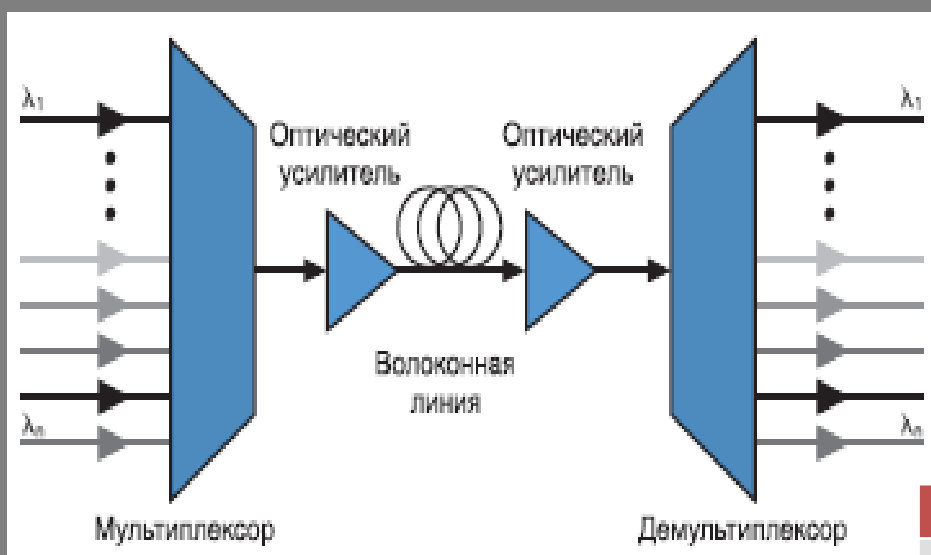


# МУЛЬТИПЛЕКСОРНОЕ И УСИЛИТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ МНОГОВОЛНОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ СВЯЗИ

*КОМПЬЮТЕРНЫЙ  
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ*

С.Н. Шарангович



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

---

С.Н. Шарангович

**«МУЛЬТИПЛЕКСОРНОЕ И  
УСИЛИТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ  
МНОГОВОЛНОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ  
СИСТЕМ СВЯЗИ»**

**КОМПЬЮТЕРНЫЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ  
ПРАКТИКУМ**

Учебное методическое пособие

2022

УДК 621.396.22.0297[621.315.2:621.39]

ББК 32.854

Ш 25

*Рецензенты:*

**Горлов Н.И.**, д-р техн. наук, проф., зав. каф. линий связи  
Сибирского гос. ун-та телекоммуникаций и информатики;

**Коханенко А.П.**, д-р физ.-мат. наук, проф. каф.  
квантовой электроники и оптоинформатики Том. гос. ун-та.

**Шарангович С.Н.**

Ш 25 Мультиплексорное и усилительное оборудование многоволновых оптических систем связи. Компьютерный лабораторный практикум: учеб. метод. пособие . – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2022. – 158 с.

Излагаются принципы оптического мультиплексирования и усиления в многоволновых волоконно-оптических системах связи. Рассматриваются основы построения мультиплексоров на интерференционных, дифракционных и волноводных структурах, оптических усилителей. Представлены методические материалы компьютерного лабораторного практикума по расчету и моделированию EDFA оптических усилителей, оптических мультиплексоров на интерференционных и Фабри-Перо фильтрах, голографических дифракционных и AWG структурах.

Предназначено для студентов технических вузов, обучающихся по направлению 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» (дисциплина «Мультиплексорное и усилительное оборудование многоволновых оптических систем связи») и направлению 11.03.01 «Радиотехника» (дисциплина «Оптические устройства в радиотехнике»)

УДК 621.396.22.0297[621.315.2:621.39]  
ББК 32.854

ISBN

© Томск. гос. ун-т систем упр. и  
радиоэлектроники, 2022

© Шарангович С.Н. 2022

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. Структура и оборудование многоволновых оптических систем связи...	6
2. Лабораторная работа №1 Компьютерное исследование многоволновых эрбиевых волоконно-оптических усилителей.....	31
3. Лабораторная работа №2 Компьютерное исследование оптических демultipлексоров на основе интерференционных фильтров и фильтров фабри-перо .....	57
4. Лабораторная работа №3 Компьютерное исследование оптических демultipлексоров на основе наложенных голограмм в фотополимерном материале .....	88
5. Лабораторная работа №4 Компьютерное исследование оптического мультимплектора на основе массива планарных волноводов ,,.....	117
ПРИЛОЖЕНИЕ А Частотный план ITU-T.....	141
ПРИЛОЖЕНИЕ Б РД 45.286-2002 Аппаратура волоконно-оптической системы передачи со спектральным разделением. Технические требования .	145
ПРИЛОЖЕНИЕ В Параметры промышленных оптических усилителей и мультимплекторов.....	148

## ВВЕДЕНИЕ

Технология волнового оптического мультиплексирования (WDM/ DWDM) позволяет осуществить передачу информации терабитных объемов со скоростями, достигающими 400 Гбит/сек, и в настоящее время широко внедряется от глобальных до локальных оптических сетей связи. Возможность передачи большого количества информации по волоконно-оптическим сетям связи (ВОЛС) связана с использованием технологии спектрального уплотнения, где передача информации по волокну ведется одновременно на разных длинах волн. При этом введение информационных оптических сигналов с различающимися длинами волн в ВОЛС осуществляется с помощью оптических мультиплексоров (MUX) на передаче, а выведение на приеме — при помощи демultipлексоров (DMUX). Необходимым элементом мультиплексорного оборудования WDM-систем являются оптические усилители. В настоящее время телекоммуникационное оборудование WDM-систем включает широкий спектр усилительного и мультиплексорного оборудования, представленного на рынке.

В данном учебном методическом пособии представлены материалы по самостоятельному изучению и выполнению компьютерного лабораторного практикума по расчету и моделированию оптических усилителей и оптических мультиплексоров, которые дополняют материалы теоретической части [2] курса «Мультиплексорное и усилительное оборудование многоволновых оптических систем связи».

Первый раздел пособия посвящен изложению общих принципов оптического мультиплексирования и усиления в многоволновых волоконно-оптических системах связи. Во втором, третьем, четвертом и пятом разделах рассматриваются основы построения и расчета EDFA оптических усилителей, оптических мультиплексоров на интерференционных и Фабри-Перо фильтрах, голографических дифракционных и AWG структурах. В каждом разделе представлены задания и описаны методические рекомендации по выполнению лабораторных работ, основанных на компьютерном моделировании, а также описано соответствующее программное обеспечение. В приложениях А,Б,В приведены рекомендации стандартов ITU и РД 45-286, а также характеристики выпускаемого WDM оборудования отечественных и зарубежных фирм. В конце каждого раздела и приложениях приведен список использованной литературы.

Пособие предназначено для студентов очной в заочной форм обучения технических вузов старших курсов, обучающихся по направлению 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» (дисциплина «Мультиплексорное и усилительное оборудование многоволновых оптических систем связи») и направлению 11.03.01 «Радиотехника» (дисциплина «Оптические устройства в радиотехнике»),

# 1 СТРУКТУРА И ОБОРУДОВАНИЕ МНОГОВОЛНОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ СВЯЗИ

## 1.1 Модель ВОСП со спектральным уплотнением

Волоконно-оптической системой передачи называется совокупность оптических устройств и оптических линий передачи для создания, обработки и передачи оптических сигналов. При этом оптическим сигналом служит модулированное оптическое излучение лазера или светодиода.[1]

Один из наиболее перспективных методов увеличения коэффициента использования пропускной способности оптического волокна – спектральное уплотнение, или WDM (Wavelength Division Multiplexing). Суть этого метода состоит в том, что  $m$  информационных цифровых потоков, переносимых каждый на своей оптической несущей на длине волны  $\lambda_m$  и разнесенных в пространстве, с помощью специальных устройств – оптических мультиплексоров (MUX) – объединяются в один оптический поток  $\lambda_1 \dots \lambda_m$ , после чего он вводится в оптическое линейное волокно, входящее в состав оптического кабеля.[3] На приемной стороне производится обратная операция демультиплексирования (DMUX).

Структурная схема ВОСП-WDM, соответствующая рекомендации G.692 МСЭ-T, приведена на рис. 1.1 [1,16,17].

Как видно из рисунка 1.1, структурная схема ВОСП-WDM содержит оптический передатчик (TX), оптический приемник (RX) и главный оптический тракт (OP).

Оптический передатчик содержит каналные приемопередатчики (транспондеры)  $TX_i$  –  $TX_n$ , которые, в частности, преобразуют длину волны STM-N (или ATM)  $\lambda_0$  в длины волн спектра каналов  $\lambda_i$ . На выходе  $TX_j$  образуется каналный сигнал, спектр которого соответствует скорости передачи STM-N. Канальные сигналы, а, следовательно, и их спектры объединяются с помощью оптического мультиплексора (OM), на выходе которого образуется групповой сигнал, спектр которого содержит суммарный спектр канальных сигналов:

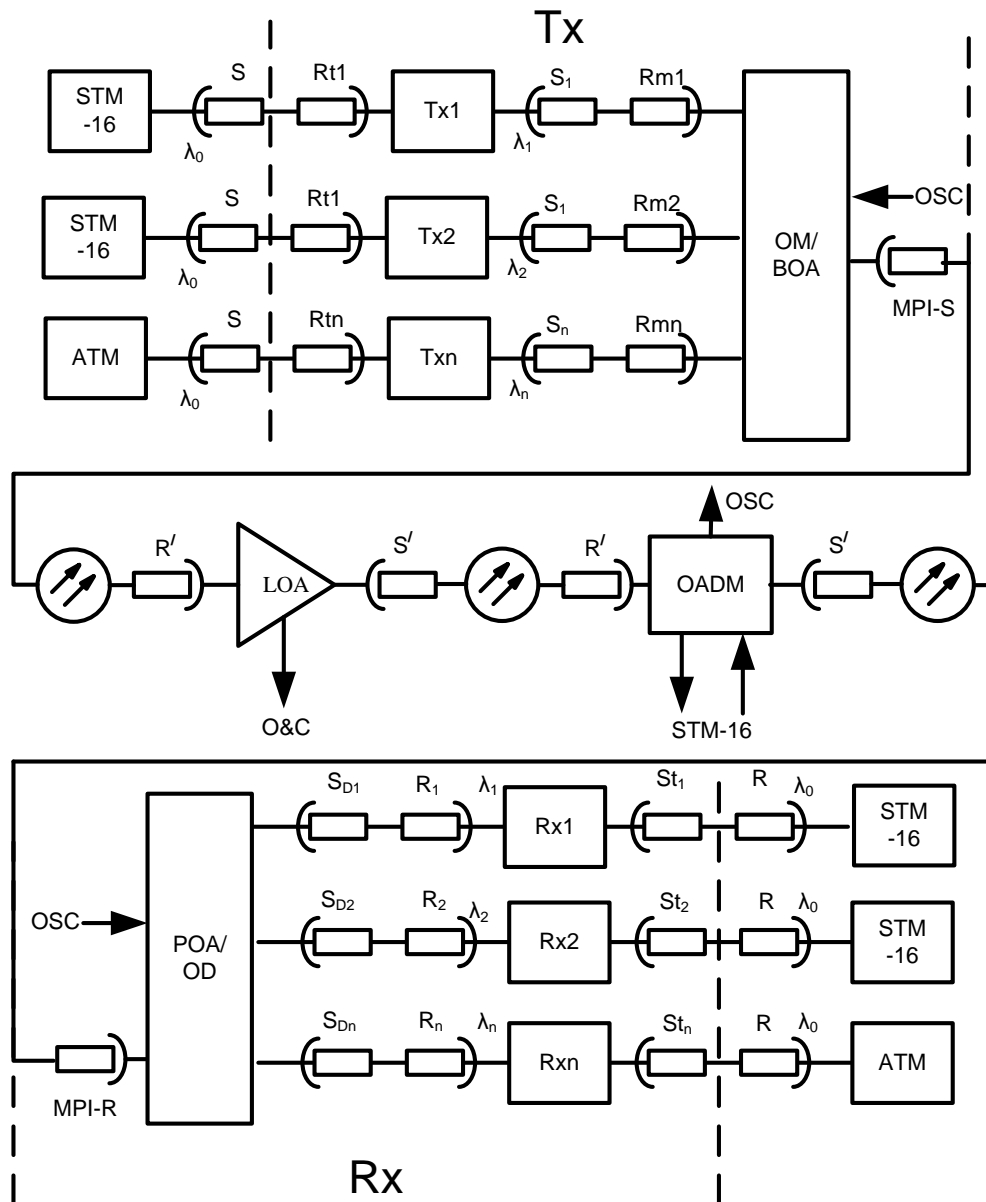
$$\Delta f_{гс} = \Delta f_{кч} + (n-1) \cdot \Delta f_{нчр},$$

где  $\Delta f_{гс}$  - спектр группового сигнала;

$\Delta f_{кч}$  - спектр канального сигнала;

$\Delta f_{нчр}$  - номинальное частотное разнесение каналов (НЧР),

Групповой сигнал усиливается оконечным оптическим усилителем ВОА (бустер), с помощью которого в интерфейсе MPI-S устанавливается необходимая общая средняя мощность линейного сигнала  $P_{лс}$ .



□ Оптические соединители

Рис. 1.1 - Структурная схема волоконно-оптической системы связи со спектральным уплотнением каналов [4]

Здесь:

$\mathbf{TX}_i$  и  $\mathbf{RX}_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) - передающие и приемные транспонеры (приемопередатчики) каждого канала  $N$ -канальной ВОСП-WDM,

$\mathbf{OM}$  - оптический мультиплексор,

$\mathbf{OA}$  - оптический усилитель,

$\mathbf{OD}$  - оптический демультиплексор,

$\mathbf{R}_{Ti}$  - контрольные точки (интерфейсы) на входе передающих транспондеров,

$\mathbf{S}_{Ti}$  - контрольные точки на выходах приемных транспондеров,

$\mathbf{S}_i$  - контрольные точки на  $\mathbf{OB}$ , на выходах оптических соединителей ( $\mathbf{OC}$ ) передающих транспондеров, соответственно для каналов  $i$ ,

**R<sub>Mi</sub>** - контрольные точки на ОВ непосредственно перед блоком ОМ./ВОА, на входе ОС, соответственно для каналов *i*,

**MPI-S** - контрольная точка (интерфейс) на ОВ сразу после блока ОМ./ВОА на выходе ОС,

**S'** - контрольная точка сразу после линейного оптического усилителя LOA на выходе ОС,

**R'** - контрольная точка на ОВ перед линейным оптическим усилителем, на входе ОС,

**MPI-R** - контрольная точка (интерфейс) на ОВ перед оптическим усилителем POA на входе оптического демодулятора (OD), на входе ОС,

**Sdi** - контрольные точки на выходе блока ОА/OD, на выходе ОС,

**OSC** - точки подключения оптического служебного канала,

**OADM** - мультиплексор ввода-вывода оптических каналов,

**S, R** - интерфейсы на выходе передатчиков и входе приемников аппаратуры STM-N (обычно  $N=16$ , либо  $64$ ), или ATM.

Главный оптический тракт (OP) содержит линейные оптические усилители (LOA), компенсирующие затухание, вносимое участками оптических волокон длиной  $l_1$ -  $l_k$ . Вместо любого из усилителей может быть включен мультиплексор ввода/вывода каналов OADM с такими же интерфейсами R' и S', как и у оптического усилителя.

Приемник (RX) содержит предварительный оптический усилитель (POA), усиливающий линейный сигнал, демультиплексор (DM), разделяющий групповой сигнал на каналные сигналы, приемные транспондеры RX<sub>i</sub>, преобразующие длины волн  $\lambda_i$ , в длину волны  $\lambda_0$ , соответствующую STM-N или ATM.

Оптический служебный канал (OSC) организуется на длине волны, лежащей вне диапазона спектра WDM. OSC вводится и выводится как в оптических передатчике и приемнике, так и в линейных усилителях и в мультиплексорах ввода/вывода (OADM) оптического тракта.

### **Частотный план ITU-T**

Оптические параметры систем WDM регламентируются рекомендациями G.692, в которых определены длины волн и оптические частоты для каждого канала. Согласно этим рекомендациям, многоволновые системы передачи работают в 3-м окне прозрачности ОВ, т.е. в диапазоне длин волн 1530...1565 нм. Для этого установлен стандарт длин волн, представляющий собой сетку оптических частот, в которой расписаны регламентированные значения оптических частот 196,1 ТГц до 192,1 ТГц с интервалами 100 ГГц и длины волн от 1528,77 до 1560,61 нм с интервалом 0,8 нм. Однако в последнее время установилась четкая тенденция уменьшения частотного интервала между спектральными каналами до 50и даже 25 ГГц, что приводит к более плотному расположению спектральных каналов в отведенном диапазоне длин волн (1530...1565 нм). Такое уплотнение получило название плотного волнового уплотнения, или DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing). Грубое спектральное уплотнение (Coarse Wavelength Division Multiplexing, CWDM) характеризуется тем, что расстояние между со-



седними каналами равно 20 нм (в некоторых случаях 25 нм). Сравнительная характеристика технологий спектрального уплотнения (СУ) представлена ниже.

