнями энергии 2 и 1. Для создания инверсии населенностей в эрбиевом усилителе необходимо перевести примерно половину ионов эрбия на метастабильный уровень 2. Мощность накачки оптического усилителя, при которой населенности уровней 1 и 2 равны, называется пороговой мощностью.

При мощности накачки ниже пороговой наблюдается не усиление, а поглощение светового сигнала. На рис. 5.3 представлены спектры поглощения-усиления при различных значениях относительной населенности уровня 2, определяемой уровнем мощности накачки. Нижняя кривая, наблюдающаяся в отсутствие накачки (все частицы находятся в основном состоянии, населенность уровня 2 равна 0 %), соответствует «отрицательному усилению», т.е. поглощению во всем рабочем спектральном диапазоне. По мере увеличения мощности накачки все большее число активных ионов переходит в возбужденное состояние. Это приводит, как видно по рис. 5.3, сначала к уменьшению коэффициента поглощения (так называемое просветление), а затем к усилению света.

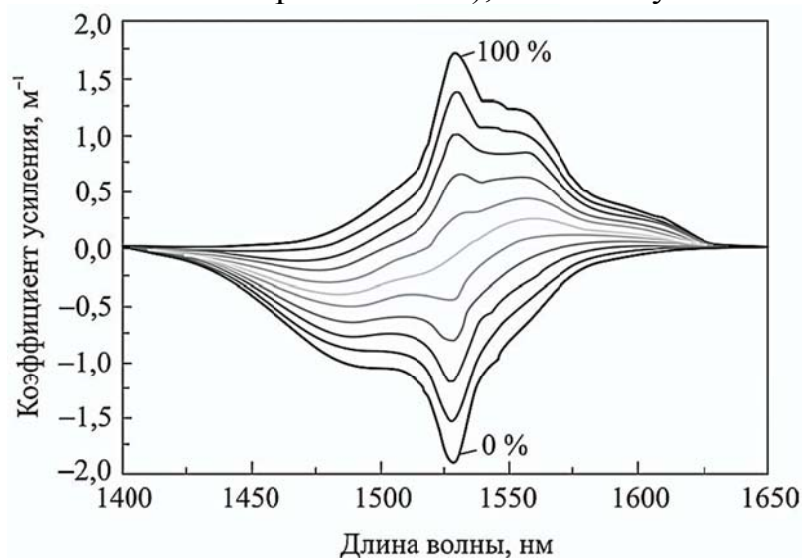


Рисунок 5.3 — Спектральная зависимость усиления-поглощения эрбиевого волокна при разных значениях относительной населенности метастабильного уровня энергии: нижняя кривая — населенность 0 %, верхняя кривая — населенность 100 %; кривые проведены для населенностей, изменяющихся с шагом 10 %

Отметим также, что спектр усиления несколько сдвинут в длинноволновую область относительно спектра поглощения. Таким образом, для усиления в длинноволновой части спектра требуется меньшее значение инверсии населенности энергетических уровней.

Использование трехуровневой схемы накачки приводит к появлению следующих важных свойств эрбиевого усилителя:

— к наличию пороговой мощности накачки, при которой происходит «просветление» активного волоконного световода;

— к необходимости выбора оптимальной длины эрбиевого волокна, т.е. длины, при которой достигается максимальное усиление при заданной концентрации ионов эрбия.

При длине волокна больше оптимальной в дальних участках волокна будет наблюдаться поглощение сигнала, а при использовании эрбиевого волокна недостаточной длины излучение накачки используется не полностью. Оптимальная длина эрбиевого волокна зависит от частоты усиливаемого сигнала. Чем меньше частота сигнала, тем более длинный отрезок эрбиевого волокна соответствует максимальному усилению.

5.3.3. Структура эрбиевого волоконного усилителя и его характеристики

В большинстве схем волоконных усилителей накачка осуществляется непосредственно в торец световедущей жилы активированного волокна. В последнее время в результате разработки активированных эрбием световодов со сложным профилем показателя преломления и распределения ионов эрбия по диаметру световедущей жилы волокна начали применяться более эффективные схемы усилителей с накачкой через промежуточную оболочку световода.

Простейшая схема модуля эрбиевого волоконного оптического усилителя (рис. 5.4) состоит из следующих ключевых элементов.

а) Полупроводниковый источник накачки (*Pump Laser*), работающий на длинах волны 980 или 1480 нм.

б) Соединитель канала накачки на длине волны 980/1480 нм и полезного сигнала, который необходимо усиливать (*WDM coupler*).

в) Оптическое волокно, легированное эрбием.

г) Оптический изолятор, пропускающий оптические сигналы только в одном направлении. Оптический изолятор предотвращает попадание отраженного сигнала от оптических элементов, стоящих за ним (например, брэгговской решетки), в активное волокно и полупроводниковый источник накачки.

д) Брэгговская решетка, выравнивающая спектр усиления в рабочем диапазоне длин волн.

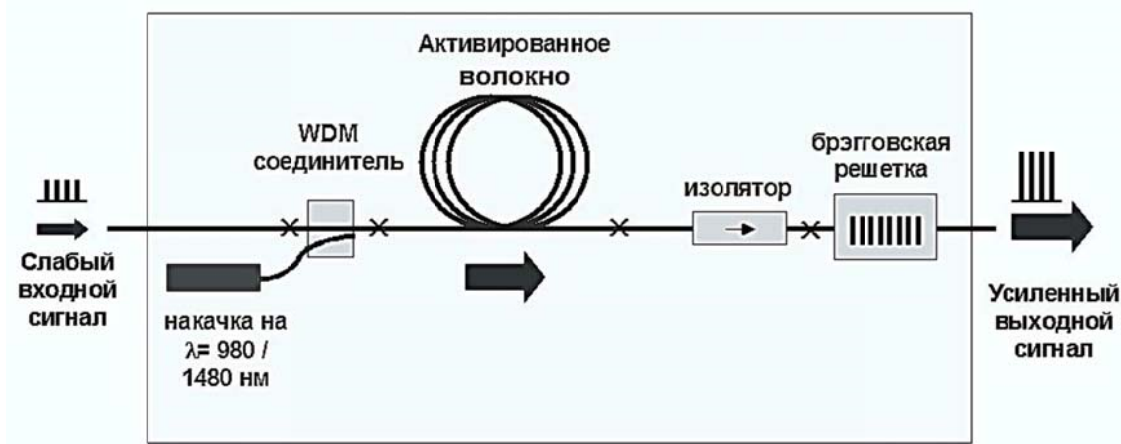


Рисунок 5.4 — Схема Эрбиевого волоконного усилителя

Ширина полосы усиления определяется спектром излучения ионов эрбия в материале сердцевины оптического волокна. Определяющее влияние материала сердцевины волокна на спектр излучения связано с тем, что ионы эрбия окружены молекулами этого материала. Наиболее широким спектром излучения обладают ионы эрбия в алюмосиликатном стекле ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$), как показано на рис. 5.5.

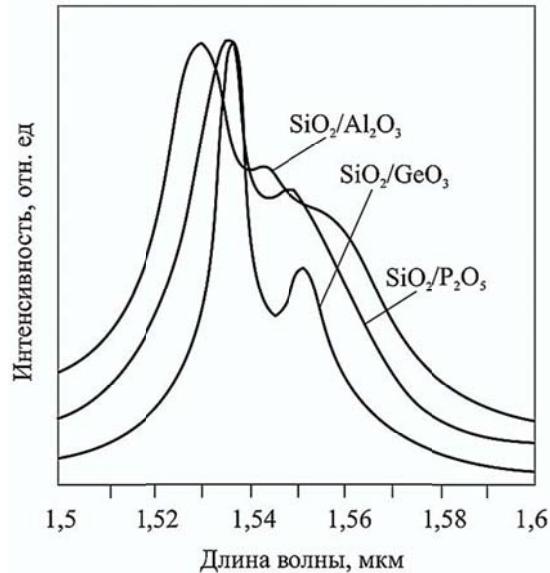


Рисунок 5.5 — Спектры излучения ионов эрбия в кварцевом стекле с различными добавками

Спектры усиления типичного эрбиевого усилителя на алюмосиликатном стекле при двух значениях мощности входного сигнала представлены на рис. 5.6.