	<b>CWDM</b> Грубое СУ	<b>DWDM</b> Плотное СУ	<b>HWDM, СУ</b> вы- сокой плотности
Разнос длин волн (частот) каналов	20 нм или 25 нм	< 1,6 нм (200, 100, 50 ГГц)	< 0,4 нм (25, 12,5 ГГц)
Используемые диапазоны	O,E,S,C и L	S,C и L	C и L
Типичное число каналов	18 максимум	Десятки каналов (несколько сотен)	сотни каналов
Стоимость канала	Низкая	Высокая	Высокая

В соответствии с рекомендацией ITU-T G.692.2 (рис.1.2) здесь использованы обозначения спектральных диапазонов : O – начальный , первичный (Original, 1250-1360 нм); E – расширенный (Extended, 1360-1450 нм); S – коротковолновый (Short wavelength, 146—1530 нм); C – обычный, стандартный (Conventional, 1530-1570 нм); L – длинноволновый (Long wavelength, 1570-1625 нм).

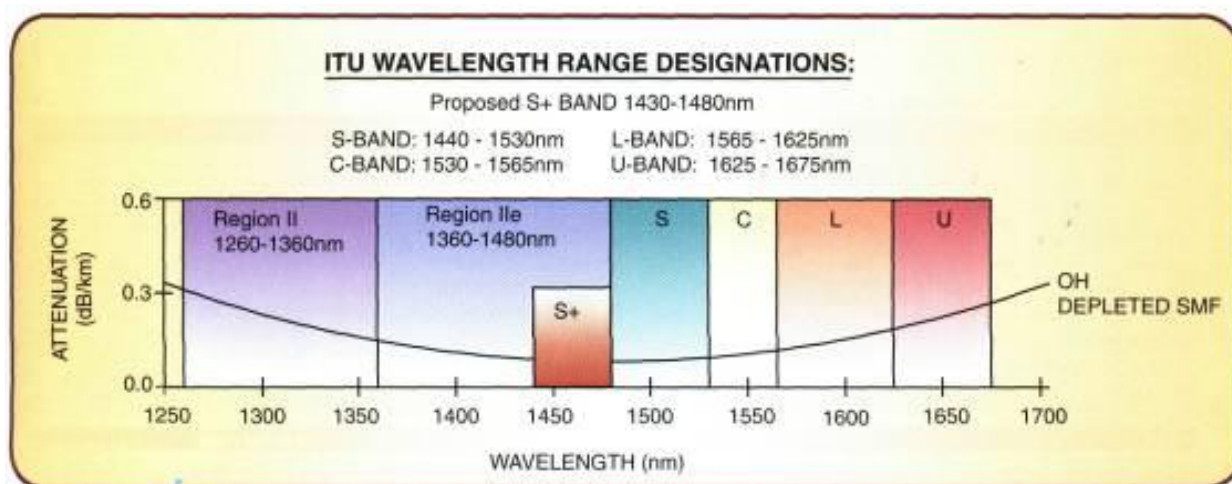


Рисунок 1.2 – Частотный план стандартизованный ITU-T.

Частотные планы ITU-T WDM (рек. МСЭ-Т G.692, DWDM (рек. МСЭ-Т G.694.1) и CWDM (рек. МСЭ-Т G.694.2) приведены в табл.1,2 и 3 Приложения А.

### Функциональные параметры компонентов WDM

**Оптический порт.** Портом является вход оптического волокна или оптического разъема (присоединенного к оптическому элементу), используемый для ввода оптической мощности.

**Коэффициент передачи.** Коэффициентом передачи между двумя портами является часть переданной между этими портами мощности.

**Матрица передачи.** Оптические свойства волоконно-оптических устройств ветвления могут быть определены в терминах матрицы коэффициентов  $n \times n$ , где  $n$  - число портов, а коэффициенты представляют часть мощности, передаваемой между назначенными портами. В общем случае матрица передачи  $T$  имеет вид:

$$T = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & \dots & T_{1j} & \dots & T_{1N} \\ T_{21} & T_{22} & \dots & T_{2j} & \dots & T_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ T_{i1} & T_{i2} & \dots & T_{ij} & \dots & T_{iN} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ T_{N1} & T_{N2} & \dots & T_{Nj} & \dots & T_{NN} \end{bmatrix}. \quad (1.1)$$

В случае оптического усилителя (пример **EDFA**) матрица передачи вырождается в один коэффициент передачи:  $T = [T_{11}]$ .

Работу многопортового  $N \times N$  распределителя можно представить используя матрицу коэффициентов передачи..

Структурная схема многопортового  $N \times N$  распределителя изображена на рис. 1.3, где  $i=1..N$  и  $j=1..N$  – номера соответствующих входных и выходных портов;  $[T_{ij}]$  – матрица передачи.

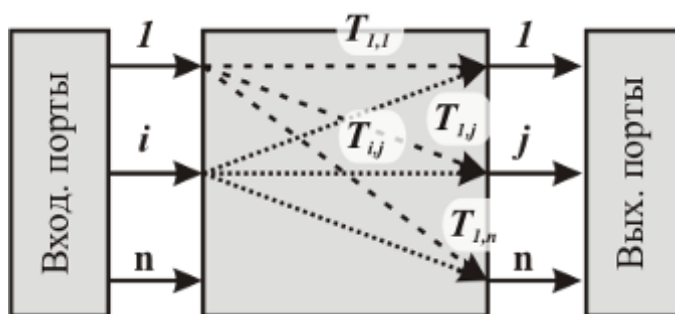


Рисунок 1.3 – Структурная схема многопортового  $N \times N$  распределителя

Демультимплексор, в отличие от распределителя имеют один вход и  $N$  выходов (рисунок 1.4), между которыми распределяется мощность входного сигнала. Следовательно, матрица передачи (1.1) трансформируется в вектор:

$$\mathbf{T} = (T_1 \quad \dots \quad T_i \quad \dots \quad T_n) \quad (1.2)$$

В данной записи опущен первый индекс, а выходы демультимплексора обозначены через индекс  $i$ .

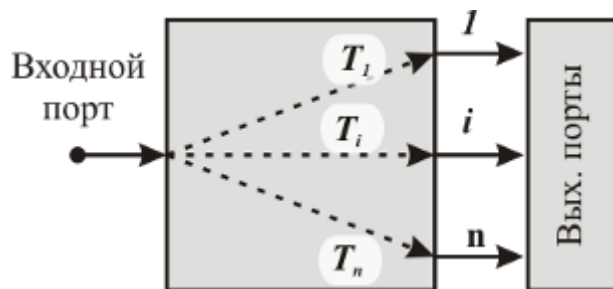


Рисунок 1.4 – Структурная схема демультимплексора

## 1.2 Принципы построения и параметры оптических усилителей

### 1.2.1 Общие сведения об EDFA

История волоконно-оптических усилителей, легированных редкоземельными элементами, восходит к 1960 годам, когда впервые был продемонстрирован оптический усилитель на стеклянном волокне с покрытием из ниодима с рабочей длиной волны 1.06 мкм. По прошествии ряда лет было выполнено объединение физических принципов, положенных в основу работы одномодового стеклянного волокна и полупроводникового лазера, создавших условия для появления волоконно-оптического усилителя на 1.55 мкм в 1987 году.

Так как оптические потери в кремниевом стеклянном волокне при  $\lambda=1.55$  мкм имеют наименьшее значение (-0.2 дБ/км), данная длина волны стала наиболее часто использоваться для дальних телекоммуникаций.

Эрбиевые волоконно-оптические усилители (EDFA) по сравнению с полупроводниковыми и рамановскими волоконными усилителями оптических сигналов обладают следующими преимуществами:

1. малые (меньше 1 дБ) вносимые потери при высоком коэффициенте усиления, который не чувствителен к поляризации усиливаемого света;
2. малые перекрестные помехи при усилении нескольких сигналов;
3. вносимые шумы на уровне квантового предела ( $\sim 3 \dots 4$  дБ);
4. спектральная зависимость усиления хорошо воспроизводится от образца к образцу и слабо зависит от температуры.

К недостаткам EDFA следует отнести:

1. возможность усиления только вблизи  $\lambda_n=1.53$  мкм;
2. необходимость мощного источника оптической накачки и селективного ответвителя;
3. невозможность интегрального исполнения и необходимость применения волокон большой длины.

### 1.2.2 Классификация EDFA по способам применения

В зависимости от применения различают предварительные усилители, линейные усилители и усилители мощности, (рисунок 1.5). [1-5]

*Предварительные усилители* (предусилители) устанавливаются непосредственно перед приемником регенератора и способствуют увеличению отношения сигнал/шум на выходе электронного каскада усиления в оптоэлектронном приемнике. Оптические предусилители часто используются в качестве замены сложных и обычно дорогих когерентных оптических приемников.

**Линейные усилители** устанавливаются в промежуточных точках протяженных линий связи между регенераторами или на выходе оптических разветвителей с целью компенсации ослабления сигнала, которое происходит из-за затухания в оптическом волокне или из-за разветвления в оптических разветвителях, ответвителях, мультиплексорах WDM. Линейные усилители заменяют оптоэлектронные повторители и регенераторы в тех случаях, когда нет необходимости в точном восстановлении сигнала.

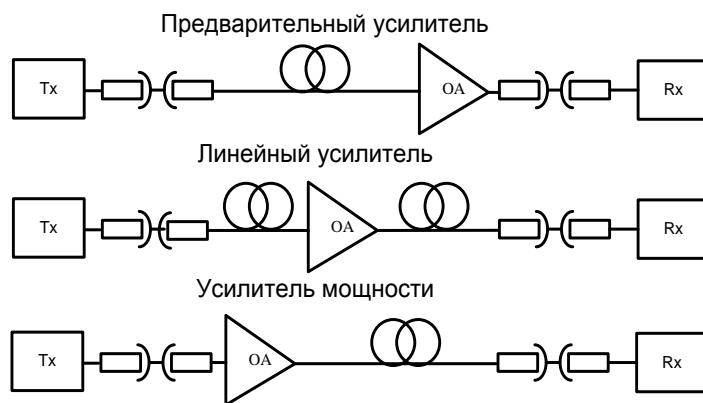


Рисунок 1.5 - Применение разных типов оптических усилителей

**Усилители мощности** (бустеры) устанавливаются непосредственно после лазерных передатчиков и предназначены для дополнительного усиления сигнала до уровня, который не может быть достигнут на основе лазерного диода. Бустеры могут также устанавливаться перед оптическим разветвителем, например при передаче нисходящего трафика в гибридных волоконно-коаксиальных архитектурах кабельного телевидения.

В таблице 1.1 указана степень значимости параметров EDFA в зависимости от типа усилителя.

Таблица 1.1 Сравнительный анализ параметров трех типов EDFA

Параметр	Предусилитель	Линейный усилитель	Усилитель мощности
Коэффициент усиления $G$	Высокий *	Средний	Низкий
Коэффициент шума NF	Низкий	Средний *	Низкий
Мощность насыщения $P_{out\ sut}$	Низкая	Средняя	Высокая *
Нелинейность **	Низкая	Низкая	Низкая
Зона усиления	Узкая	Широкая	Широкая
*- указан наиболее значимый параметр; ** - нелинейность охватывает совокупность характеристик: зависимость $G$ от $P_{in}$ , поляризационную чувствительность, перекрестные помехи между каналами			

### 1.2.3 Принцип действия EDFA

На рисунке 1.6 приведена энергетическая диаграмма для ионов  $\text{Er}^{3+}$  в кристаллической матрице кремниевого стекла. В спектре поглощения таких композитов наблюдаются пики на длинах волн  $\lambda=1.48, 0.98, 0.8, 0.667, 0.532, 0.514\mu\text{m}$ , соответствующие переходам с основного уровня  ${}^4I_{15/2}$  на уровни  ${}^4I_{13/2}$ ,  ${}^4I_{11/2}$ ,  ${}^4I_{9/2}$ ,  ${}^4F_{9/2}$ ,  ${}^4S_{3/2}$  и  ${}^4H_{11/2}$  соответственно.

Метастабильный уровень  ${}^4I_{13/2}$  является верхним для стимулирования излучательных переходов на нижний основной уровень  ${}^4I_{15/2}$ . Он заселяется как под воздействием накачки, так и в результате ступенчатой безызлучательной релаксации всех расположенных выше уровней. Его опустошение происходит под влиянием стимулирующих излучательных переходов  ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$  на длине волны  $\lambda_n = 1.53\mu\text{m}$ , (рисунок 1.6).

Моделирование поведения и характеристик EDFA осуществляется с помощью скоростных уравнений для населенностей  $n_{1,2}(r, \varphi, z, t)$  рабочих уровней  ${}^4I_{13/2}$  и  ${}^4I_{15/2}$  (двухуровневая модель: метастабильный и основной уровни, см. рисунок 1.2) и уравнений распространения для оптической мощности. Математическая модель одноволнового EDFA для стационарного режима, основанная на данных уравнениях, представлена в [2]. Модифицировав модель из [2] для случая распространения нескольких сигналов, можно получить модель многоволнового EDFA.

Хотя накачка может происходить на длинах волн любого из пиков поглощения (рисунок 1.2), наиболее распространенными диапазонами накачки являются  $\lambda_n = 1.48, 0.98 \mu\text{m}$ , на которых работают мощные и миниатюрные полупроводниковые лазеры.

**Диапазон накачки  $\lambda_p = 0.98$  мкм.** Эрбиевые волоконно-оптические усилители, накачиваемые в этом диапазоне, обладают наибольшей эффективностью накачки, а также минимальным коэффициентом шума ( $\sim 3$  дБ), близким к квантовому пределу. Выходная мощность усиленного сигнала может составлять более 500мВт при 80% дифференциальной эффективности преобразования фотонов накачки в фотоны сигнала. Эти свойства связаны с большим сечением поглощения и полным отсутствием стимулированного излучения и поглощения возбужденным состоянием  ${}^4I_{13/2}$  на длине волны накачки.

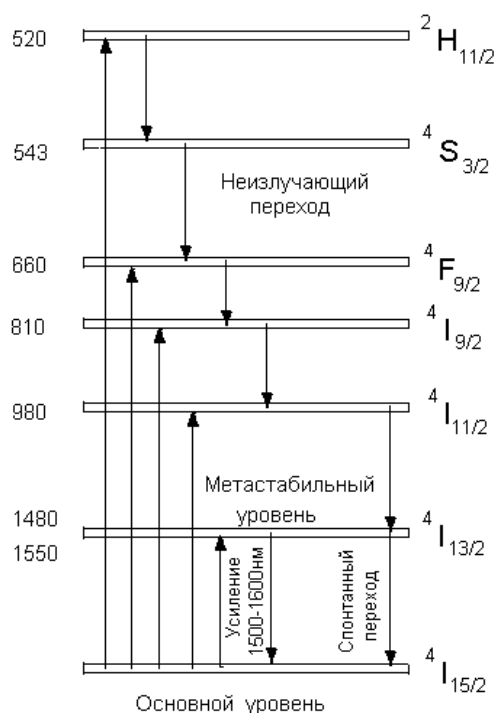


Рисунок 1.6- Диаграмма энергетических уровней для ионов  $Er^{3+}$ .

Накачка в диапазоне 0.98 мкм имеет большее практическое значение по сравнению с накачкой в диапазоне 1,48 мкм, т.к. большее отличие длин волн сигнала ( $\lambda_c \sim 1,55$  мкм) и накачки ( $\lambda_p$ ) уменьшает требования к селективным ответвителям в составе EDFA.

**Диапазон накачки  $\lambda_p = 1.48$  мкм.** Резонансная накачка EDFA непосредственно в метастабильный уровень  $^4I_{13/2}$  также приводит к появлению инверсии населенности на переходе  $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$  и дает высокий коэффициент усиления. Это является следствием частотного сдвига и большего различия спектров поглощения и излучения этого перехода, обусловленных неоднородностью заселения тонкой структуры метастабильного уровня под действием эффекта Штарка. Этот эффект обеспечивает полосу усиления до 30 нм вблизи  $\lambda = 1.53$  мкм.

Полупроводниковый диод на 1.48 мкм дает лучший квантовый коэффициент преобразования, и работает в большом диапазоне спектрального поглощения, что обеспечивает превосходную стабильность длины волны. Лазерный диод с 1.48 мкм также вносит самый низкий коэффициент шума, потому что он достигает полной инверсии населенности метастабильного энергетического уровня.