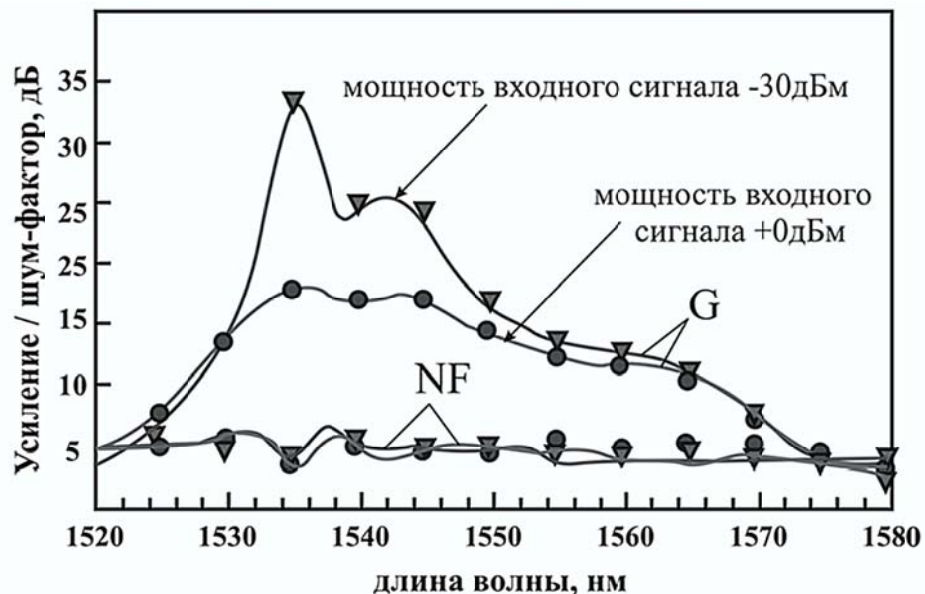


Рисунок 5.6 — Спектральные зависимости коэффициентов шума (NF) и усиления (G) эрбиевого усилителя для двух значений входного сигнала

Полоса пропускания, ее равномерность, динамический диапазон и другие характеристики ЭВУ напрямую зависят от параметров легированного

световода (его длины, диаметра световедущей жилы, распределения ионов эрбия по диаметру световедущей жилы, степени однородности накачки и т.д.), а также от топологии усилителя.

Кроме широкой полосы усиления важную роль играет равномерность коэффициента усиления во всей полосе (см. рис. 5.6). Это обусловлено необходимостью иметь одинаковое усиление сигнала в каждом спектральном канале. Как правило, ни один из усилителей не имеет плоской спектральной характеристики, поэтому выравнивание спектра усиления осуществляется оптическими фильтрами различных типов, например, при использовании брэгговских решеток или за счет использования активированного волокна специального состава (фторидного или теллуридного). В основном усилители, применяемые в системах со спектральным уплотнением, имеют неравномерность коэффициента усиления в пределах не более нескольких децибел во всей полосе усиления.

5.3.4. Преимущества и недостатки эрбиевых волоконных усилителей

К преимуществам эрбиевых волоконных усилителей относятся:

- высокая передача энергии от накачки к сигналу $> 50 \%$;
- одновременное усиление в широком диапазоне длин волн в области 1550 нм с относительно плоским спектром усиления > 20 дБ, т.е. подходит для WDM-систем;
- низкий коэффициент шума;
- поляризационно независим (что уменьшает потери на соединениях);
- пригодны для использования в дистанционных системах;
- эрбиевый усилитель также может работать в S и L -диапазонах.

К недостаткам эрбиевых волоконных усилителей можно отнести:

- большие размеры модуля эрбиевого усилителя ($\sim 220 \times 220 \times 10$ мм³). Габариты корпуса усилителя определяются радиусом изгиба легированного оптического волокна, который составляет более 10 см. Это приводит к нерациональному соотношению веса легированного оптического волокна (несколько граммов) к объему, который оно занимает в корпусе усилителя;
- невозможность интеграции с полупроводниковыми устройствами;
- в эрбиевом усилителе существует усиленное спонтанное излучение (*amplified spontaneous emission* — ASE), поэтому, даже если нет входящего сигнала, всегда существует какой-то сигнал на выходе усилителя вследствие спонтанного перехода некоторых ионов в возбужденное состояние; этот эффект называется спонтанным шумом;
- перекрестные помехи;
- насыщение усиления.

5.4. Порядок выполнения работы

5.4.1. Исследование зависимости коэффициента усиления от уровня мощности входного сигнала.

5.4.1.1. Собрать схему, показанную на рис. 5.7.

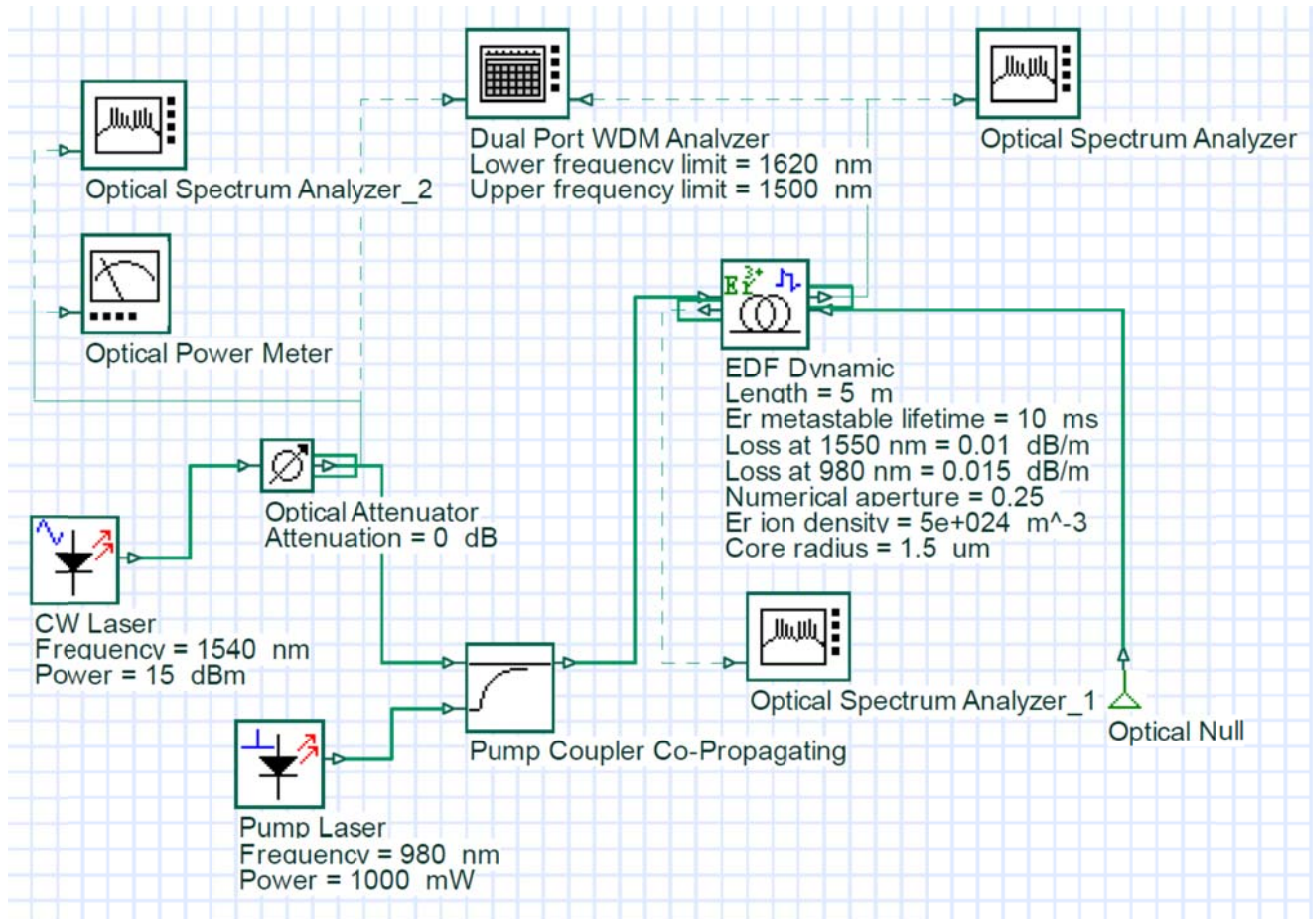


Рисунок 5.7 — Схема для исследования зависимости коэффициента усиления ЭВУ от уровня мощности входного сигнала

5.4.1.2. Задать *Bit rate* равным 1 Гбит/с. Общие для всех параметры: *Sequence length* = 128 bits; *Samples per bit* = 64.

5.4.1.3. Ввести настройки сигнального лазера и эрбиевого оптического кабеля с учетом данных табл. 5.1 и 5.2.

5.4.1.4. Открыть настройки аттенюатора и в колонке «*Mode*» выбрать «*sweep*». Нажать на кнопку «*Parameter sweep*» , указать во всплывающем окне количество итераций равным 5, и ввести в таблице переменного параметра последовательный ряд ослаблений: 0, 8, 16, 24, 30 дБ.

5.4.1.5. Выполнить моделирование. Провести анализ результатов моделирования согласно следующим операциям:

а) открыть двойным щелчком приборы «*Optical Power Meter*» и «*Dual Port WDM Analyzer*».

б) последовательно переключая итерации расчетов кнопками  в верхнем меню, заносить показания приборов «*Optical Power Meter*» и «*Dual Port WDM Analyzer*» в табл. 5.3.

Таблица 5.3 — Зависимость характеристик эрбиевого волоконного усилителя от уровня входной мощности

P_{in} , дБм					
Gain, дБ					
Noise Figure, дБ					

5.4.1.6. По данным табл. 5.3 построить графики зависимостей коэффициента усиления и коэффициента шума от уровня входного сигнала оптического усилителя.

5.4.2. Исследование частотной зависимости коэффициента усиления от уровня мощности входного сигнала.

5.4.2.1. Собрать схему, показанную на рис. 5.8.

5.4.2.2. Матрица сигнальных лазеров и мультиплексор — 16-канальные. Для матрицы лазеров сетка частот по каналам задана в табл. 5.4. Мощности всех лазеров в матрице одинаковы и равны P_{in} из табл. 5.2.

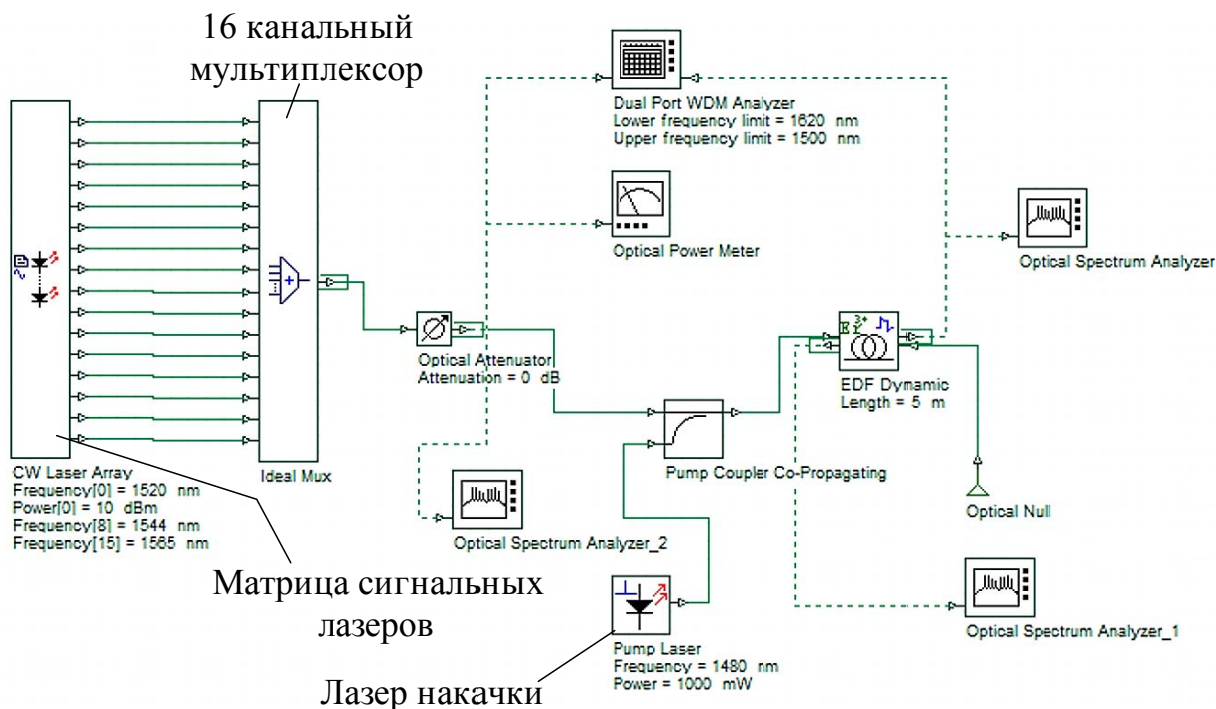


Рисунок 5.8 — Топология системы для исследования частотных характеристик эрбиевого волоконного усилителя

Таблица 5.4 — Длины волн излучения сигнальных лазеров в матрице

№ лазера в матрице	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Длина волны, нм	1520	1523	1526	1529	1532	1535	1538	1541	1544	1547
№ лазера в матрице	11	12	13	14	15	16	—	—	—	—
Длина волны, нм	1550	1553	1556	1559	1562	1565	—	—	—	—

5.4.2.3. Выполнить моделирование. Для построения в единой системе координат графиков частотной зависимости коэффициента усиления ЭВУ при разных уровнях мощности входного группового сигнала следует выполнить следующие операции:

а) Для отображаемой в окне программы в данный момент итерации расчетов посмотреть на блоке аттенюатора текущее значение ослабления;

б) во всплывающем меню модуля «*Dual Port WDM Analyzer*» выбрать «*Dual Port WDM Analyzer Viewer*» — «*2D Graph*». В списке слева в группе «*Left Display*» выбрать «*Gain*».

в) В окне графика во всплывающем меню (синяя кнопка в верхнем правом углу) выбрать «*Export Data*». В открывшемся окне нажать на кнопку «*Export Curve*» и сохранить файл графика с названием, где присутствует указание ослабления аттенюатора, например, «*Gain_Attenuation_30dB.txt*» (если ослабление на аттенюаторе составляло в данной итерации 30 дБ);

г) в окне программы выбрать в верхнем меню следующую итерацию расчетов в раскрываемом окне «*Sweep Iteration*». Посмотреть значение ослабления аттенюатора и повторить построение и сохранение графика согласно пп. в) с измененным названием, в котором указать ослабление на аттенюаторе;

д) при построении графика последней из 5 итераций (4 предыдущие уже сохранены в файлы) следует настроить вид графика этой итерации; для этого во всплывающем меню графика в разделе «*Export/Import Data/Curve*» выбрать «*Properties*» и выбрать маркер графика, например — ромб;

е) далее следует во всплывающем меню графика выбрать «*Import Curve*» и формат файла «*.txt*» и последовательно импортировать каждую их сохраненных ранее итераций; при вставке графика очередной итерации следует выполнить настройку его визуализации аналогично пп. д), выбирая каждый раз новый маркер;

ж) после построения всех графиков в одной координатной системе общий вид полученных зависимостей должен быть аналогичен графику, показанному на рис. 5.9.

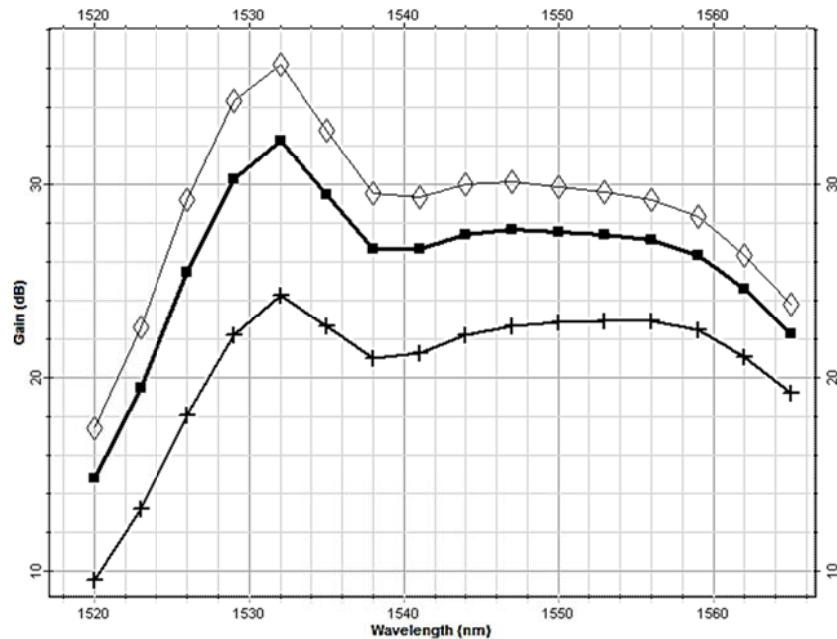


Рисунок 5.9 — Частотные зависимости коэффициента усиления ЭВУ от уровня мощности входных сигналов

з) На основании полученных результатов выбрать такой уровень входных сигналов $P_{in,opt} = P_{in} - \Delta_{opt}$ (Δ_{opt} — оптимальное ослабление, вносимое аттенуатором), при котором на рис. 5.9 полученная частотная характеристика коэффициента усиления относительно равномерна в исследуемой полосе частот и средний уровень КУ не ниже 20 дБ.