Сравнительный анализ накачки EDFA на  $\lambda_p = 1.48$  мкм и на  $\lambda_p = 0.98$  мкм приведен в таблице 1.2

Таблица 1.2 - Сравнение двух длин волн накачки для усилителей EDFA

Длина волны	1480 нм	980 нм
Источник света	InGaAsP/InP - ЛД Ф-П	InGaAs - ЛД с супер-решеткой
Эффективность усиления	5 дБ/мВт	10 дБ/мВт

Коэффициент шума	~ 5,5 дБ	3-4,5 дБ
Выходная мощность насыщения	+20 дБм	+5дБм
Диапазон длин волн накачки	широкий, 20 нм (1470-1490 нм)	узкий, 2 нм (979-981 нм)
Выходная мощность накачки	50-200 мВт	10-20 мВт

Накачка EDFA в независимости от диапазона, осуществляется по четырем основным схемам, представленным на рис. 2.2 (а-г). Элементами EDFA бегущей волны являются: волокно, легированное эрбием, селективный к длине волны оптический разветвитель и источник накачки – полупроводниковый лазер. Дополнительно используемые оптические изоляторы обеспечивают уменьшение влияния отражений от торцов волокна на режим работы источника сигнала для увеличения отношения сигнал-шум на выходе усилителя. Изоляторы ставят на обоих концах усилителя, чтобы минимизировать колебания и ASE или другие шумы, происходящие от отражений или непосредственно от системы связи. Все компоненты EDFA должны вносить как можно меньшие потери, отражение, и переходные помехи.

#### 1.2.4 Технические параметры и характеристики EDFA

Ниже определяются ключевые параметры, характеризующие EDFA: мощность насыщения, коэффициент усиления, мощность усиленного спонтанного излучения и шум-фактор.

**Мощность насыщения  $P_{s.o.}$  (saturation output power)** - определяет максимальную выходную мощность усилителя. Большее значение мощности позволяет увеличивать расстояние безретрансляционного участка. Этот параметр варьируется в зависимости от модели оптического усилителя. У мощных EDFA он может превосходить 36 дБм.

**Коэффициент усиления  $G$  (gain)** определяется из отношения мощности (полезных) сигналов на входе и выходе усилителя. Величина коэффициента усиления зависит от входной мощности и стремиться к своему максимальному пределу по мере уменьшения мощности входного сигнала

**Мощность усиленного спонтанного излучения ASE (amplified spontaneous emission).** В отсутствии входного сигнала EDFA является источником спонтанного излучения фотонов. Спектр излучения зависит от формы энергетической зоны атомов эрбия и от статистического распределения заселенностей уровней зоны. Спонтанно образованные фотоны, распространяясь по волокну в активной зоне усилителя EDFA, тиражируются, в результате чего создаются вторичные фотоны на той же длине волны, с той же фазой, поляриза-

цией и направлением распространения. Результирующий спектр спонтанных фотонов называется усиленным спонтанным излучением. Его мощность нормируется в расчете на 1 Гц и имеет размерность Вт/Гц.

Если на вход усилителя подается сигнал, от лазера, то определенная доля энергетических переходов, ранее работавшая на усиленное спонтанное излучение, начинает происходить под действием сигнала от лазера, усиливая входной сигнал. Таким образом, происходит не только усиление полезного входного сигнала, но и ослабление ASE, (рисунок 1.7).

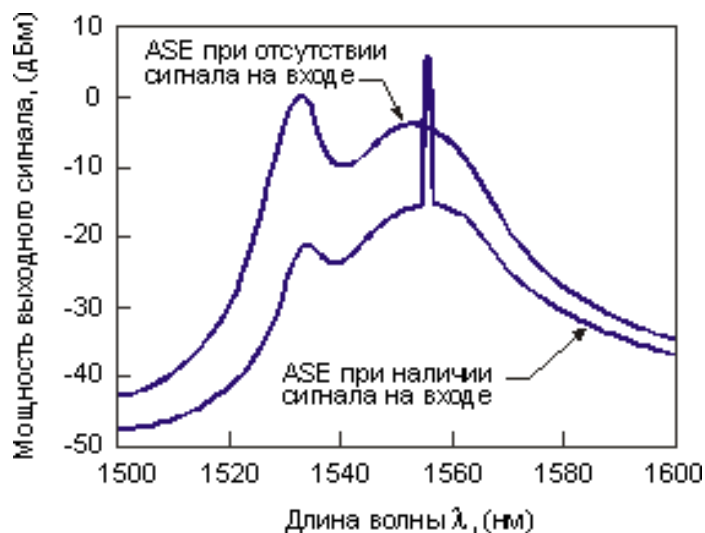


Рисунок 1.7 - Выходной спектр EDFA, снятый спектральным анализатором (ASE - спектральная плотность шума)

Оптические линии с каскадом EDFA проявляют себя лучше, когда мультиплексный сигнал представлен более узкими в спектральном отношении отдельными каналами. Использование узкополосных фильтров непосредственно перед приемным оптоэлектронным модулем, настроенных на рабочую длину волны, также помогает уменьшить уровень шума от усиленного спонтанного излучения.

Большие собственные временные постоянные EDFA - постоянная времени перехода в метастабильное состояние  $\sim 1$  мкс, время жизни метастабильного состояния  $\sim 10$  мкс - устраняют кросс-модуляцию ASE в усилителе и делает более стабильной работу каскада оптических усилителей.

Мощность усиленного спонтанного излучения связана к коэффициентом усиления формулой

$$ASE = h \cdot \nu \cdot \frac{n}{\eta} \cdot (G - 1), \quad (1.3)$$

где  $h$  - постоянная планка,  $\nu$ - частота (Гц), соответствующая длине волны в



диапазоне 1.53 – 1.56 мкм,  $n_{sp}$  - коэффициент спонтанной эмиссии,  $\eta$  - квантовая эффективность. В идеальном случае  $n_{sp} = \eta = 1$  при  $G \gg 1$ , отнесенная ко входу мощность усиленного спонтанного излучения идеального квантового усилителя просто равна  $h\nu$ , что при  $\lambda = 1.550$  мкм составляет  $1.28 \cdot 10^{-19}$  Вт/Гц в расчете на спектральную полосу 1 Гц. Размеру окна анализатора в 0,8 нм соответствует спектральное окно в 100 ГГц, что определяет приведенную к входу величину эффективной мощности усиленного спонтанного излучения  $1.28 \cdot 10^{-8}$  Вт или -48,9 дБм.

**Шум-фактор  $NF$  (noise figure)** определяется как отношение сигнал/шум на входе ( $SNR_{in}$ ) к сигнал/шум на выходе ( $SNR_{out}$ ):

$$NF = \left( \frac{P_s}{P_n} \right)_{in} / \left( \frac{P_s}{P_n} \right)_{out}, \quad (1.4)$$

Важно отметить, что мощность шума на входе является квантово-ограниченной минимальной величиной и определяется нулевыми флуктуациями вакуума  $P_{n in} = h \cdot \nu \cdot \Delta \nu$ . Мощность шума на выходе состоит из суммы мощности усиленного спонтанного излучения  $ASE_{\Delta \nu}$  и мощности шума нулевых флуктуаций вакуума, которые проходят через усилитель без изменения:  $P_{n out} = ASE_{\Delta \nu} + h \cdot \nu \cdot \Delta \nu$ . Если учесть, что  $P_{s out} / P_{s in} = G$ , то шум-фактор можно выразить через коэффициент усиления и мощность усиленного спонтанного излучения:

$$NF = \frac{1}{G} \cdot \left[ 1 + \frac{ASE}{h \cdot \nu} \right] \quad (1.5)$$

Часто при описании EDFA значение шум - фактора указывается в дБ. Типичные значения шум - фактора составляют 5,5 дБ.

### **Зависимость усиления от поляризации.**

Было установлено, что поляризационная зависимость EDFA возникает в следствии зависимости поляризации от поперечного сечения ионов эрбия в волокне из кварцевого стекла. Данное явление приводит к спаду усиления в зависимости от поляризации, известному как *polarization hole-burning* (PHB), или поляризационный провал усиления с глубиной зависящей от степени сжатия волокна:

$$PHB = 0.027C_p - 0.001C_p^2 \quad (1.6)$$

для коэффициента сжатия  $C_p < 8$  дБ.

Имеет место зависимость усиления от поляризации света лазера накачки,

но это явление проявляется при большом количестве усилителей на линии.

### **Спектральный провал усиления.**

Зависимое от мощности ослабление сигнала в определенном диапазоне длин волн носит название спектрального провала усиления *spectral hole-burning (SHB)*. Это явление имеет место в EDFA, когда сильный сигнал уменьшает среднее количество ионов, способствуя тем самым возникновению спада усиления на определенной длине волны.

Исследования показали, что снижение усиления имеет тенденцию к проявлению в области длины волны 1.55 мкм со скоростью 0.3 дБ на каждый дБ.

### **Неравномерность и спад усиления.**

Неравномерность усиления EDFA приводит к негативным последствиям в системах, чувствительных к искажениям (WDM, DWDM). Отклонение усиления определяется как отношение изменения усиления на тестовой длине волны к изменению усиления на эталонной длине волны.

### **Расширение полосы частот усилителей.**

В связи с развитием DWDM систем в направлении увеличения числа длин волн передачи, возникает необходимость увеличения диапазона длин волн усиления. В настоящее время полоса усиления для EDFA в области 1.55 мкм составляет порядка 35 нм. Однако, имея ввиду, что они имеют плоскую характеристику усиления в области 1.58 и 1.55 мкм, увеличение диапазона может быть достигнуто путем использования обеих полос посредством методов основанных на:

1. использовании EDFA усилителей с оптическими фильтрами, выравнивающими усиление;
2. двух полос частот усиления EDFA с параллельной конфигурацией;
3. каскадного соединения EDFA с частично плоским усилением и усилителя Рамана.

При выполнении селективного ослабления приходится принимать во внимание то, что энергия на других каналах также перераспределяется. В результате чего оптимизация системы становится сложной итерационной процедурой. Дополнительные сложности возникают, когда битовые скорости добавляемых или удаляемых каналов различны. Например, соотношение SNR для передачи STM-64 (10 Гбит/с) должно быть на 6 дБ больше, чем для передачи STM-16 (2,5 Гбит/с). В последнем случае, дополнительная мощность должна быть добавлена в канал STM-64.

Производители оборудования, понимая эту проблему, начинают внедрять различные самооптимизирующиеся алгоритмы в элементы полностью оптической сети. Обеспечение возможности динамического оптического балансирования по энергии между каналами важно не только для работы с EDFA на кремниевой основе, но и само по себе, поскольку позволяет значительно повысить

### 1.2.5 Основные структурные схемы EDFA

Основные структурные схемы построения EDFA представлены на рисунке 1.8 (а-г). Элементами EDFA бегущей волны являются: волокно, легированное эрбием, селективный оптический ответвитель и источник накачки – полупроводниковый лазер. Дополнительно используемые оптические изоляторы обеспечивают уменьшение влияния отражений от торцов волокна на режим работы источника сигнала для увеличения отношения сигнал-шум на выходе усилителя.

Эти схемы обладают примерно одинаковыми характеристиками усиления слабого сигнала, однако для достижения более высоких ненасыщенных выходных мощностей предпочтительнее схемы с разнонаправленной накачкой и сигналом (рис. 1.8, б) и с двумя источниками накачки (рис. 1.8, в). Эрбиевые волоконные усилители отражательного типа (рис. 1.8, г) обеспечивают более высокий дифференциальный коэффициент усиления (усиление в децибелах на каждый милливатт мощности накачки), что приводит к более эффективному использованию мощности накачки и увеличивает чувствительность EDFA к ее изменениям.

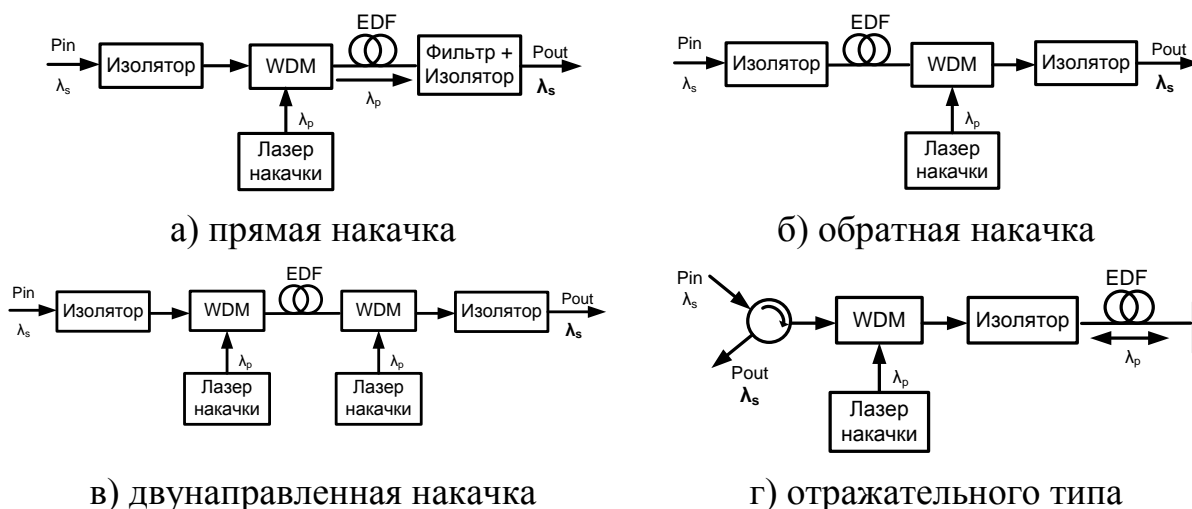


Рисунок 1.8. Основные схемы построения EDFA.

1.48-мкм диод - надежный источник, дает лучший квантовый коэффициент преобразования, и работает в большом диапазоне спектрального поглощения, что обеспечивает превосходную стабильность длины волны. Полоса поглощения легированного волокна на 0.98-мкм не такая широкая, как на 1.48-мкм. 0.98-мкм лазерный диод также вносит самый низкий коэффициент шума, потому что он достигает полной инверсии населенности метастабильного энергетического уровня. И 1.48- и 0.98-мкм лазерные диоды могут найти применение в коммерческих усилителях оптического диапазона.

Начиная с разработки первых проектов легированных эрбием волокон, несколько лабораторий работали над методами улучшения характеристик оп-

тических усилителей. Легированные волокна были исследованы с целью оптимизации спектра испускания. Например, коэффициент усиления усилителя может быть улучшен легированием волокна эрбием и германием, а спектр может быть расширен с помощью добавки алюминия.

Разность показателя преломления между сердцевиной оптического волокна и оболочкой, также как размер сердцевины волокна, может быть разработана, чтобы согласовать профиль распределения интенсивности накачки для оптимизации коэффициента усиления. Вообще, чтобы избежать слишком большой длины легированного волокна, увеличение интенсивности накачки сопровождается увеличенной концентрацией эрбия (и, следовательно, избыточными потерями). Большое усиление достигается увеличением интенсивности накачки.

С другой стороны, высокий коэффициент преобразования мощности улучшен использованием волокна с низкими избыточными потерями. Усовершенствование в избыточной потере достигается снижением концентрации эрбия, но сопровождается увеличением длины волокна. К сожалению, коэффициент усиления также уменьшается.

Наконец, изоляторы ставят на обоих концах усилителя, чтобы минимизировать колебания и ASE или другие шумы, происходящие от отражений или непосредственно от системы связи. Все компоненты EDFA должны вносить как можно меньшие потери, отражение, и переходные помехи.

Конструкция EDFA предусматривает также наличие модуля селективного к длине волны (WDM модуль) для объединения мощности сигнала и накачки.

Далее рассмотрим подробно EDFA, не уделяя внимания WDM модулю.

### **1.3 Принципы построения и параметры оптических мультиплексоров**

Любой оптический мультиплексор может быть классифицирован как по физической структуре и принципу организации спектрального разделения/объединения, так и по функции, выполняемой в ВОСП с СР (рис. 1.1). Рассмотрим эти классификации подробнее:

#### **1.3.1 Классификация MUX/DEMUX по функции**

Оптический мультиплексор/демультиплексор в ВОСП с СР может выполнять следующие *функции*:

- Терминальный мультиплексор
- Мультиплексор ввода/вывода
- Двухканальный широкополосный мультиплексор

Рассмотрим первые две функции подробнее:

- **Терминальный мультиплексор (ОТМ)**

Терминальный мультиплексор располагается на оконечной станции. На передающей стороне **ОТМ** осуществляет преобразование всех сигналов, затем мультиплексирует их в один сигнал для дальнейшего усиления и пере-

дачи. На принимающей стороне **ОТМ** демультимплексирует сигнал **WDM** и отправляет сигналы к соответствующему оборудованию.

Рассмотрим для примера ОТМ **OptiX BWS 320G** (рис. 1.9).

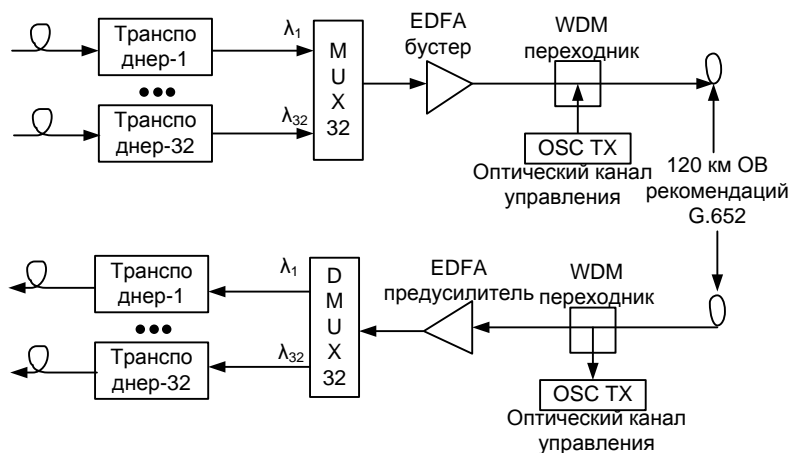


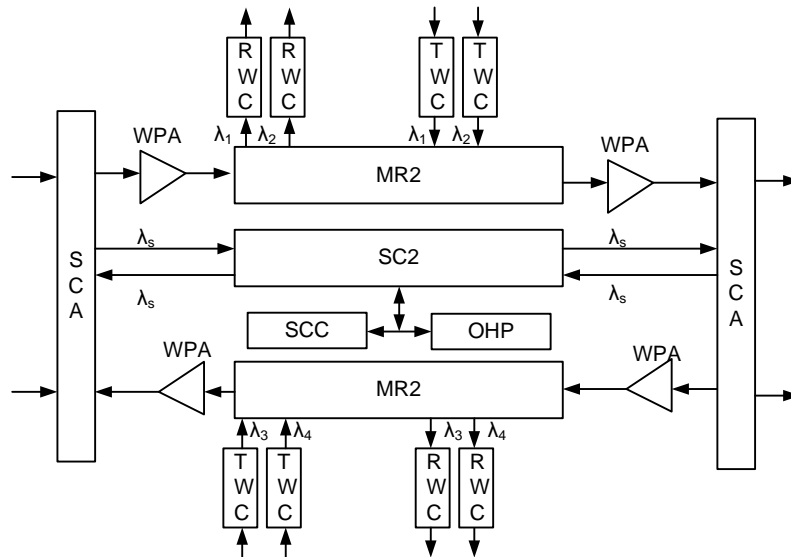
Рис. 1.9 - Структура ОТМ **OptiX BWS 320G**

Оборудование включает в себя следующие функциональные блоки: блок преобразования оптической длины волны, блок оптического мультиплексирования, блок оптического усиления, блок оптического демультимплексирования, блок обработки оптического канала управления, блок связи и управления и блок обработки заголовков.

◦ **Мультиплексор ввода/вывода (OADM)**

Мультиплексор ввода/вывода устанавливается в тракте передачи, и служит для ответвления или добавления оптических каналов. Рассмотрим для примера OADM **OptiX BWS 320G** (рис. 1.10).

Устанавливается в узле OADM, используется для ввода/вывода до 8 каналов, остальные каналы (транзитные) проходят через станцию без изменений. Выполняет функции оптического усиления и функции ввода/вывода, может осуществлять уравнивание мощности для вновь добавленных каналов и других каналов в линии, с целью обеспечить уравнивание мощности разных каналов в основном потоке. Состоит из следующих функциональных элементов: блок оптического усиления, блок обработки оптического канала управления, блок оптического мультиплексирования ввода/вывода, блок преобразования оптической длины волны (для открытых систем), блок связи и управления, и блок обработки заголовков.



MR2 - блок мультиплексирования ввода/вывода 2-х каналов, WPA - WDM блок предварительного усилителя, WBA - WDM Блок усилителя-бустера, TWC - STM-16 Передающий блок преобразования длины волны, RWC - STM-16 Принимающий блок преобразования длины волны

Рис. 1.10 - Структура OADM OptiX BWS 320G

### 1.3.2 Классификация MUX/DEMUX по физическому принципу

Выделяют следующие типы WDM устройств, обеспечивающих мультиплексирование:

○ **DEMUX на основе объемных микрооптических устройств**

а) *интерференционные фильтры*

- на основе резонатора Фабри-Перо (FP),
- на многослойных диэлектрических тонких пленках (DTF),
- на отражательных оптоволоконных решетках Брэгга (FBG);

б) *явление угловой дисперсии*

- в трехгранной призме,
- на дифракционной решетке.

**Резонатор Фабри – Перо** работает следующим образом. Он, как и любой интерференционный фильтр, настраивается на фильтрацию одной длины волны. Он разделяет поток  $\lambda_1 \dots \lambda_n$  на два потока:  $\lambda_1$  и  $\lambda_2 \dots \lambda_n$ , выделяя несущую  $\lambda_1$  из многоволнового потока, и для демультиплексирования  $n$  несущих необходимо установить каскадно  $n$  фильтров. **Аналогично резонатору FP** работает и фильтр на многослойных диэлектрических *тонких пленках*. И в этом случае для демультиплексирования  $n$  несущих необходимо установить каскадно  $n$  фильтров. Нужно учитывать, что затухание таких фильтров на центральной частоте полосы пропускания достаточно велико, что делает целесообразным их использование в WDM с 8-16 каналами. **Другой принцип** использован в фильтрах с

циркулятором и отражательными ОВ-решетками Брэгга. Схема такого демультиплексора приведена на рисунке 1.11. [5]

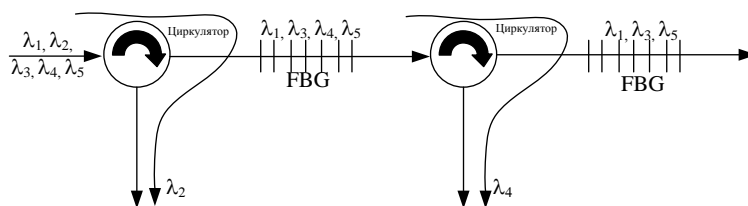


Рис. 1.11 -Схема демультиплексора WDM на основе решетк Брэгга

Здесь отражение волны определенной длины происходит от дифракционной решетки Брэгга соответствующего периода, сформированной в одномерном ОВ. Отраженная волна транслируется циркулятором. Так как решетка Брэгга рассчитана на фиксированную длину волны, то для демультиплексирования  $n$  несущих необходимо сформировать каскад из  $n$  отражательных решеток Брэгга, настроенных на соответствующие длины волн.

**Технология мультиплексирования на основе явления угловой дисперсии** использует совершенно другие физические принципы. Здесь входной коллимированный пучок падает на диспергирующий элемент и пространственно разделяется им на несколько пучков, в зависимости от длины волны несущей. Эти пучки, расходящиеся под различными углами, фокусируются и собираются отдельными приемными оптическими элементами. На выходе (в фокальной плоскости) этих элементов формируются изображения входного пучка, размеры которых (с помощью микролинзовых систем) юстируются так, чтобы они соответствовали диаметру сердцевины приемного (выходного) ОВ (рис. 1.12). [5]

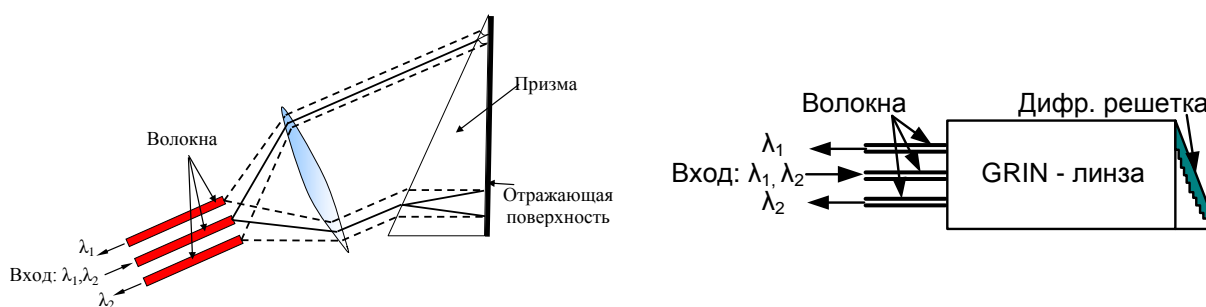


Рисунок 1.12 Схема демультиплексора WDM (а) – на отражательной призме, (б) – на отражательной плоской решетке

- **DEMUX на основе планарных интегральных устройств**
  - а) оптоволоконные направленные разветвители (ОВНР);
  - б) интерферометры Маха-Цендера (MZI);
  - в) дифракционную решетку на массиве волноводов (AWG).

**Несмотря** на значительные достижения в области технологии мультиплексирования на основе объемных микрооптических устройств, общая тенденция развития волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) и отдельных ее устройств (в первую очередь мультиплексоров плотных и высокоплотных

WDM) состоит в совершенствовании планарных технологий, которые органично сочетались бы с технологиями, используемыми при создании оптических интегральных схем (ОИС).

Наиболее простым и легко реализуемым в области планарных технологий вариантом мультиплексора WDM является мультиплексор на оптоволоконных направленных разветвителях (ОВНР). Такая схема построена путем каскадного соединения однотипных ячеек разветвителей типа  $2:1$  (два входа – один выход), дающего в итоге мультиплексор  $n:1$ .

Такой метод построения схемы имеет очевидный недостаток – высокий уровень вносимых потерь (теоретически 3 дБ/каскад). Развитием этого решения является использование интерферометров Маха-Цендера (MZI), для демультиплексоров вместо разветвителей.

**Рассмотрим** оптические мультиплексоры с использованием планарных волноводов. Существуют различные конфигурации устройств на основе массива планарных волноводов, например, таких как:

- многопортовые разветвители типа «звезда»;
- схемы планарных интегрально-оптических волноводных структур на основе призмы, дифракционной решетки проводящего типа, отражательной дифракционной решетки, эшелона Майкельсона;
- разветвитель с плоским отражающим зеркалом;
- Arrayed Waiveguide Grating (AWG);

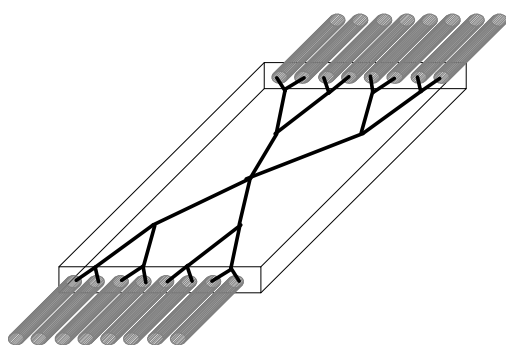


Рисунок 1.13 – Многопортовый разветвитель типа «звезда»

В ранних работах по разработке устройств WDM использовались интегральные схемы на стекле. Канальные волноводы оптических объединителей и разделителей, формируются путем ионообмена за счет диффузии легирующего материала с поверхности в подповерхностный слой стекла. В качестве легирующих присадок для натрий-кальциевых стекол использовали ионы калия, серебра, свинца и титана. Таким путем получали многопортовые разветвители типа «звезда» (рис. 1.13).

В разработках с излучением на длинах волн в области 0,85 мкм для спектрального разделения каналов, использовались разделители каналов, аналогичные мультиплексорам/демультиплексорам, на выходе которых формировались узкополосные интерференционные фильтры, обеспечивающие селекцию сигнала требуемой длины волны. Недостатком такой схемы являлось сильное ослабление интенсивности сигналов на выходе вследствие деления каждого из сигналов на  $n$  каналов.

Для устранения этого недостатка необходимо было разработать планарное устройство разделения спектральных составляющих магистрального световода по отдельным каналам. С этой целью было предложено использовать в интегральных демультиплексорах планарные коллимирующие линзы и различные



диспергирующие элементы. Схемы планарных интегрально-оптических волноводных структур для спектрального разделения каналов показаны на рис. 1.14. [5]

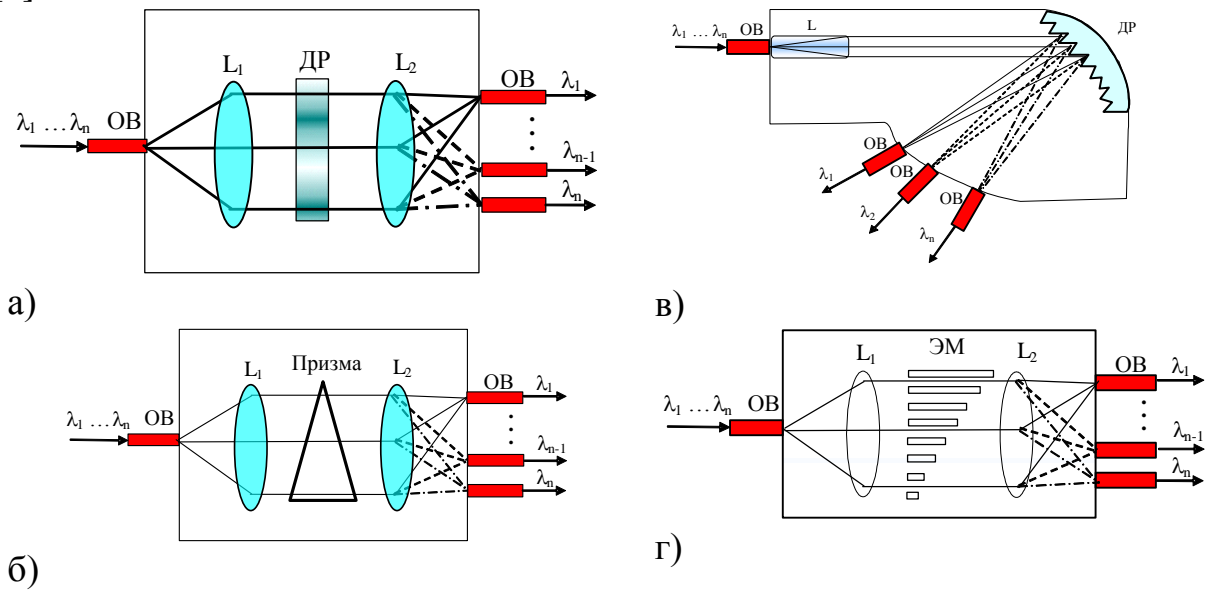


Рисунок 1.14 - Схемы планарных интегрально-оптических волноводных структур (на основе а - призмы, б - дифракционной решетки проводящего типа, в - отражательной дифракционной решетки, г - эшелона Майкельсона)

Оказалось, что такие устройства имеют большие потери, слабое деление каналов и большие перекрестные помехи, обусловленные взаимодействием спектральных составляющих. Предельное число разделяемых каналов в подобных устройствах не превышало 10.

Более плодотворной оказалась идея разделения каналов с помощью системы фазированных каналных волноводов, формирующих эшелон Майкельсона (рис. 1.15). В зарубежной литературе ФБР называется упорядоченной волноводной решеткой (AWG - arrayed waveguide grating).

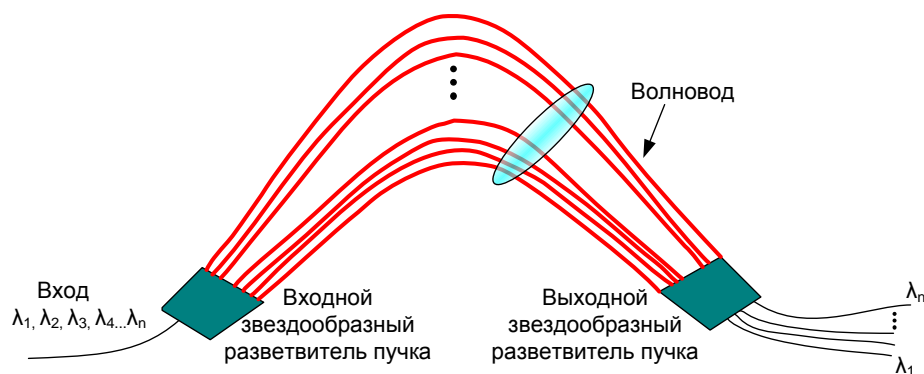


Рисунок 1.15 - Структура AWG демультиплексора

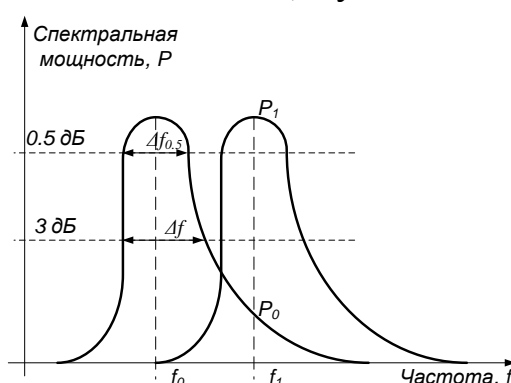
Устройство спектрального разделения на основе AWG состоит из следующих составных элементов: входного магистрального световода, входной фокусирующей системы (объединитель каналов), фазированной (упорядоченной) волноводной решетки, выходной фокусирующей системы (пространственного делителя каналов), отводящих волноводов спектрально разделенных каналов, выходных волноводов. Все устройство выполнено по планарной инте-

грально-оптической технологии на кремниевой подложке и снабжено устройством стыковки с отводящими волоконными световодами или линейкой фотоприемников. Особенностью такого устройства спектрального разуплотнения каналов является его работа в одномодовом режиме, т.е. все каналные волноводы должны поддерживать только одну продольную оптическую моду.