и) **Примечание.** Если ни один из графиков на рис. 5.9 не отвечает условиям пп. з), то следует увеличить длину эрбиевого оптического кабеля на 1 — 2 м и повторить моделирование по пп. а) — з). Полученное значение длины эрбиевого кабеля принять как новое значение $L_{ЭОК0}$, взамен указанного в табл. 5.2 значения.

5.4.2.4. В настройках аттенуатора в колонке «Mode» выбрать «normal» и задать значение ослабления Δ_{opt} , отвечающее условию в пп. з) в 5.4.2.3.

5.4.3. Исследование частотной зависимости коэффициента усиления от длины эрбиевого оптического кабеля.

5.4.3.1. Для схемы, показанной на рис. 5.8, проверить фиксированное значение ослабления аттенуатора согласно пп. 5.4.2.4.

5.4.3.2. В свойствах эрбиевого оптического кабеля, «EDF Dynamic», в строке «Length» (длина) в колонке «Mode» выбрать «sweep». Нажать на кнопку «Parameter sweep»  и ввести в таблице настроек эрбиевого оптического кабеля последовательный ряд его значений: $L_{ЭОК0}-1$; $L_{ЭОК0}$; $L_{ЭОК0}+1$; $L_{ЭОК0}+2$; $L_{ЭОК0}+3$. При исследовании динамики изменения графиков допускается обоснованная коррекция указанного ряда значений длин эрбиевого оптического кабеля.

5.4.3.3. Выполнить моделирование согласно пп. 5.4.2.3 (пп. а) — з)). Определить оптимальную длину эрбиевого оптического кабеля $L_{ЭОК,opt1}$, при

которой обеспечивается более равномерный в полосе частот и коэффициент усиления ЭВУ не менее 20 дБ.

5.4.3.4. Построить график с 5 частотными зависимостями КУ ЭВУ при разных длинах эрбиевого оптического кабеля.

5.4.3.5. Увеличить мощность сигнальных лазеров P_{in} на 3 дБм. Выполнить моделирование, построение графика и анализ по пп. 5.4.2.3 и 5.4.3.4. Выбрать $L_{\text{ЭОК.opt2}}$.

5.4.3.6. В настройках эрбиевого оптического кабеля «EDF Dynamic» в колонке «Mode» выбрать «normal» и задать значение длины равным $L_{\text{ЭОК.opt1}}$. Мощность сигнальных лазеров восстановить до значений P_{in} из табл. 5.2.

5.4.4. Исследование частотной зависимости коэффициента усиления ЭВУ от уровня мощности накачки.

5.4.4.1. Для схемы, показанной на рис. 5.8, проверить фиксированное значение длины эрбиевого оптического кабеля согласно пп. 5.4.3.6 и мощностей сигнальных лазеров — P_{in} из табл. 5.2.

5.4.4.2. В свойствах лазера накачки «Pump Laser» в строке «Power» в колонке «Mode» выбрать «sweep». Нажать на кнопку «Parameter sweep»  и ввести в таблице настроек лазера накачки последовательный ряд значений мощности: $P_{\text{pump}} - 100 \text{ мВт}$; P_{pump} ; $P_{\text{pump}} + 100 \text{ мВт}$; $P_{\text{pump}} + 200 \text{ мВт}$; $P_{\text{pump}} + 300 \text{ мВт}$.

5.4.4.3. Выполнить моделирование согласно пп. 5.4.2.3 (пп. а) — з)). Определить оптимальную мощность накачки $P_{\text{pump.opt1}}$, при которой обеспечивается более равномерный в полосе частот и коэффициент усиления ЭВУ не менее 20 дБ.

5.4.4.4. Построить график с 5 частотными зависимостями КУ ЭВУ при разных P_{pump} .

5.4.4.5. Выставить длину эрбиевого оптического кабеля равной $L_{\text{ЭОК.opt2}}$. Установить мощности сигнальных лазеров равными $P_{in} + 3 \text{ дБм}$. Выполнить пп. 5.4.4.3, 4.4.4.4 и определить $P_{\text{pump.opt2}}$.

5.5. Содержание отчета

5.5.1. Исходные данные для исследования.

5.5.2. Схема для исследования зависимости характеристик ЭВУ от уровня мощности входного сигнала.

5.5.3. Графики зависимости коэффициента усиления и коэффициента шума ЭВУ от уровня мощности входного сигнала.

5.5.4. Схема для исследования частотных характеристик ЭВУ.

5.5.5. График частотных зависимостей коэффициента усиления ЭВУ при разных уровнях мощности входного сигнала. Привести результаты анализа графика. Указать выбранное значение $P_{in.opt}$.

5.5.6. График частотных зависимостей коэффициента усиления ЭВУ при разных длинах эрбиевого оптического кабеля при ослаблении

аттенюатора Δ_{opt} (т.е. при уровнях мощности сигнальных лазеров $P_{in,opt}$). Привести результаты анализа графика. Указать выбранное значение $L_{ЭОК,opt1}$.

5.5.7. График частотных зависимостей коэффициента усиления ЭВУ при разных длинах эрбиевого оптического кабеля при уровнях мощности сигнальных лазеров $P_{in} + 3$ дБм и ослаблении аттенюатора Δ_{opt} . Привести результаты анализа графика. Указать выбранное значение $L_{ЭОК,opt2}$.

5.5.8. График частотных зависимостей коэффициента усиления ЭВУ при разных мощностях лазера накачки, при уровнях мощности сигнальных лазеров P_{in} и длине эрбиевого оптического кабеля $L_{ЭОК,opt1}$. Привести результаты анализа графика. Указать выбранное значение $P_{pump,opt1}$.

5.5.9. График частотных зависимостей коэффициента усиления ЭВУ при разных мощностях лазера накачки, при уровнях мощности сигнальных лазеров $P_{in}+3$ дБм и длине эрбиевого оптического кабеля $L_{ЭОК,opt2}$. Привести результаты анализа графика. Указать выбранное значение $P_{pump,opt2}$.

5.5.10. Выводы по работе.

5.6. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

5.6.1. Поясните принцип работы эрбиевого волоконного усилителя.

5.6.2. Опишите структурную схему эрбиевого волоконного усилителя.

5.6.3. Перечислите способы накачки эрбиевых волоконных усилителей.

5.6.4. Поясните, какой из способов накачки ЭВУ более предпочтителен: прямой или встречный.

5.6.5. Поясните, в каком режиме работает ЭВУ при относительно низком уровне мощности накачки и почему.

5.6.6. Поясните, где в волоконно-оптической линии связи могут быть включены эрбиевые волоконные усилители?

5.6.7. Сравните спектры усиления эрбиевых оптических кабелей с различными легирующими примесями.

5.6.8. Сравните особенности усиления оптического сигнала при накачке на длине волны 980 нм и 1480 нм.

5.6.9. Оцените зависимость коэффициента усиления и коэффициента шума ЭВУ от уровня мощности входного сигнала при фиксированной длине эрбиевого оптического кабеля.

5.6.10. Оцените влияние длины эрбиевого оптического кабеля на частотную характеристику коэффициента усиления ЭВУ.

5.6.11. Оцените влияние уровня мощности излучения лазера накачки на частотную характеристику коэффициента усиления ЭВУ.

5.6.12. Поясните, какие могут быть полосы пропускания ЭВУ и в каком случае можно получить обеспечить наиболее широкополосное усиление.

5.6.13. Перечислите преимущества эрбиевых волоконных усилителей.

5.6.14. Перечислите недостатки эрбиевых волоконных усилителей.

5.6.15. При проектировании широкополосного канала *DWDM*-системы, какие ограничения учитывается при выборе коэффициента усиления ЭВУ?