### 1.3.3 Технические параметры и характеристики мультплексоров

(За основу взят стандарт ITU-T G.671)

Ниже приведены спецификации параметров, которые в настоящее время используются для описания мультиплексора в сетях уплотнения WDM. Определения некоторых из этих параметров также даются Исследовательской лабораторией Bell Communication GR-2883-CORE, Пункт 1.



1. **Полоса пропускания канала (BW)** - Интервал частот, в котором значение амплитудно-частотной характеристики аналогового передающего оптоэлектронного модуля больше или равно половине его максимального значения. Типовые полосы пропускания в текущих системах уплотнения WDM варьируются от 1.0 до 8.0 нм.

2. **0,5 дБ полоса частот ( $BW_{0,5}$ )** — это ширина спектра, в пределах которой разница между пиковой переданной мощностью и переданной мощностью в любой точке составляет менее 0,5 дБ. По соглашению 0,5 дБ полоса частот обычно равна разности максимальной и минимальной длин волн в полосе пропускания каждого канала.

3. **Вносимые потери (IL)** Вносимые потери - уменьшение оптической мощности между входным и выходным портами пассивного элемента в дБ, определяемое как:

$$IL = -10 \lg(P_1 / P_0)$$

где  $P_0$  - оптическая мощность, вводимая во входной порт,

$P_1$ - оптическая мощность, полученная из выходного порта.

Максимальные и минимальные вносимые потери являются соответственно верхним и нижним пределами вносимых потерь рассматриваемого устройства и применяются во всем диапазоне длин волн, определенном для данного фильтра или WDM MUX. Под типичными вносимыми потерями понимается ожидаемое значение вносимых потерь, измеренное для определенной

центральной длины волны. Обычно максимальные вносимые потери измеряются для всех длин волн в области полосы пропускания канала, в 0,5 дБ полосе частот и в полном диапазоне рабочих температур. Обычно это значение равно вносимым потерям в точке пиковой мощности плюс 0,5 дБ.

3. **Переходные помехи** ( $P_j$ ) — показывают, разнос оптических каналов мультиплексором. ПП на  $j$ -канал численно равны отношению мощности всех каналов кроме  $j$ -того в  $j$ -канале на мощность  $j$ -канала.

$$P_j = \frac{\sum_{i=1, i \neq j}^N |T_i|^2}{|T_j|^2}$$

где  $T_j$  - нормированный коэффициент передачи порта.

4. **Изоляция соседнего канала** определяет степень, до которой нежелательные каналы ослабляются на каждом канале добавления/устранения, и напрямую связана с ухудшением отношения сигнал-шум и битовой скорости, обусловленным присутствием многочисленных оптических несущих. Вследствие того, что идеальная форма спектра сходна с гауссовской кривой, каналы или канал, расположенный ближе всего к каналу добавления/устранения, имеет самую плохую изоляцию. Поэтому изоляция соседнего канала представляет наихудший случай и измеряется в пределах всех соседних полос пропускания каналов.

5. **Канальный интервал** ( $\Delta f_k$ ) представляет собой расстояние (интервал) между центральными длинами волн соседних каналов и является системным параметром, определяющим параметры компонента.

Помимо указанных параметров, следует также учитывать параметры, характеризующие стабильность каждого мультиплексора при воздействии внешних факторов, таких, как температура и состояние поляризации. Это связано с тем, что при достаточно большом влиянии данных факторов полосу пропускания канала мультиплексора необходимо выбирать шире по сравнению с вариацией центральной длины волны лазера, что, в свою очередь, приведет к необходимости увеличения канальных интервалов. В связи с этим учитываются следующие три типа параметров.

7. **Поляризационно – зависимые потери (PDL)** - потери соответствующие максимальной вариации вносимых потерь, вызванной вариацией состояния поляризации, рассматриваемой на множестве всех возможных состояний поляризации.

Для MUX/DEMUX представляют собой потери, возникающие вследствие того, что спектральное функционирование каждого порта мультиплексора зависит от входного состояния поляризации, которое неопределимо в лазерных системах передачи. Это значение потерь имеет самую большую вариацию в пределах полосы пропускания каждого порта мультиплексора.

6. **Температурная стабильность длины волны.** Стабильность центральной длины волны определяет ее максимальное изменение применительно к каждому порту в пределах предполагаемого диапазона рабочих температур.

7. **Тепловая стабильность** — это параметр, который представляет собой максимальную вариацию потерь вставки при изменении рабочей температуры в пределах полосы пропускания каждого порта.

Рассмотрим для примера типовые показатели этих параметров для различных видов терминальных мультиплексоров/демультиплексоров (Табл. 1.3).

Таблица 1.3 - Сравнение технологий WDM

Параметр	Интерф. фильтр	BG фильтр	AWG	Дифр. решетка
Канальный интервал, ГГц	>100	>100	>25	>10
Изменение $\lambda$	угловая	деформационная	температурная	температурная
Потери	неоднородные	Низкие, неоднородные	Очень низкие	Очень низкие
Переходная помеха от соседнего канала, дБ	-25 ~ -35	-30 ~ -35	-25 ~ -35	-25 ~ -35
Переходная помеха от всех каналов, дБ	Очень низкая	Очень низкая	-25 ~ -35	a <-32
PDL, дБ	0.25	превосходные	0.5	0.5
Конструкторско-формулирование	Дискретная структура	Дискретная структура	Интегральная схема	Интегральная схема
Размер	Большой	Большой	Маленьк.	Маленьк.
Надежность	хорошая	Плохая (регуляр.)	Очень хорошая	хорошая
Цена за канал	\$500	\$3000	\$50	\$30
Примечание	Для малого кол-ва каналов	Для малого кол-ва каналов	Для 16+ каналов	Для 16+ каналов

Требования к параметрам оптических мультиплексоров представлены в приложении Б. В приложении В приведены характеристики выпускаемого промышленностью мультиплексорного и усилительного оборудования [6-11].

Ниже, в разделах 2-5 представлены методические материалы компьютерного лабораторного практикума по расчету и моделированию EDFA оптических усилителей, оптических мультиплексоров на интерференционных и Фабри-Перо фильтрах, голографических дифракционных и AWG структурах [12-15].

## Список литературы

1. Заславский К.Е. Волоконно-оптические системы передачи со спектральным уплотнением: Учебное пособие для вузов. - Новосибирск: СибГУТИ, 2005. – 136 с.
2. Довольнов Е.А., Кузнецов В.В., Миргород В.Г., Шарангович С.Н. Мультиплексорное и усилительное оборудование многоволновых оптических систем передачи: учеб. пособие. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2016. – 156 с.
3. Волоконно-оптические сети и системы связи / О.К. Складаров. – С-Пб : Лань, 2010. – 272 с.
4. Фокин В.Г. Оптические системы передачи и транспортные сети. Учебное пособие .- М.: Эко-Трендз, 2008. -288 с.
5. Складаров О К. Волоконно-оптические сети и системы связи. Учебное пособие.- С-Пб : Лань, 2010. – 272 с.
6. Alcatel-Lucent 1696 Metrospan (Metro WDM) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www1.alcatel-lucent.com>. (дата обращения 18.09.2022).
7. WaveStar® OLS 1.6T, Lucent's core DWDM system [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.alcatel-lucent.com/wps/portal/products>. (дата обращения 18.09.2022).
8. Nortel's Wavelength Division Multiplexer (WDM) Portfolio [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://products.nortel.com>. (дата обращения 18.09.2022).
9. Оборудование оптической передачи OptiX [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.huawei.ru/products/catalog/optix> (дата обращения 18.09.2022).
10. SpectralWave 40/80. Overview [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.nec.co.uk/Spectral\\_Wave\\_4080.aspx](http://www.nec.co.uk/Spectral_Wave_4080.aspx) (дата обращения 18.09.2022).
11. ECI Telecom Technologies [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.eci-telecom.com> . (дата обращения 18.09.2022).
12. Лялюк А.П., Миргород В.Г., Шарангович С.Н. Компьютерная лабораторная работа «Исследование оптического мультиплексора на основе массива планарных волноводов». - М.: ВНИИЦ, 2006. - № 50200501791. (Свидетельство №5495 об отраслевой регистрации разработки «Отраслевом фонде алгоритмов и программ» от 20.12.2005. Москва.).
13. Кузнецов В.В., Шарангович С.Н. Компьютерная лабораторная работа «Исследование оптических демультиплексоров на основе интерференционных фильтров и фильтров Фабри-Перро» .- М.: ВНИИЦ, 2006. - № 50200501792. (Свидетельство №5496 об отраслевой регистрации разработки в «Отраслевом фонде алгоритмов и программ» от 20.12.2005. Москва.).
14. Довольнов Е.А., Шарангович С.Н. Компьютерная лабораторная работа «Исследование многоволновых эрбиевых волоконно-оптических усилителей - М.: ВНИИЦ, 2006. - № 50200501793 . (Свидетельство №5497 об от-

- раслевой регистрации разработки в «Отраслевом фонде алгоритмов и программ» от 20.12.2005. Москва. ).
15. Кузнецов В.В., Шارانгович С.Н. Компьютерная лабораторная работа «Исследование оптических демультимплексов на основе наложенных голограмм в фотополимерном материале» - М.: ВНИИЦ, 2005. - № 50200501796. (Свидетельство №5500 об отраслевой регистрации разработки в «Отраслевом фонде алгоритмов и программ» от 20.12.2005. Москва.).
  16. Оптические телекоммуникационные системы. Учебник для вузов/ В. Н. Гордиенко, В. В. Крухмалев, А. Д. Моченов, Р. М. Шарафутдинов . Под ред. Профессора ; под ред В. Н. Гордиенко. – М: Горячая линия – Телеком, 2011. – 368 с.
  17. Листвин В.Н. DWDM системы: научное издание / Листвин В.Н. Трещиков В.Н.. – М. : Издательский Дом «Наука», 2013. – 300

## **2 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1 КОМПЬЮТЕРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОВОЛНОВЫХ ЭРБИЕВЫХ ВОЛОКОННО- ОПТИЧЕСКИХ УСИЛИТЕЛЕЙ**

### **СОДЕРЖАНИЕ**

1. ВВЕДЕНИЕ.....	32
2. Теоретический материал по EDFA .....	32
2.1. Математическая модель многоволнового EDFA.....	32
2.2. Зависимости коэффициента усиления и оптимальной длины допи- рованного волокна от параметров сигналов и накачки для EDFA с прямой накачкой.....	35
2.3. Учет температурной зависимости и схемы накачки.....	38
3. Рекомендации по выполнению работы.....	38
4. Описание программного обеспечения.....	42
Список литературы.....	53
ПРИЛОЖЕНИЕ А Основные характеристики усилителей EDFA произво- дителя THORLABS (Япония, ).....	53

**Цель работы:** изучение принципов действия и компьютерное исследование основных характеристик и параметров многоволновых эрбиевых волоконно-оптических усилителей для различных схем накачки - прямой, обратной и двунаправленной.

## 1 Введение

В последние годы произошел скачок в развитии технологий оптических усилителей и спектрального уплотнения. Сегодня практически все ведущие фирмы в области средств связи осваивают промышленный выпуск аппаратуры с использованием спектрального уплотнения и волоконно-оптических усилителей. Легко объяснить с точки зрения техники, что эти два направления стоят рядом. Эффективное мультиплексирование и фильтрация при спектральном уплотнении хотя и позволяют увеличить пропускную способность линии передачи, но вносят при этом дополнительные оптические потери, без компенсации которых значительно сокращается длина регенерационного участка. В качестве компенсатора этих потерь используется волоконно-оптический усилитель [1].

Легированные эрбием волоконные усилители (*Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA*), работающие в области 1550 нм, успешно используются в современных волоконно-оптических системах передачи (ВОСП) в качестве предварительных и линейных усилителей, а также усилителей мощности. Применение EDFA позволяет передавать оптические сигналы на расстояние более 1000 км без использования электронных повторителей.

## 2 Теоретический материал по EDFA

### 2.1 Математическая модель многоволнового EDFA

Моделирование поведения и характеристик EDFA осуществляется с помощью скоростных уравнений для населенностей  $n_{1,2}(r, \varphi, z, t)$  рабочих уровней  ${}^4I_{15/2}$  и  ${}^4I_{13/2}$  (двухуровневая модель) и уравнений распространения для оптической мощности  $P(z)$ .

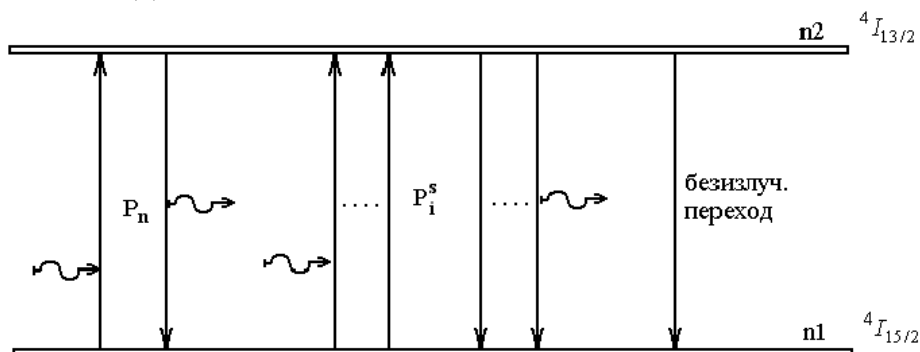


Рисунок 2.1 - Диаграмма рабочих уровней при наличии накачки и информационных сигналов.

На рис. 2.1 схематически показана диаграмма рабочих уровней при наличии накачки и нескольких информационных сигналов.

Записав исходные уравнения модели из [2] для случая распространения



нескольких сигналов и используя методы решения поставленной задачи и обозначения, описанные в [2], можно получить уравнения, характеризующие поведение многоволнового EDFA.

Запишем уравнение, описывающее скорость изменения концентрации частиц для верхнего уровня  ${}^4I_{13/2}$ :

$$\begin{aligned} \frac{dn_2}{dt} = & \sum_{i=1}^N \frac{P_i^s \cdot i_i^s}{h \cdot f_i^s \cdot S_f} \left[ \sigma_{ai}^s n_1(r, \varphi, z, t) - \sigma_{ei}^s n_2(r, \varphi, z, t) \right] + \\ & + \frac{P_p \cdot i_p}{h \cdot f_p \cdot S_f} \left[ \sigma_{ap} n_1(r, \varphi, z, t) - \sigma_{ep} n_2(r, \varphi, z, t) \right] - \frac{n_2(r, \varphi, z, t)}{\tau}, \end{aligned} \quad (2.1)$$

где  $P_i^s$ ,  $P_p$ ,  $i_i^s$ ,  $i_p$  и  $f_i^s$ ,  $f_p$  - мощности, нормированные интенсивности и частоты оптического излучения  $i$ -го информационного сигнала ( ${}^s_i$ ) и накачки ( ${}_p$ ) в сечении  $z$ ;

$$P(z) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} I(r, \varphi, z) r dr d\varphi, \quad (2.2)$$

$$i(r, \varphi, z) = \frac{I(r, \varphi, z)}{P(z)}, \quad (2.3)$$

$I(r, \varphi, z)$  - распределение интенсивности оптического излучения в волокне,  $\sigma_{ai}^s$ ,  $\sigma_{ap}$  и  $\sigma_{ei}^s$ ,  $\sigma_{ep}$  - эффективные сечения поглощения и излучения, описывающие свойства ионов  $Er^{3+}$  в матрице стекла соответствующие частотам  $i$ -го информационного сигнала и накачки,

$$\alpha(\lambda) = \sigma_a(\lambda) \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} i(r, \varphi, z) n_t(r, \varphi, z) r dr d\varphi = \sigma_a(\lambda) \Gamma(\lambda), \quad (2.4)$$

$$g^*(\lambda) = \sigma_e(\lambda) \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} i(r, \varphi, z) n_t(r, \varphi, z) r dr d\varphi = \sigma_e(\lambda) \Gamma(\lambda), \quad (2.5)$$

$\alpha(\lambda)$  и  $g^*(\lambda)$  – спектральные коэффициенты поглощения и усиления активной среды;

$\Gamma = n_t S_E / S_f = n_t d_E^2 / d_f^2$  – интеграл перекрытия между распределениями оптической интенсивности  $i_i^s$  или  $i_p$  и ионов эрбия  $Er^{3+}$ ;

$d_E$  - диаметр области, легированной эрбием;

$d_f$  - диаметр сердцевины волокна;

$n_t(r, \varphi, z, t) = n_1(r, \varphi, z, t) + n_2(r, \varphi, z, t)$  - общее число частиц (концентрация эрбия).

Графики зависимостей  $\sigma_a$  и  $\sigma_e$  представлены на рис. 2.2.