6. Лабораторная работа № 5. Исследование и коррекция характеристик рамановского усилителя

6.1. Цель работы

Целью работы является исследование и коррекция характеристик рамановского усилителя в САПР *OptiSystem*.

6.2. Исходные данные

Исходные данные для выполнения работы представлены в табл. 6.1, 6.2

Таблица 6.1 — Исходные данные для лабораторной работы

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$Bit\ rate,$ $Гбум/с$	2	4	6	8	10	2	4	6	8	10
N_{laser}	15	18	16	15	12	14	10	15	11	14
$\lambda_{min},$ нм	1530	1532	1534	1536	1538	1530	1532	1530	1533	1536
$\Delta\lambda,$ нм	2,4	1,6	2,4	1,6	3,2	1,6	3,2	2,4	3,2	2,4
$RIN,$ дБ/Гц	-140	-130	-150	-160	-130	-140	-130	-160	-150	-140
$L,$ км	25	26	27	28	29	25	26	27	28	29
$P_0,$ дБм	-5									

Примечание.

В таблице введены следующие обозначения: N — последняя цифра номера зачётной книжки; $Bit\ rate$ — скорость передачи битов; N_{laser} — количество лазеров в передающем оптическом модуле; λ_{min} — минимальная рабочая длина волны оптических сигналов, подаваемых на входы мультиплексора; $\Delta\lambda$ — шаг сетки оптических несущих для сигналов, подаваемых на входы мультиплексора; P_0 — мощность оптического излучения на выходах передатчика с многоволновым уплотнением (*WDM Transmitter*); RIN — относительный шум интенсивности лазерных излучателей; L — длина рамановского усилителя.

Таблица 6.2 — Исходные данные для лабораторной работы

№ лазера накачки	1	2	3	4
$\lambda,$ нм	1405	1415	1435	1460
$P,$ мВт	110	140	180	200

Примечание.

В таблице введены следующие обозначения: λ — длина волны лазера накачки; P — мощность оптического излучения на выходе лазера накачки.

6.3. Принцип работы и основные характеристики рамановских усилителей

По принципу действия оптические усилители классифицируют следующим образом.

— *Усилители на основе оптических волокон, использующих рассеяние Мандельштама-Брилюэна.* Стимулированное рассеяние Мандельштама-Брилюэна — нелинейное явление, при котором энергия оптической волны (на частоте f_1) переходит в энергию другой волны (на частоте f_2). При накачке такой усилитель способен усиливать сигнал на частоте f_2 .

— *Полупроводниковые оптические усилители,* оптически активным веществом в котором служит полупроводниковый материал, а энергия накачки — электрическая. Полупроводниковые оптические усилители используют стимулированную эмиссию фотонов, которая возникает в результате взаимодействия фотонов передаваемого сигнала и излучаемой рекомбинации носителей заряда в полупроводнике.

— *Параметрические оптические усилители,* в которых используется эффект четырехволнового смещения. Такие усилители требуют значительной мощности накачки (порядка 30 — 70 Вт) и обладают большим коэффициентом усиления — около 50 дБ. Однако их реализация достаточно сложна, что сдерживает практическое распространение этих усилителей.

— Оптические усилители на основе легированных волокон, эрбиевые волоконные усилители.

— Усилители на основе оптических волокон, использующих вынужденное комбинационное рассеяние Рамана, принцип действия которых идентичен принципу действия усилителей с рассеиванием Мандельштама-Брилюэна, однако смещение между частотой полезного сигнала, который усиливается, и частотой волны накачки — больше. Полоса пропускания усилителя также более широкая, что позволяет усиливать сразу несколько оптических каналов. Явление рассеивания Рамана возникает при мощности накачки порядка 0,5 — 1,4 Вт в зависимости от длины оптического волокна.

Увеличение длины усилительного участка волоконно-оптической системы передачи (ВОСП) принципиально достижимо за счет:

- увеличения мощности группового оптического сигнала, вводимого в одномодовое оптическое волокно,
- повышения чувствительности приемного оптического модуля,
- использования специальных одномодовых оптических волокон с предельно низкими затуханием и дисперсией;
- использования предварительной коррекции ошибок при передаче цифровых сигналов;
- **использования для усиления сигналов оптического нелинейного явления в кабельном волокне, составляющем оптический тракт ВОСП, известного как вынужденное комбинационное рассеяние Рамана (ВКР),**

или стимулированное рамановское рассеяние (*SRS-Stimulated Raman Scattering*).

С учетом взаимодействия энергии сигнала накачки с материалом сердцевины оптоволокна, вынужденное комбинационное рассеяние («рамановское»), обеспечивающие усиление на определенной оптической длине волны, относительно равномерно распределяется по всей длине одномодового оптического кабеля. Последние поколения ВОСП со спектральным разделением оптических каналов для длинных линий содержат в своем составе мощные рамановские лазеры накачки (мощностью до 500 — 1000 мВт и более) и соответствующие устройства ввода излучения в одномодовое оптическое волокно для создания в нем ВКР. Такие волоконно-оптические усилители называют также ВКР-усилителями или Рамановскими усилителями.

Существует два основополагающих рассеяния фотонов (квантов) в кварцевом стекле одномодового оптического волокна — рэлеевское и рамановское. В обычных условиях рэлеевское рассеяние преобладает над рамановским. В результате рамановского рассеяния (при большом уровне накачки одномодового оптического волокна) фотоны не только изменяют свою траекторию, но и отдают часть своей энергии микрочастице в соответствии со стоксовым соотношением

$$h\omega_S = h(\omega_H - \omega_M),$$

где ω_H — частота фотона накачки; ω_M — частота собственных колебаний микрочастицы; $\omega_S = \omega_H - \omega_M$ — частота нового фотона (стоксова), возникшего в результате нелинейного взаимодействия фотона накачки частотой ω_H и микрочастицы ω_M . При увеличении мощности накачки наблюдается увеличение количества фотонов с энергией $h\omega_H$. При этом возрастает также и вероятность возбуждения ранее невозбужденных микрочастиц. Ориентация вектора поляризации возбужденных частиц (молекул) в одномодовом оптическом волокне определяется направлением стоксова фотона, т. е. вдоль вектора электрического поля накачки. Ориентация возбужденных молекул из хаотических превращается в преимущественно упорядоченную. В результате этого процесса стоксовы фотоны не рассеиваются, и поле этой частотной компоненты (стоксовой) становится когерентным, направленным вдоль одномодового оптического волокна. Все это происходит ценой уменьшения энергии фотона накачки на величину $h\omega_M$.

Если в возбужденную среду одномодового оптического волокна ввести информационный сигнал частотой ω_c , равной частоте стоксовых фотонов ω_S , то он стимулирует рождение стоксовых фотонов, частота, фаза и направление которых совпадают с такими же параметрами сигнальных фотонов, которые при этом своей энергии не теряют. Таким образом, в оптически возбужденной среде созданные излучением накачки стоксовы фотоны не только компенсируют потери энергии сигнала, но и усиливают его.

Рамановские усилители могут быть распределенными или выполняться в виде дискретных устройств. Распределенные усилители характеризуются тем, что эффект усиления сигнала в них достигается путем использования определенных участков или всего оптического волокна, применяемого для передачи в ВОСП. Распределенные Рамановские усилители могут классифицироваться на три следующие подкатегории.

Рамановский усилитель с накачкой вперед — энергия накачки и передаваемый сигнал распространяются по волокну передачи в одном направлении (рис. 6.1), где FP_i и FP_o — контрольные точки входного и выходного сигналов, C — оптические разъемы, оканчивающие усилитель, GMP — контрольная точка измерения усиления.

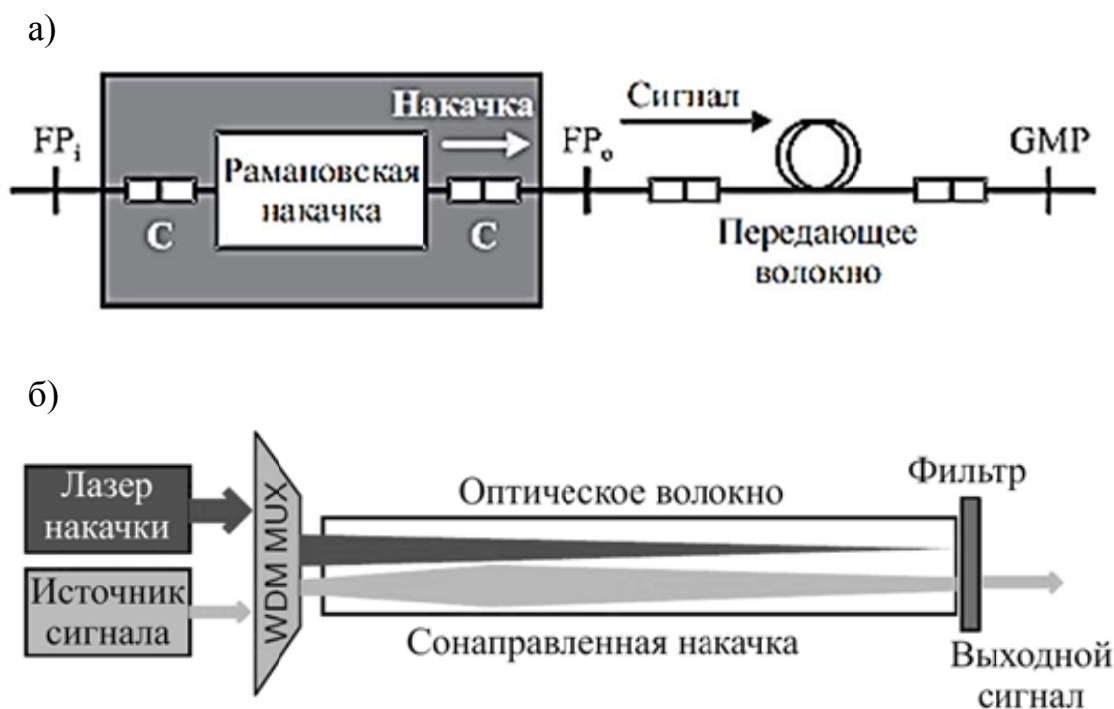


Рисунок 6.1 — Структурная схема Рамановского усилителя с накачкой вперед (а) и иллюстрация распределения мощностей сигнала и накачки вдоль оптоволокна (б)

Рамановский усилитель со встречной накачкой — энергия накачки и передаваемый сигнал распространяются по волокну передачи в противоположных направлениях (рис. 6.2), где используются те же обозначения, что и для рис. 6.1.

Рамановский усилитель с накачкой в обе стороны — энергия накачки распространяется по оптоволокну в обе стороны (рис. 6.3). В этом случае часть энергии накачки распространяется в одном направлении с передаваемым сигналом, а часть — в направлении, противоположном направлению сигнала, передаваемого средствами связи.

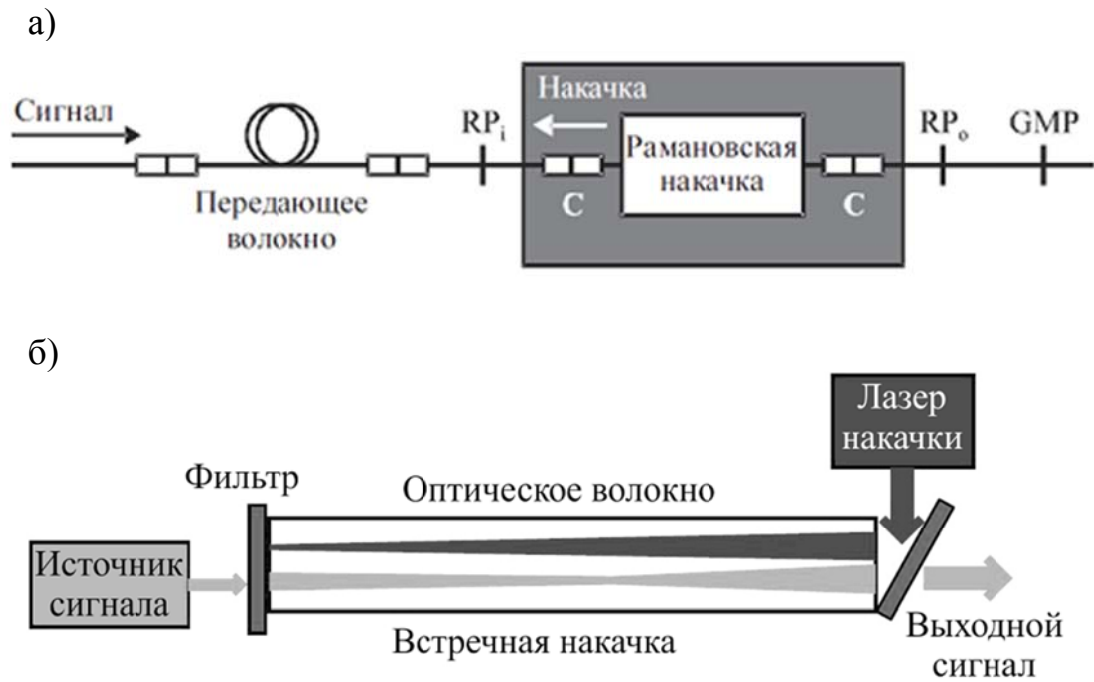


Рисунок 6.2 — Структурная схема Рамановского усилителя со встречной накачкой (а) и иллюстрация распределения мощностей сигнала и накачки вдоль оптоволокна (б)

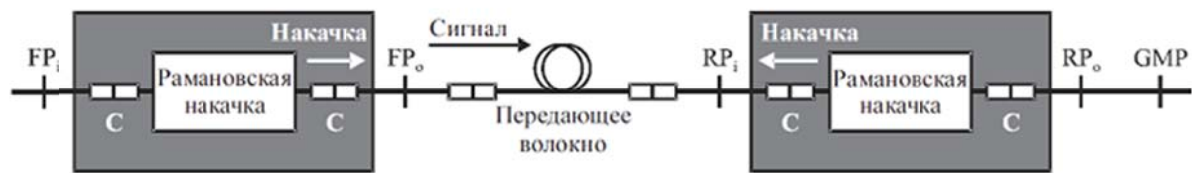


Рисунок 6.3 — Структурная схема Рамановского усилителя с накачкой в обе стороны

Типовая схема ВОСП с рамановским усилителем показана на рис. 6.4, где введены обозначения: TP — транспондер; MUX — DWDM-мультиплексор; Booster — буферный усилитель; Raman — распределенный рамановский усилитель с накачкой назад, Pre-amp — предварительный малошумящий усилитель; DEMUX — DWDM-демультиплексор.

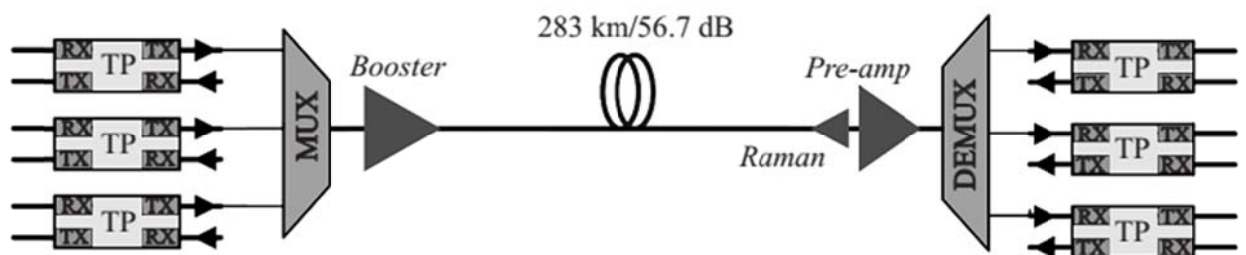


Рисунок 6.4 — Упрощенная конфигурация ВОСП с Рамановским усилителем с накачкой назад

6.4. Порядок выполнения работы

6.4.1. Собрать схему, показанную на рис. 6.5.