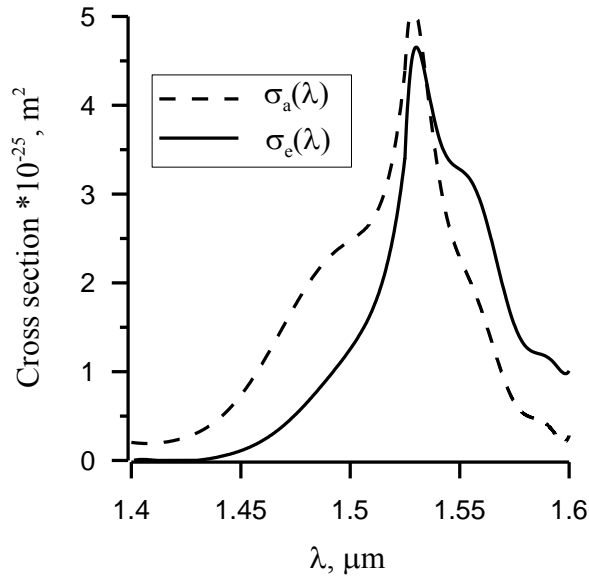


Рисунок 2.2 - Эффективные сечения поглощения ( $\sigma_a$ ) и излучения ( $\sigma_e$ ).

Дифференциальные уравнения, описывающие распространение оптической мощности по волокну при условии  $n_t(r, \varphi) = n_t = \text{const}$  при  $r < b$  и  $n_t(r, \varphi) = 0$  при  $r > b$  ( $b$  – радиус области легирования сердцевины оптического волокна), имеют вид:

$$\frac{dP_k}{dz} = \left[ U_k \frac{\alpha_k + g_k^*}{\Gamma'_k} P_k + V_k \frac{g_k^*}{\Gamma'_k} m h f_k \Delta f_k \right] \int_0^{2\pi b} \int_0^{2\pi} \frac{n_2(r, \varphi, z, t)}{n_t} i_k r dr d\varphi - (\alpha_k + l_k) P_k \quad (2.6)$$

где индекс  $k$  принимает значение  $(s_i)$  – для волны  $i$ -го информационного сигнала,  $(p)$  – для волны накачки;  $U_k, V_k = \pm 1$  соответствует прямому и обратному направлению распространения излучения;  $\Gamma'_k = \Gamma'_k / n_t = d_E^2 / d_f^2$ ;  $l_k$  – коэффициент нерезонансного поглощения в сердцевине, обусловленного наличием группы ОН, а также рассеиванием вследствие расстеклования сердцевины с высоким значением показателя преломления или низким содержанием ионов  $Er^{3+}$ ;  $m = 2$  – число мод одномодового оптического волокна с учетом поляризационного вырождения. [

Уравнение (2.6) записано для излучения сигнала, накачки и усиленной спонтанной эмиссии (ASE). Для узкополосных излучений сигнала и накачки  $\Delta f \rightarrow 0$ , а для широкополосной ASE равно частотному шагу, используемому в вычислениях. Первое слагаемое в уравнении отвечает за усиление – чем больше эффективное сечение, диаметр сердцевины волокна и инверсия населенности, тем больше приращение сигнала. Второе слагаемое имеет обратное действие (нерезонансное поглощение и поглощение). Третье слагаемое усиливает сигнал, но отвечает за спонтанное излучение, тем самым учитывает шумы, вносимые усилителем. Т.о. шумы тем больше, чем больше инверсия населенности, эффективное сечение излучение.

Так как не представляется возможным получить аналитическое решение уравнений (2.1) и (2.6) в общем случае, поэтому используют численные методы решения.

В непрерывном режиме и при модуляции оптической несущей с частото-

той  $f > 10$  кГц для описания EDFA достаточно исследовать стационарный режим, т.о. найдем решение системы уравнений (2.4), (2.10) при  $\partial/\partial t=0$ . А также будем считать, что усиленная спонтанная эмиссия пренебрежимо мала, тогда уравнения (2.6) интегрируются при  $m \cdot h \cdot f \cdot \Delta f \rightarrow 0$ .

Рассмотрим случай, когда интенсивность излучения равномерно распределена по площади сечения волокна ( $I(r, \varphi, z) = I(z)$ ). Учитывая все выше сказанное, уравнения, описывающие поведение EDFA можно упростить и привести к виду:

$$P(z) = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty I(z) r dr d\varphi = I(z) S_f, \quad (2.7)$$

$$i(r, \varphi, z) = \frac{I(r, \varphi, z)}{P(z)} = \frac{1}{S_f}, \quad (2.8)$$

где  $S_f = \pi d_f^2/4$  - площадь поперечного сечения ОВ.

Подставляя (2.7), (2.8) в уравнение (2.1) и, учитывая, что  $\partial/\partial t=0$ , получаем

$$0 = n_1 \left[ \frac{P_p \sigma_{ap}}{f_p} + \sum_{i=1}^N \frac{P_i^s \sigma_{ai}^s}{f_i^s} \right] - n_2 \left[ \sum_{i=1}^N \frac{P_i^s \sigma_{ei}^s}{f_i^s} + \frac{P_p \sigma_{ep}}{f_p} + \frac{h S_f}{\tau} \right]. \quad (2.9)$$

Далее, учитывая  $n_t(r, \varphi, z, t) = n_1(r, \varphi, z, t) + n_2(r, \varphi, z, t)$ , выразим из (2.9)  $n_{21} = n_2/n_t$ :

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_t} = \frac{\frac{P_p \sigma_{ap}}{f_p} + \sum_{i=1}^N \frac{P_i^s \sigma_{ai}^s}{f_i^s}}{\frac{h S_f}{\tau} + \frac{P_p (\sigma_{ap} + \sigma_{ep})}{f_p} + \sum_{i=1}^N \frac{P_i^s (\sigma_{ai}^s + \sigma_{ei}^s)}{f_i^s}}. \quad (2.10)$$

Преобразуем уравнение (2.6), принимая во внимание все выше изложенные условия, делая необходимые замены и подставляя выражение (2.10).

$$\begin{aligned} \frac{dP_k}{dz} &= U_k \frac{\alpha_k + g_k^*}{\Gamma_k'} P_k \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{n_2(r, \varphi, z, t)}{n_t} i_k r dr d\varphi - P_k (\alpha_k + l_k) = \\ &= P_k \left[ U_k n_t n_{21} (\sigma_{ak} + \sigma_{ek}) - l_k - \sigma_{ak} n_t d_E^2/d_f^2 \right] \end{aligned} \quad (2.11)$$

Распишем выражение (2.15) в систему уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dP_p}{dz} &= P_p \left[ U_p n_t n_{21} (\sigma_{ap} + \sigma_{ep}) - l_p - \sigma_{ap} n_t d_E^2/d_f^2 \right] \\ \frac{dP_1^s}{dz} &= P_1^s - P_1^s \left[ U_1^s n_t n_{21} (\sigma_{a1}^s + \sigma_{e1}^s) - l_1^s - \sigma_{a1}^s n_t d_E^2/d_f^2 \right] \\ &\dots\dots\dots \\ \frac{dP_N^s}{dz} &= P_N^s - P_N^s \left[ U_N^s n_t n_{21} (\sigma_{aN}^s + \sigma_{eN}^s) - l_N^s - \sigma_{aN}^s n_t d_E^2/d_f^2 \right] \end{aligned} \right. , \quad (2.12)$$

$$\text{где } n_{21} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\frac{P_p \sigma_{ap}}{f_p} + \sum_{i=1}^N \frac{P_i^s \sigma_{ai}^s}{f_i^s}}{\frac{hS_f}{\tau} + \frac{P_p (\sigma_{ap} + \sigma_{ep})}{f_p} + \sum_{i=1}^N \frac{P_i^s (\sigma_{ai}^s + \sigma_{ai}^s)}{f_i^s}}.$$

Таким образом, мы получили систему дифференциальных уравнений, описывающих работу многоволнового EDFA для стационарного режима, без учета усиленной спонтанной эмиссии.

Из вышеприведенных выражений (2.12) явно не прослеживается температурная зависимость, но ее можно учесть путем введения температурных коэффициентов, взятых из экспериментальных исследований.

При разработке ВОСП необходимо изучить влияние температуры окружающей среды на усиление EDFA. Такие исследования проводились для EDFA с диодной накачкой на длинах волн накачки 0,8 и 0,98 мкм и показали, что при изменении температуры от -40 до +60°C усиление уменьшалось с 21,6 до 20,1 дБ. В другой работе [4] усиление уменьшалось со скоростью -0,07 дБ/°C при изменении температуры от -20 до +85°C ( $\lambda_p = 1,48$  мкм). При  $\lambda_p = 0,98$  мкм изменения усиления малы, что вызвано изменением инверсии населенности [3].

Зависимость характеристик от схемы накачки (для прямой и обратной накачки) отслеживается в математической модели с помощью коэффициента  $U_n$ :

$U_p = 1$  – для прямой накачки;

$U_p = -1$  – для обратной накачки.

$U_p = 0$ ,  $P_p = 2P_p$  – для двунаправленной накачки лазерами с одинаковой мощностью (следует из математической модели).

## 2.2 Зависимости коэффициента усиления и оптимальной длины допированного волокна от параметров сигналов и накачки для EDFA с прямой накачкой

При проектировании EDFA важным является выбор оптимальной длины допированного волокна. Наличие оптимума длины волокна обусловлено наличием максимума зависимости коэффициента усиления от длины волокна. Оптимальной длиной EDF в условиях усиления одного информационного сигнала является длина волокна, на котором достигается максимальное усиление.

Однако, наличие зависимости коэффициента усиления и оптимальной длины волокна от длины волны сигнала (рис.2.3 а,б) и мощности входного сигнала (рис.2.3 в,г) приводит к тому, что в условиях усиления нескольких сигналов, для каждого канала существует своя оптимальная длина, на которой наблюдается свой максимум коэффициента усиления для каждого канала (рис. 2.4).

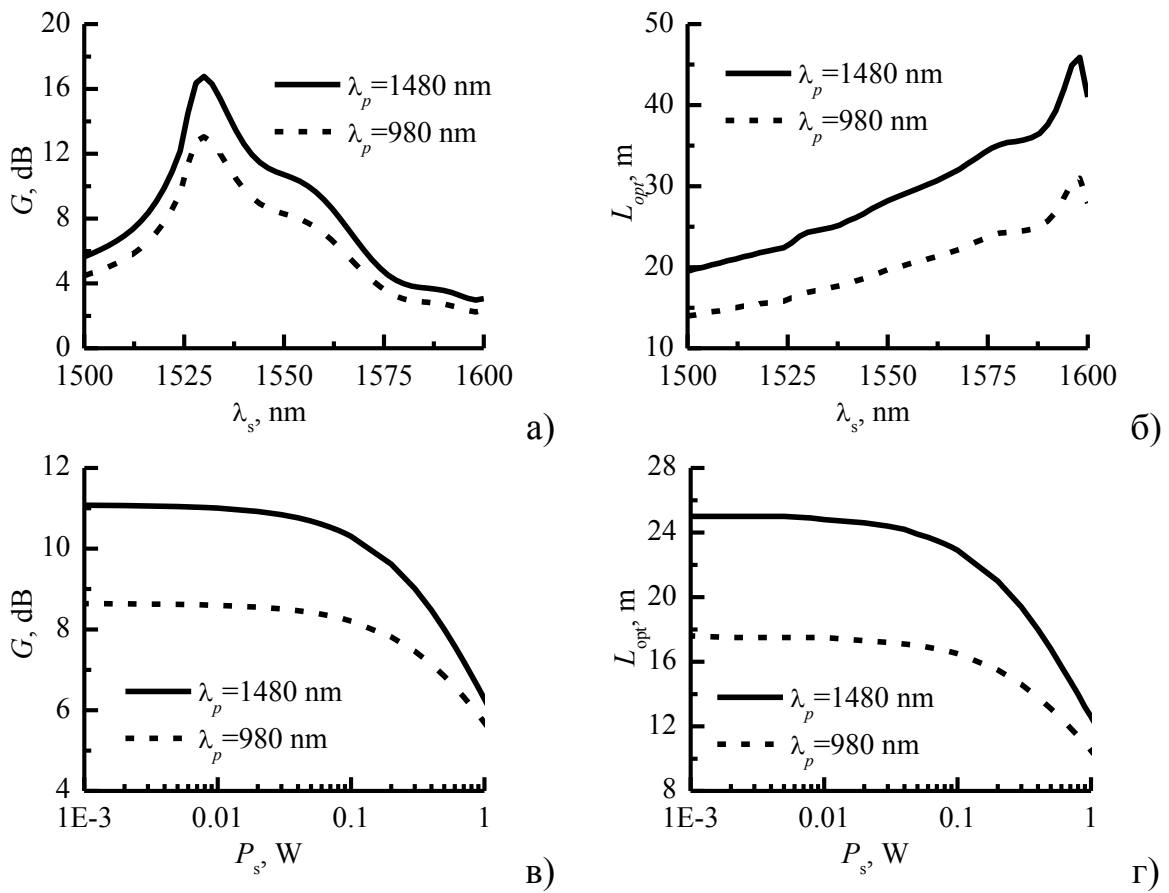


Рисунок 2.3

Таким образом, для многоволнового усилителя под оптимальной длиной следует понимать длину волокна, на которой находится последний максимум коэффициента усиления сигнала (рис. 2.4).

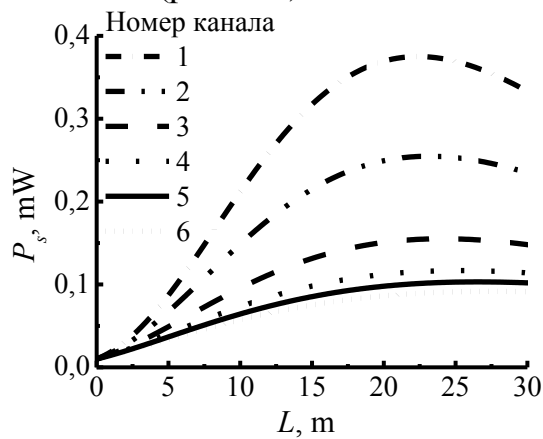


Рисунок 2.4

Следует также отметить, что мощность накачки и количество усиливаемых каналов также оказывает непосредственное влияние на коэффициент усиления и оптимальную длину для каждого канала (рис.2.5).

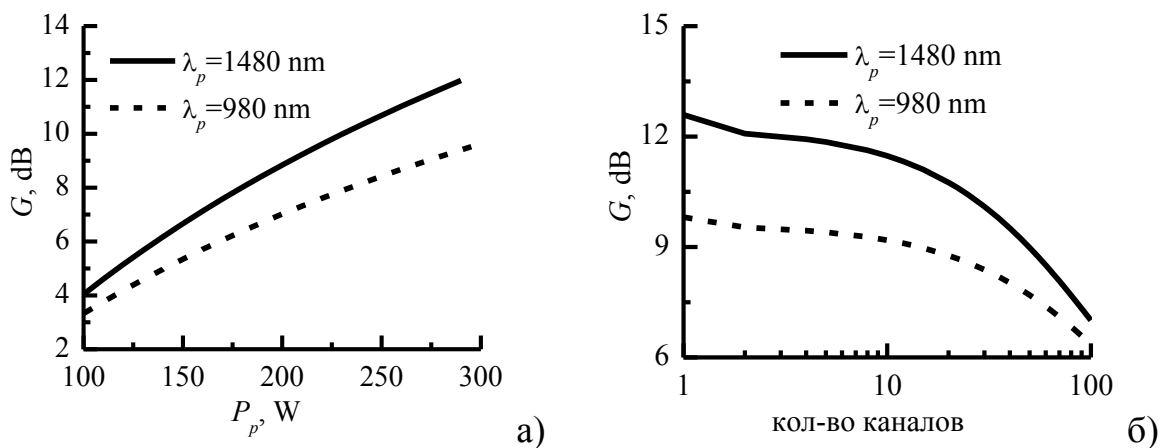


Рисунок 2.5

Все выше приведенные зависимости показывают необходимость дополнительных структурных элементов в EDFA для выравнивания и стабилизации коэффициента усиления.

### 2.3 Учет температурной зависимости и схемы накачки

Из вышеприведенных выражений (2.10) явно не прослеживается температурная зависимость, но ее можно учесть путем введения температурных коэффициентов, взятых из экспериментальных исследований.

При разработке ВОСП необходимо изучить влияние температуры окружающей среды на усиление EDFA. Такие исследования проводились для EDFA с диодной накачкой на длинах волн накачки 0,8 и 0,98 мкм и показали, что при изменении температуры от -40 до +60°C усиление уменьшалось с 21,6 до 20,1 дБ. В другой работе [ усиление уменьшалось со скоростью -0,07 дБ/°C при изменении температуры от -20 до +85°C ( $\lambda_p = 1,48$  мкм). При  $\lambda_p = 0,98$  мкм изменения усиления малы, что вызвано изменением инверсии населенности.