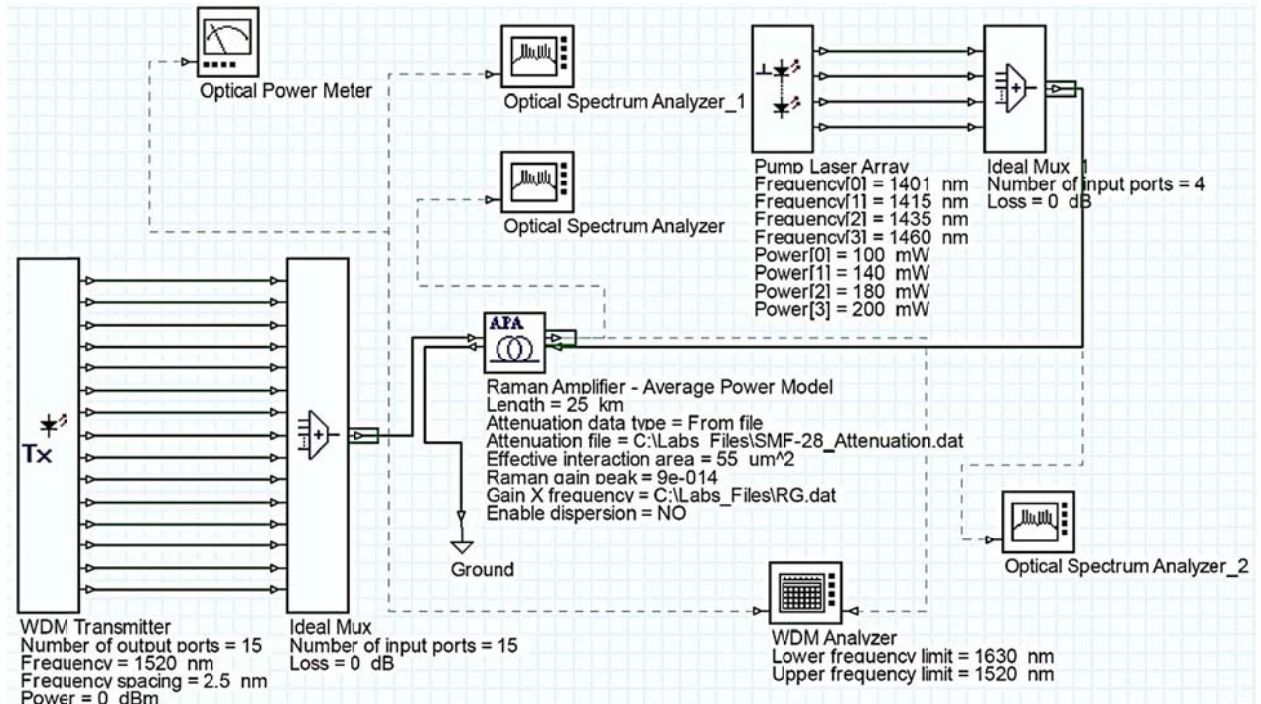


Рисунок 6.5 — Схема измерительного тракта для исследования характеристик рамановского усилителя

6.4.2. Предварительные настройка схемы и расчет.

6.4.2.1. Задать *Bit rate* с учетом данных табл. 6.1. Общие для всех параметры: *Sequence length* = 16 bits; *Samples per bit* = 16.

6.4.2.2. Настроить многоканальный передающий оптический модуль (*WDM Transmitter*), задав согласно табл. 6.1:

- количество выходов N_{laser} (*Number of output ports*);
- минимальную рабочую длину волны λ_{min} (опция *Frequency*);
- интервал между несущими $\Delta\lambda$ (*Frequency spacing*);
- мощность P_0 оптического излучения на выходах передающего оптического модуля (*WDM Transmitter*);
- относительный шум интенсивности лазерных излучателей RIN .

6.4.2.3. Настроить идеальную модель мультиплексора. Задать количество входных портов равным N_{laser} и вносимые потери задать равными 0 дБ.

6.4.2.4. Настроить рамановский усилитель.

- Задать длину рамановского усилителя согласно данным табл. 6.1.
- Задать «*Raman Gain Peak*» равным «9e-014».
- Задать «*Effective interaction area*» равным 0,55 μm^2 .
- В строке «*Attenuation data type*» выбрать «*From file*». И в строке «*Attenuation file*» взять файл «*SMF-28_Attenuation.dat*» из папки «*/Устройства радиофотоники/03 Лабораторный практикум/Files».

— В строке «*Date × frequency*» взять файл «*RG.dat*» из папки «*/Устройства радиофотоники/03 Лабораторный практикум/Files».

— Задать «*Upper pump reference*» равной 1450 нм.

— В строке «*Enable dispersion*» снять галочку.

6.4.2.5. Настроить модуль лазеров накачки (*Pump Laser Array*). В настройках задать 4 выходных порта. Задать значения длин волн и мощности накачки согласно данных табл. 6.2.

6.4.2.6. Настроить мультиплексор лазеров накачки. Задать количество выходов равным 4 и вносимые потери задать равными 0 дБ.

6.4.2.7. Зайти в настройки модуля «*WDM Analyzer*» (вызвать правой кнопкой мыши всплывающее меню и зайти в раздел «*Component Properties*»).

В строке «верхняя граничная частота» (*upper frequency limit*) задать

$$\lambda = \lambda_{\min} - 5, \text{ нм.}$$

В строке «*lower frequency limit*» задать

$$\lambda = \lambda_{\min} + \Delta\lambda (N_{\text{laser}} - 1) + 5, \text{ нм.}$$

6.4.2.8. Выполнить расчет. Полученная частотная характеристика усиления требует оптимизации по критерию минимального перепада усиления в пределах рабочей полосы оптических сигналов.

6.4.2.9. Зайти в меню *WDM Analyzer* (вызвать правой кнопкой мыши всплывающее меню) и зайти в раздел «*Component View*». В открывшемся окне перейти во вкладку «*2D Graphs*». В группе «*Left Display*» поставить галочку напротив «*Gain*».

Сохранить полученный график частотной зависимости коэффициента усиления. Для этого следует выполнить следующие операции:

— в окне графика во всплывающем меню (синяя кнопка в верхнем правом углу) выбрать «*Export Data*»;

— в открывшемся окне нажать на кнопку «*Export Curve*» и сохранить файл графика с названием, например, «**RamanAmpl_L_km.txt**».

6.4.2.10. Сохранить спектрограммы измерительных приборов (всплывающее меню окна графика — «*Print to Bmp File*»).

6.4.3. Проведение оптимизации частотной характеристики усиления.

6.4.3.1. Настройка параметров оптимизации.

Открыть окно, отвечающее за выполнение моделирования «*Calculate*». Войти в меню оптимизации (*Optimizations*).

В окне «*Installed Optimization*» двойным нажатием мыши открыть «*MPO Optimization*».

Задать «*Maximum number of passes*» равным 50.

Перейти во вкладку «*Parameters*».

Открыть в группе параметров «*Layout*» параметры модуля «*Pump*» и из перечня параметров перенести (кнопка «*add*» или двойным щелчком мыши) частоты *Frequency*[0] — *Frequency*[3] в правое окно («*Selected*»), также

перенести в эту группу оптимизируемых параметров мощности лазеров накачки $Power[0]$ — $Power[3]$.

По каждому из параметров задать диапазон значений согласно данных табл. 6.3.

Таблица 6.3 — Диапазон значений оптимизируемых параметров лазеров накачки

Параметр	Минимум	Максимум	Начальное значение
$Frequency[0]$	1401	1410	1405
$Frequency[1]$	1411	1425	1415
$Frequency[2]$	1428	1440	1435
$Frequency[3]$	1450	1470	1460
$Power[0]$	100	300	110
$Power[1]$	100	300	140
$Power[2]$	100	300	180
$Power[3]$	100	300	200

Перейти во вкладку «*Results*».

Открыть в группе параметров «*Layout*» параметры модуля «*WDM Analyzer*» и из перечня параметров перенести (кнопка «*add*» или двойным щелчком мыши) параметр «*Ratio Max/Min Gain*» в правое окно («*Selected*»), также перенести в эту группу ВСЕ параметры *Gain* (например, *Gain 1* — *Gain 10*).

Для «*Ratio Max/Min Gain*» задать «*Target Value*» = 1 и «*Tolerance*» = 0,1.

Для всех «*Gain*» задать «*Target Value*» = 9 и «*Tolerance*» = 0,1.

Сохранить все параметры настроек окна оптимизации по нажатию кнопки «*OK*». Вернувшись в окно выполнения расчетов поставить галочку в строке «*Run all optimizations*».

6.4.3.2. Запустить процесс оптимизации. Это может занять продолжительное время (5 — 15 минут, в зависимости от производительности компьютера).

6.4.4. Построение графиков частотной зависимости коэффициента усиления до и после оптимизации лазеров накачки.

6.4.4.1. Зайти в окно графиков прибора «*WDM Analyzer*» и воспроизвести рассчитанную характеристику усиления (всплывающее меню / «*Component View*» / «*2D Graphs*» / «*Left Display*» / «*Gain*»).