Зависимость характеристик от схемы накачки (для прямой и обратной накачки) отслеживается в математической модели с помощью коэффициента  $U_n$ :

$U_p = 1$  – для прямой накачки;

$U_p = -1$  – для обратной накачки.

$U_p = 0$ ,  $P_p = 2P_p$  – для двунаправленной накачки лазерами с одинаковой мощностью (следует из математической модели).

### 3 Рекомендации по выполнению работы

При выполнении лабораторных работ к исследованию рекомендуются следующие структурные схемы усилителей:

- усилитель мощности с обратной схемой накачки

- линейный усилитель с прямой схемой накачки.

Для каждого типа усилителя необходимо:

1. Исследовать зависимость оптимальной длины  $L_{opt}$  и максимального коэф-

- коэффициента усиления  $K_{max}$  от мощности сигнала  $P_s$  в диапазоне от 0.001мВт до 0,5мВт для  $\lambda_p=1480$  нм и  $\lambda_p=980$  нм. ( $P_p$  и  $\lambda_s$  задаются вариантом задания)
2. Исследовать зависимость максимального коэффициента усиления  $K_{max}$  от мощности накачки  $P_p$  в диапазоне от 100 до 300мВт, для  $\lambda_p=1480$ нм и  $\lambda_p=980$ нм. ( $P_s$  и  $\lambda_s$  задаются вариантом задания)
  3. Исследовать зависимость максимального коэффициента усиления  $K_{max}$  от длины волны сигнала  $\lambda_s$  в диапазоне 1530 нм – 1560 нм для  $\lambda_p=1480$ нм и  $\lambda_p=980$ нм. ( $P_s$  и  $P_p$  задаются вариантом задания)
  4. Исследовать зависимость максимального коэффициента усиления  $K_{max}$  от температуры в диапазоне от  $-20$  до  $+40^\circ\text{C}$ , для  $\lambda_p=1480$ нм и  $\lambda_p=980$ нм. ( $\lambda_s$ ,  $P_s$  и  $P_p$  задаются вариантом задания)
  5. Исследовать зависимость максимального коэффициента усиления  $K_{max}$  первого канала от количества каналов при равных входных мощностях каждого канала для  $\lambda_p=1480$ нм и  $\lambda_p=980$ нм. ( $P_s$ ,  $\lambda_s$ ,  $\Delta\lambda$ , и  $P_p$  задаются вариантом задания)
  6. Для многоканального усилителя исследовать зависимость максимального коэффициента усиления  $K_{max}$  первого канала от межканального интервала по длине волны  $\Delta\lambda$  от 0.4нм до 1.6нм ( $\lambda_s$ ,  $P_s$  и  $P_p$ , количество каналов задаются вариантом задания).
  7. Для многоканального усилителя при равных мощностях входных сигналов определить оптимальную длину усилителя (все параметры задаются вариантом задания). Установить фильтр для выравнивания АЧХ. Использовать фильтр на входе и на выходе усилителя. Для обоих фильтров сохранить следующие графики:
    - график с АЧХ усилителя без фильтра, АЧХ фильтра и АЧХ усилителя с фильтром;
    - график с зависимостями входной мощности, выходной мощности и выходной мощности после фильтра от номера канала;
    - график с зависимостью мощности сигнала в каждом канале от длины волокна при оптимальной длине волокна.
 Определить неравномерность АЧХ усилителя и АЧХ усилителя с фильтром.
  8. Для многоканального усилителя при неравных мощностях входных сигналов определить оптимальную длину усилителя (все параметры задаются вариантом задания). Установить фильтр для выравнивания выходной мощности. Использовать фильтр на входе и на выходе усилителя. Для обоих фильтров сохранить следующие графики:
    - график с АЧХ усилителя без фильтра, АЧХ фильтра и АЧХ усилителя с фильтром;
    - график с зависимостями входной мощности, выходной мощности и выходной мощности после фильтра от номера канала;
    - график с зависимостью мощности сигнала в каждом канале от длины волокна при оптимальной длине волокна.

Определить неравномерность выходной характеристики усилителя без фильтра и с фильтрами.

Для каждого варианта данные для выполнения работы задаются из таблицы 2.1.

№ варианта	Тип усилителя	$P_s$ , mW	$\lambda_s$ , nm	$P_p$ , mW	$n$	$\Delta\lambda$ , nm
1	линейный	0.01	1520	250	16	1.6
2	мощности	0.001	1530	200	24	0.4
3	линейный	0.005	1535	280	16	0.8
4	мощности	0.002	1525	250	24	0.8
5	линейный	0.02	1540	270	8	1.6
6	мощности	0.05	1550	300	8	1.2
7	мощности	0.01	1560	290	8	0.8
8	линейный	0.001	1555	250	8	0.4
9	мощности	0.005	1520	200	16	0.8
10	линейный	0.002	1530	280	24	0.8
11	мощности	0.02	1535	250	16	0.4
12	линейный	0.05	1525	270	16	1.2
13	линейный	0.01	1540	300	16	0.8
14	мощности	0.001	1550	250	8	1.6
15	линейный	0.005	1560	200	8	0.4
16	мощности	0.002	1555	280	24	0.4
17	линейный	0.02	1520	250	24	0.4
18	мощности	0.05	1530	270	16	0.8
19	мощности	0.01	1535	300	24	0.4
20	линейный	0.001	1525	300	24	0.4

#### 4 Содержание отчета

Отчет о проделанной работе должен содержать следующие разделы:

Цель работы;

Краткая теория ;

Результаты работы – графики с краткими пояснениями полученных зависимостей;

Выводы по проделанной работе.

#### 5 Контрольные вопросы

- 1 Какие виды оптических усилителей вы знаете?
- 2 Атомами какого редкоземельного металла наиболее часто легируют волокно, используемое в усилителях на допированном волокне?
- 3 В каком диапазоне длин волн работает EDFA?
- 4 Области применения EDFA по классификации?



- 5 Какая минимальная частота модуляции позволяет считать режим работы EDFA стационарным?
- 6 Какие межканальные интервалы соответствуют DWDM стандарту?
- 7 Какие стандартные длины волн накачки используются в EDFA?
- 8 Какая максимальная мощность накачки может быть реализована одним лазерным диодом в настоящее время?
- 9 Какие методы используются для увеличения полосы усиления EDFA?
- 10 Какие достоинства и недостатки EDFA по сравнению с другими видами оптических усилителей?
- 11 Основные параметры EDFA?

#### **4. Описание программного обеспечения**

### **Компьютерные лабораторные работы**

## **«КОМПЬЮТЕРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОВОЛНОВОГО ЭРБИЕВОГО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ»**

Руководство пользователя  
(Редакция от 12.10.2006)

### **1 Общее описание**

#### **1.1 Функциональное назначение системы, область применения и ограничения**

Компьютерная лабораторная работа «Компьютерное исследование многоволновых эрбиевых волоконно-оптических усилителей» предназначена для расчета рабочих характеристик многоволновых эрбиевых волоконно-оптических усилителей (EDFA) в учебных целях. Данная разработка может быть использована при обучении студентов технических вузов по направлениям «Оптика и телекоммуникации», как в качестве лабораторной работы, так и в качестве инструмента для расчета и оптимизации EDFA при курсовом проектировании протяженных волоконно-оптических систем передачи со спектральным разделением (ВОСП-СП), использующих EDFA в качестве одного из основных элементов.

Программное обеспечение представляет собой пакет программ генерации форм для задания параметров EDFA, отображения результатов расчета, вывода методического пособия и описания программного обеспечения с гипертекстовой навигацией. Пакет включает 20 вариантов заданий для проведения лабораторных работ, а также прикладные программы по проведению необходимых вычислений, предусматривающих численное решение системы нелинейных дифференциальных уравнений и описывающих многоволновый EDFA в стационарном режиме. В основу разработанного программного обеспечения положе-


на математическая модель одноволнового EDFA, обобщенная для случая многоволновых EDFA и дополненная учетом температурной зависимости. Одним из ограничений модели является отсутствие учета усиленной спонтанной эмиссии (ASE). В методическом пособии [2] приведена математическая модель, положенная в основу программного обеспечения.

## 1.2 Краткое описание системы и ее технические характеристики

Компьютерная лабораторная работа, далее программа, представляет собой компьютерную программу, которая состоит из методического пособия (краткая теория с заданием на работу), входного теста и оболочки моделирования. Программа может функционировать под управлением операционных систем Windows всех поколений, начиная с Windows 95. Для нормального функционирования программы компьютер должен быть оснащен не менее чем 16 Мб оперативной памяти и не менее чем 6 Мб свободного места на жестком диске. Сама программа занимает около 0,25 Мб дисковой памяти. Программа не требует установки.

## 1.3 Запуск программы и выход из программы

Запуск программы осуществляется запуском файла EDFA.exe на выполнение, данный файл расположен в папке EDFA. После запуска на экране компьютера появляется главное окно программы «Компьютерное моделирование многоволнового эрбиевого волоконно-оптического усилителя» (далее по тексту описания данное окно называется *Главное*). Данное окно содержит главное меню и основные кнопки управления.

Выход из программы осуществляется нажатием кнопки  в верхнем правом углу окна «Главное».

## 2 Работа с программой

В дальнейшем предполагается, что пользователь имеет определенные навыки работы в операционной системе Windows 95 или Windows 98.

При работе с программой для перемещения между полями ввода, и нажатий на кнопки удобней всего использовать манипулятор "мышь".

В ходе выполнения работы предусмотрен выбор типа усилителя:

- усилитель мощности (прямая схема накачки),
- линейный усилитель (обратная схема накачки).

В том же окне предусмотрена возможность ввода Ф.И.О. студента и преподавателя для заполнения форм отчета, генерируемого по окончании работы в MS Word. Также можно выбрать вариант и номер стартового пункта работы. Всего работа содержит 20 вариантов заданий по 8 пунктов.

В соответствии с выполняемым пунктом задания, текст которого загружается при выборе варианта и номера пункта автоматически, исполнителю необходимо ввести исходные параметры расчета:

1) допированного волокна: длина волокна, диаметр сердцевины волокна, диаметр допированной области, концентрация ионов эрбия, время жизни метастабильного уровня;

2) источника накачки: длина волны источника накачки (1480нм, 980 нм), мощность (50мВт-300мВт), схема накачки (прямая, обратная);

3) информационных сигналов:

– количество сигналов на входе усилителя (1-150);

– длина волны (1400нм - 1600нм) - предусмотрено использование разных межканальных интервалов, установка длин волн для каждого канала самостоятельно, использование стандартизованных WDM частотных планов с шагом 1000 ГГц – 50 ГГц;

– входная мощность (0 мВт – 0.5мВт) - предусмотрено использование одинаковых входных мощностей для всех входных сигналов, самостоятельной установки из доступного диапазона;

4) использование фильтра для выравнивания АЧХ усилителя - фильтр на входе, фильтр на выходе, без фильтра;

5) использование фильтра для выравнивания выходных мощностей сигналов - фильтр на входе, фильтр на выходе, без фильтра.

Для заданных параметров производится расчет следующих характеристик усилителя EDFA, выводимых в графической форме:

1) зависимость мощности накачки от длины усилителя;

2) зависимости мощностей выходных сигналов от длины усилителя;

3) зависимость коэффициента усиления от длины волны при заданной длине усилителя;

4) АЧХ фильтра.

Также в сводной таблице приведены параметры для каждого информационного сигнала: длина волны, входная мощность, мощность на выходе усилителя, оптимальная длина – длина усилителя, при которой достигается максимум мощности сигнала, максимальная мощность сигнала.

По результатам расчета заполняются таблицы с информацией, требуемой в задании к выполняемому пункту. После выполнения пункта программа строит необходимые графики в отдельном окне, где также есть возможность для записи выводов по проделанному пункту и перехода к выполнению следующего пункта.

При возвращении к выполнению пункта, который был уже сделан, данные в таблицах с информацией, требуемой в задании к этому пункту, и выводы по нему сохраняются в последней редакции исполнителя. Однако при выходе из программы данные о выполнении работы сохраняются только в графическом виде в формате \*.emf в поддиректории с названием выполняемой работы в каталоге «Мои документы». При этом сохраняются только те графики, которые необходимы для оформления отчета по работе.

После выполнения последнего пункта задания или по желанию исполнителя в любой момент выполнения работы происходит генерация отчета по форме, принятой в вузе-разработчике программы, включающей информацию об исполнителе работы, требуемые в задании графики (полученные в результате

выполнения работы), а также выводы, написанные исполнителем по каждому пункту.

После генерации отчета работа заканчивается. Для выполнения новой работы (другого варианта) необходимо выйти из программы и запустить ее заново.

Далее более подробно остановимся на программных окнах.

## 2.1 Главное окно

При запуске программы EDFA автоматически отображается главное окно. Интерфейс окна приведен на рисунке 2.6.

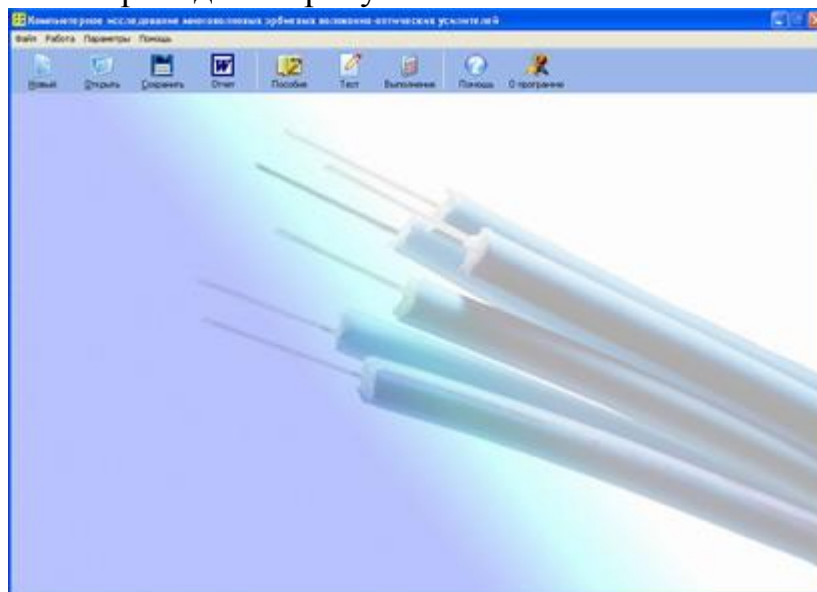


Рисунок 2.6 - Интерфейс окна *Главное*

После запуска программы, до тех пор пока в программе не выбран *вариант* задания и не нажата кнопка *Начать работу* в окне *Выбор варианта*, доступными являются только следующие окна: *Главное*, *Выбор варианта*, *Методическое пособие*, *Описание программы*.

На рис. 2.7 приведен вид верхней части окна, которая на протяжении всей работы находится в верхней части, вне зависимости от того в каком окне происходит выполнение работы.



Рисунок 2.7 – Меню и управляющие кнопки окна *Главное*

Главное меню содержит следующие опции (соответствуют управляющим кнопкам):

### *Файл:*

*Новый* – вызывает окно *Выбор варианта* для начала работы;

*Открыть* – позволяет после начала работы открыть сохраненные результаты в графическом формате;

*Сохранить* – позволяет сохранить построенный график с результа-

тами с окна *Подготовка отчета*;

*Отчет* – создает отчет в Word с результатами выполненной работы;

**Работа:**

*Пособие* – вызывает окно *Методическое пособие*;

*Тест* – вызывает окно *Тест*;

**Выполнение:**

*Выбор варианта* – вызывает окно *Выбор варианта* до начала работы;

*Выбор пункта* – вызывает окно *Выбор варианта* до начала работы и окно подготовка отчета во время выполнения работы для выбора или перехода к выполнению другого пункта;

*Результаты расчетов* – вызывает окно *Результаты расчетов*;

**Параметры:**

*Окно все параметры* – вызывает окно *Все параметры*;

*Сигнал и накачка в отдельном окне* – вызывает окно *Параметры*;

**Помощь:**

*Помощь* -

*О программе* – вызывает окно *О программе* с информацией об авторах программы.

*Методическое пособие* - вызывает окно *Методическое пособие*.

## 2.2 Окно *Выбор варианта*

В данном окне запрашивается информация, которая необходима для начала лабораторной работы: вариант задания (как правило, соответствует номеру в списке группы), фамилия и номер группы студента, выполняющего работу (см. рисунок 2.8, фамилия и должность преподавателя, тип усилителя и номер пункта задания, с которого нужно начать работу).

После того как вы заполнили необходимые поля и выбрали номер варианта, программа автоматически выставляет тип усилителя в соответствии с вариантом и загружает соответствующие задания для выполнения пунктов.

Программа создает папку с названием работы в директории **Мои документы**, где сохраняет все результаты работы в виде графических файлов, с названиями, соответствующими номеру пункта и номеру графика в пункте, например «punkt1-1.emf». При нажатии кнопки **Начать работу** отображается окно *Все параметры*. Вся информация из данного окна отображается в отчете, генерируемом в конце работы. После окончания работы графические данные в виде сохраненных файлов не удаляются. Поэтому при повторном (при необходимости) выполнении той же самой работы, можно начать сразу с того пункта, на котором была закончена работа предыдущий раз, либо который нужно переделать. При последующей генерации отчета все графики будут вставлены в от-

чет.