Сохранить полученный график частотной зависимости коэффициента усиления. Для этого следует выполнить следующие операции:

— в окне графика во всплывающем меню выбрать «*Export Data*»;

— в открывшемся окне нажать на кнопку «*Export Curve*» и сохранить файл графика с названием, например, «**RamanAmpl_Optim_L_km.txt**».

6.4.4.2. Не закрывая графика оптимизированной частотной зависимости коэффициента усиления, открыть меню окна графика и нажать кнопку

«*Import Curve*», выбрать расширение файлов «.txt», выбрать файл «**RamanAmpl_L_km.txt**» и нажать «Открыть».

Открыть меню окна графика и нажать в нижней части меню на «*Properties*». Выбрать вкладку «*Curve*» и для графика оптимизированной характеристики усиления выбрать «*Line thickness*» равным 3 и параметр «*Point Style*» — «*Circle*». Нажать «OK».

Сохранить полученные графики (всплывающее меню — «*Print to Bmp File*»).

6.4.4.3. Сохранить спектрограммы измерительных приборов **на выходе блока лазеров накачки и на выходе усилителя** с оптимизированными параметрами лазеров накачки.

6.4.5. Построение графика частотных зависимостей коэффициента усиления при различных длинах оптоволокон для усилителя с оптимизированными параметрами лазеров накачки.

6.4.5.1. Задать длину оптоволокон рамановского усилителя равной $L_1 = L - 5$ км. Оптимизированные параметры лазеров накачки не менять. **Открыть окно моделирования, снять галочку с пункта «Run all optimizations».** Выполнить моделирование. Сохранить результаты моделирования аналогично пп. 6.4.13.1 под названием файла, например, «**RamanAmpl_L1_km.txt**».

6.4.5.2. Задать длину оптоволокон рамановского усилителя равной $L_2 = L + 5$ км. Оптимизированные параметры лазеров накачки не менять. Выполнить моделирование.

6.4.5.3. Зайти в окно графиков прибора «*WDM Analyzer*» и воспроизвести рассчитанную характеристику усиления (всплывающее меню / «*Component View*» / «*2D Graphs*» / «*Left Display*» / «*Gain*»).

Добавить к полученному результату графики из файлов «**RamanAmpl_Optim_L_km.txt**» и «**RamanAmpl_L1_km.txt**».

6.4.5.4. Используя инструмент коррекции графиков (всплывающее меню / «*Properties*» / «*Curve*»), маркировать кругами график для оптоволокон длиной L км («*Point Style*» — «*Circle*»), а для оптоволокон длиной L_1 км — квадратами («*Point Style*» — «*Square*»). Нажать «OK». Сохранить полученные характеристики («*Print to Bmp File*»).

6.4.6. Построение графика частотных зависимостей коэффициента усиления при различных значениях мощности излучения сигнальных лазеров для усилителя с оптимизированными параметрами лазеров накачки.

6.4.6.1. Задать длину оптоволокон рамановского усилителя равной L км. Оптимизированные параметры лазеров накачки не менять. Задать в блоке «*WDM Transmitter*» мощность оптических сигналов равной -10 дБм. Выполнить моделирование и сохранить полученную характеристику усиления в файл «**RamanAmpl_L_km_minus10dBm.txt**».

6.4.6.2. Задать в блоке «*WDM Transmitter*» мощность оптических сигналов равной 0 дБм. Выполнить моделирование. Открыть окно графиков

прибора «*WDM Analyzer*» и воспроизвести рассчитанную характеристику усиления.

6.4.6.3. Импортировать графики из файлов «*RamanAmpl_L_km_minus10dBm.txt*» (маркировать квадратами) и «*RamanAmpl_Optim_L_km.txt*» (маркировать кругами). Сохранить полученные характеристики («*Print to Bmp File*»).

6.5. Содержание отчета

6.5.1. Привести рисунок со схемой измерительной установки, выполненной для проведения исследований.

6.5.2. Представить спектрограммы сигналов, полученные на основании исходных данных.

6.5.3. Представить спектрограммы сигналов на выходе блока лазеров накачки и на выходе усилителя, полученные в результате оптимизации. Построить график частотных зависимостей коэффициента усиления до и после оптимизации. Сделать выводы об эффективности проведенной оптимизации.

6.5.4. Для усилителя с оптимизированными параметрами лазеров накачки привести график частотных зависимостей коэффициента усиления, полученных при различной длине оптоволокну ($L_1 — L_2$).

6.5.5. Для усилителя с оптимизированными параметрами лазеров накачки привести график частотных зависимостей коэффициента усиления, полученных при разных мощностях сигнальных лазеров ($-10 — 0$ дБм).

6.5.6. Сделать выводы по работе.

6.6. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

6.6.1. Поясните принцип работы рамановского усилителя.

6.6.3. Изобразите упрощенную структурную схему волоконно-оптической системы передачи с рамановским усилителем с накачкой вперед.

6.6.4. Изобразите упрощенную структурную схему волоконно-оптической системы передачи с рамановским усилителем со встречной накачкой.

6.6.5. Изобразите упрощенную структурную схему волоконно-оптической системы передачи с рамановским усилителем с двухсторонней накачкой.

6.6.6. Сравните характеристики рамановского усилителя со встречной и двухсторонней накачкой.

6.6.7. Сравните характеристики рамановского усилителя со прямой и встречной накачкой.

6.6.8. Перечислите основные достоинства рамановского усилителя.

6.6.9. Поясните, за счет чего достигается равномерность усиления рамановского усилителя в широкой полосе частот.

6.6.10. Поясните, чем вызвана необходимость проведения оптимизации характеристик лазеров накачки широкополосного рамановского усилителя.

6.6.11. Проанализируйте результаты моделирования частотной характеристики усиления до и после оптимизации.

6.6.12. Проанализируйте спектрограммы сигналов, полученные в лабораторной работе до и после оптимизации.

6.6.13. Проанализируйте результаты моделирования частотной характеристики усиления при различных длинах оптоволокна.

6.6.14. Проанализируйте результаты моделирования частотной характеристики усиления при различных мощностях сигнальных лазеров.

6.6.15. Почему рамановские усилители часто называют «распределенными» усилителями?

6.6.16. Поясните принцип работы двухкаскадного рамановского усилителя со встречной накачкой.

6.6.17. Поясните, в чем отличие принципов работы рамановского и эрбиевого волоконных усилителей.

6.6.18. Поясните, какие типы оптических усилителей наиболее широко применяются в современных DWDM-системах и почему.

6.6.19. Поясните, почему при использовании рамановского усилителя обеспечивается относительно низкий уровень коэффициента шума и нелинейных искажений.

Библиографический список

1. OptiSystem Getting Started [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://optiwave.com/resources/downloads/optisystem-getting-started>. — 26.07.2016.
2. Оформление текстовых работ: методические указания / СевГУ; сост. В. Г. Слёзкин, П. П. Ермолов. — Севастополь: Изд-во СевГУ, 2016. — 19 с.
3. Цуканов, В. Н. Волоконно-оптическая техника. Практическое руководство / В. Н. Цуканов, М. Я. Яковлев. — М.: Инфра-Инженерия, 2014. — 304 с.
4. Бейли, Д. Волоконная оптика. Теория и практика / Д. Бейли, Э. Райт. / Пер. с англ. — М.: КУДИЦ-ОБРАЗ, 2006. — 320 с.
5. Дмитриев, А. Л. Оптические системы передачи информации / А. Л. Дмитриев. — СПб: СПбГУИТМО, 2007. — 96 с.
6. Шарварко, В. Г. Волоконно-оптические линии связи: учебное пособие / В. Г. Шарварко. — Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2006. — 170 с.
7. ОСТ 46.190-2001 Системы передачи волоконно-оптические. Стыки оптические. Термины и определения. — М.: Издание официальное, ЦНТИ «ИНФОРМСВЯЗЬ», 2002. — 14с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А**ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА ОТЧЕТА
ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»
Институт радиоэлектроники и информационной безопасности

Кафедра «Радиоэлектроника и телекоммуникации»

ОТЧЕТ ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ
**«ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОКОННО-
ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ
ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ»**
по дисциплине «Устройства радиофотоники»

Выполнил студент _____
фамилия и инициалы

Группа _____

Отчет защищён с оценкой _____

Преподаватель _____

Севастополь
2017

Заказ № _____ от «__» _____ 2017 г. Тираж 30 экз.
Изд-во ФГАОУ ВО «СевГУ».