После нажатия кнопки **Начать работу** информация в данном окне не может быть изменена.

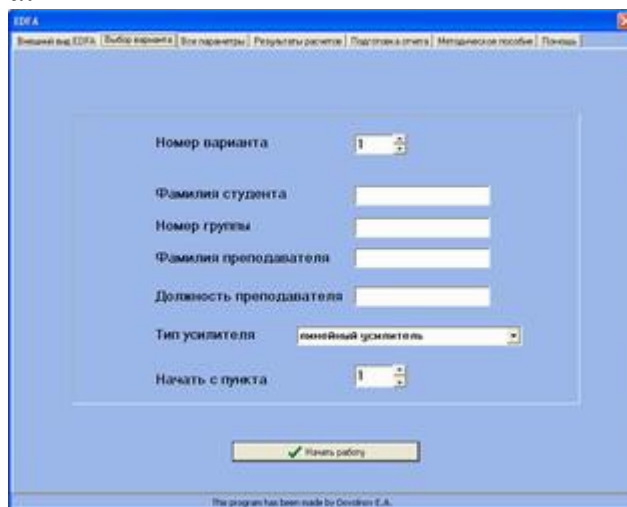


Рисунок 2.8 – Интерфейс окна **Выбор варианта**

Как видно из рис. 2.5 во время работы программы EDFA с помощью закладок в верхней части окна возможна навигация между всеми окнами программы: **Главное**, **Выбор варианта**, **Все параметры**, **Результаты расчетов**, **Тест**, **Подготовка отчета**, **Методическое пособие**, **Описание программы**.

После запуска программы, до тех пор пока не выбран **вариант** и не нажата кнопка **Начать работу** в окне **Выбор варианта**, доступными являются только следующие окна: **Главное**, **Выбор варианта**, **Методическое пособие**, **Описание программы**.

### 2.3 Окно **Тест**

С помощью главного меню или управляющих кнопок главного окна можно вызвать окно **Тест**, интерфейс которого показан на рис 2.9.

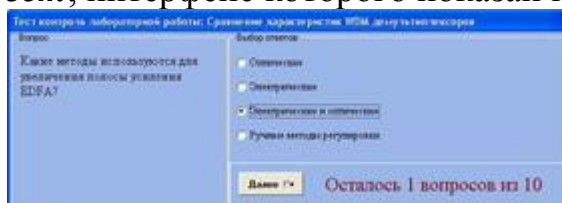


Рисунок 2.9 – Интерфейс окна **Тест**.

В левом поле появляются вопросы, в правом варианты ответов. Правильным всегда является только один вариант. После того как вы выбрали ответ, который вы считаете верным, нажмите кнопку **Далее**.

После прохождения теста появится оценка за тест. Тест пройти можно только один раз.

### 2.4 Окно **Все параметры**

Внешний вид окна приведен на рисунке 2.10.

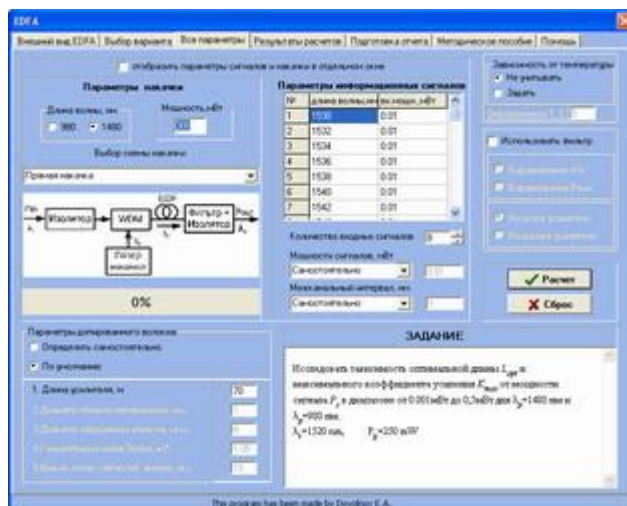


Рисунок 2.10 – Интерфейс окна *Все параметры*.

Данное окно включает в себя все задаваемые параметры усилителя. До нажатия кнопки **Расчет** необходимо установить указанные в задании параметры для расчета. В поле задание отображается текст выполняемого пункта задания.

В целом в данном окне можно выделить следующие группы параметров:

**Параметры накачки:** *длина волны* и *мощность* источника накачки, схема накачки (определяется типом усилителя в окне *Выбор варианта*). *Длины волн* накачки может быть выбрана равной либо 1.48 мкм, либо 0.98 мкм.

Мощность накачки можно изменить в поле редактирования «Мощность, мВт» в пределах от 0 до 300 мВт.

**Параметры информационных сигналов:** В данном окне также предусмотрена возможность самостоятельного выбора количества, мощностей и длин волн информационных сигналов. Все параметры сигналов отображены в таблице.

При задании мощностей сигналов можно использовать следующие варианты:

**Самостоятельно** - мощности всех сигналов можно задавать самостоятельно в таблице сигналов;

**Равные** - становится доступным поле редактирования, в котором можно установить значение мощности для всех сигналов

**Неравные** – как и в предыдущем пункте становится доступным поле редактирования, в котором можно установить значение базовой мощности сигналов, относительно которой программа автоматически подберет случайным образом мощности всех сигналов.

Длину волны сигнала можно установить с определенным интервалом выбрав из списка **Межканальный интервал**, пункт **Задать интервал**. После этого необходимо в окне редактирования, находящемся под списком ввести значение интервала и установить значение длины волны первого сигнала в соответствующем окне редактирования. Длины волн всех сигналов изменятся в соответствии с выбранным интервалом.

Длина волны сигнала может лежать в диапазоне от 1400 нм до 1600 нм.

Поэтому, следует внимательно относиться к выбору интервала по длине волны между сигналами. Если длина волны сигнала (одного или всех) будет вне диапазона, то программа выставит ближайшее допустимое значение.

Также в списке **Межканальный интервал** можно выбрать стандартизованные планы WDM или возможность выставления длины волны каждого сигнала самостоятельно.

**Параметры допированного волокна:** Имеется возможность изменения следующих параметров волокна с помощью соответствующих полей редактирования: длины используемого волокна, диаметра области легирования, диаметра сердцевины волокна, концентрации эрбия, времени жизни метастабильного уровня. Как правило, все эти параметры менять не нужно. Данные параметры установлены по литературным данным.

**Температурная зависимость:** Зависимость от температуры можно учесть выбрав опцию **Задать температуру** и выставив значение температуры в поле редактирования с надписью **Определенная температура**.

**Использование фильтров:** Выбрать фильтр можно поставив галочку с помощью манипулятора мышью в квадратике с надписью **Использовать фильтр** и затем нужно выбрать либо фильтр для выравнивания АЧХ усилителя, либо мощностей сигналов на выходе усилителя, затем выбрать, где поставить фильтр - на входе или на выходе усилителя.

При нажатии кнопки **Расчет** осуществляется расчет усилителя с установленными параметрами, и отображается окно **Результаты расчетов**.

Кнопка **Сброс** осуществляет установление начальных настроек данного окна.

В верхней части окна при выборе пункта **Отобразить параметры сигналов и накачки в отдельном окне** появляется дополнительное окно **Параметры**. Использование данного окна ускоряет процесс задания и изменения данных параметров при выполнении заданий работы. При изменении параметров в окне **Параметры** происходит параллельное изменение в окне **Все параметры**, и наоборот.

## 2.5 Окно **Результаты расчетов**

При нажатии кнопки **Расчет** в окне **Все параметры** осуществляется моделирование характеристик усилителя и открывается окно **Результаты расчетов**, интерфейс которого приведен на рис. 2.11.

В данном окне отображаются все выходные параметры и характеристики усилителя. Следуя указаниям из окна отображения задания выполняемого пункта, следует выставлять исходные параметры для расчета.

Выполняя пункты задания нужно отслеживать параметры сигналов, приведенные в таблице «Параметры информационных сигналов».



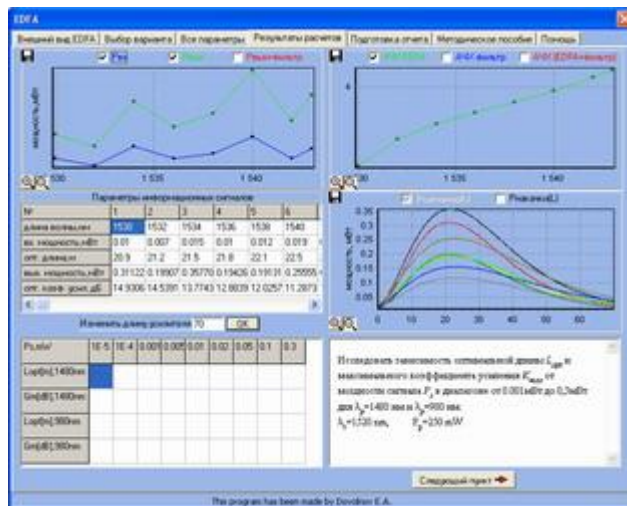




Рисунок 2.11 - Окно *Результаты расчетов*

Нажатие левой кнопки мыши на кнопке , находящейся в левом нижнем углу любого графика приводит к увеличению размера графика в 4 раза, как показано на рис. 2.12. Нажатие левой кнопки мыши на кнопке  приводит к исходному виду окна, как на рис. 2.2

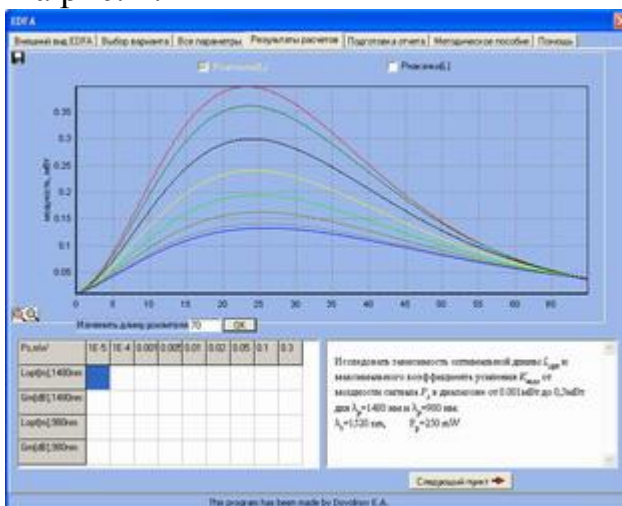


Рисунок 2.12

Нажатие левой кнопкой мыши на оси графика происходит переход от логарифмического масштаба к линейному и наоборот. Следует отметить, что при наличии отрицательных значений или нуля по оси не позволяет переходить к логарифмической шкале.

Выбор отображаемых кривых на каждом графике осуществляется с помощью кнопок в верхней части графика.

Сдвиг максимальных и минимальных значений по осям, включение и выключение сетки, изменение сетки, изменение масштаба по осям для каждого графика производится в отдельном всплывающем окне (рис.2.13), вызываемом для каждого графика нажатием правой кнопки на поле графика.



Рисунок 2.13

Возможно также сохранение графика на жесткий диск с помощью кнопки на графике в верхнем левом углу.

Нажатие левой кнопкой мыши на любой кривой двух верхних графиков приводит к отображению и скрытию подписей к точкам на графике с информацией о координате по оси y (см. рис.2.14).

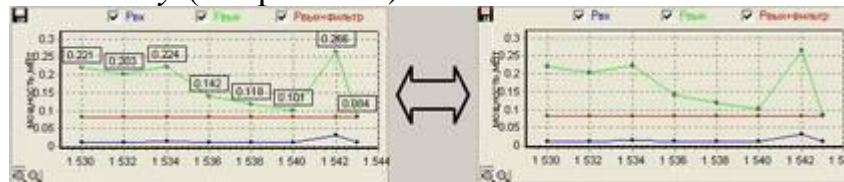


Рисунок 2.14

Снимаемые в соответствии с заданием данные заносятся вручную в нижнюю таблицу. После заполнения таблицы нужно нажать кнопку **Следующий пункт**. Появится окно *Подготовка отчета* с построенными на основе таблицы зависимостями. Внешний вид окна приведен на рис. 2.15.

## 2.6 Окно *Подготовка отчета*

При появлении данного окна (рис.2.15), проанализировав полученные зависимости необходимо написать выводы в поле редактирования. При нажатии кнопки **Переделать текущий пункт** можно частично или полностью переделать пункт, который был только что выполнен. Для продолжения выполнения работы, необходимо выбрать номер пункта и нажать кнопку **Да**. При выборе нового пункта но без нажатия кнопки **Да** при переходе к выполнению задания через закладки в верхней части окна, новый пункт не будет отображен. Выбрать можно любой пункт, несмотря на то, выполнен данный пункт или нет. При выборе номера пункта, который уже был выполнен, таблица с данными будет содержать все числа, которые были уже занесены.

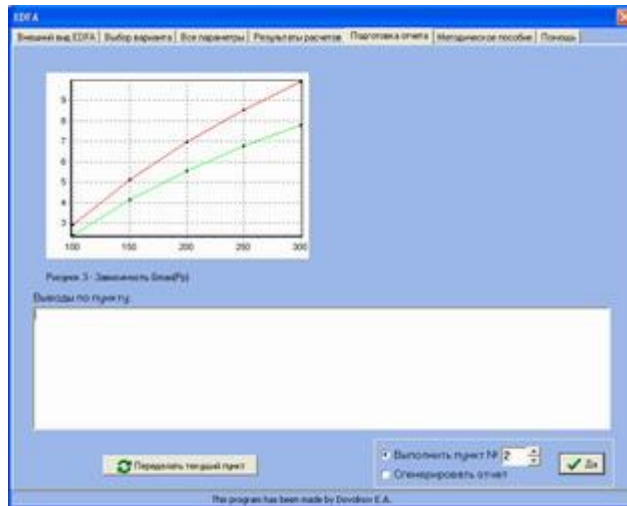


Рисунок 2.15 – Интерфейс окна *Подготовка отчета*

При нажатии кнопки **Да** появляется окно с запросом о сохранении графиков в качестве результатов данного пункта (рис. 2.16).

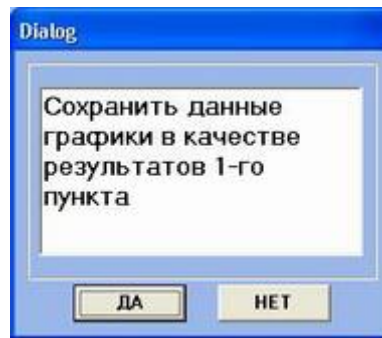


Рисунок 2.16 – Диалоговое окно.

При выборе «Сгенерировать отчет» и нажатии **Да** происходит генерация отчета, содержащего все полученные в ходе выполнения работы данные в виде графиков и записанные выводы по каждому пункту.



Рисунок 2.17 – Интерфейс программы с открытым окном *Параметры* (справа)

## 2.7 Окно *Параметры*

Интерфейс программы с открытым окном *Параметры* (справа) приведен на рисунке 2.17.

В данном окне приведены те же функциональные элементы задания параметров накачки и информационных сигналов. При изменении параметров в данном окне происходит параллельное изменение и в окне *Все параметры*, и наоборот.

## 2.8 Окно *Методическое пособие*

В окне *Методическое пособие* (рис. 2.18) находится текст методического пособия. Между пунктами пособия можно переходить с помощью гипертекстовых ссылок, находящихся в верхней части окна. В тексте приведена краткая информация по усилителям и методика выполнения работы.

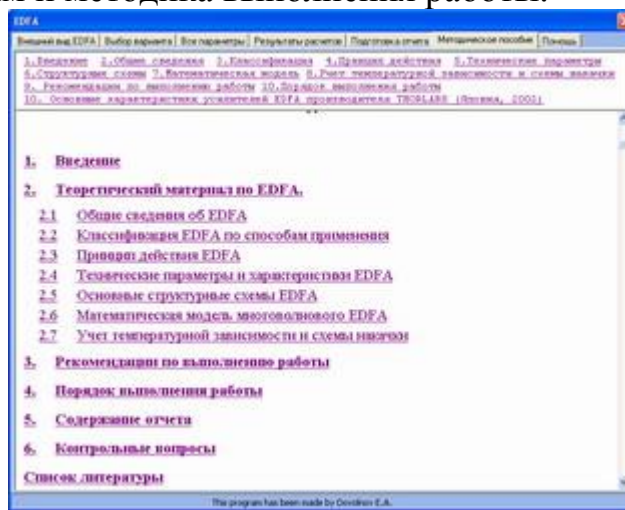


Рисунок 2.18 – Интерфейс окна *Методическое пособие*.

## 2.9 Окно *Описание программы*

Интерфейс окна *Описание программы* представлено на рисунке 2.18.

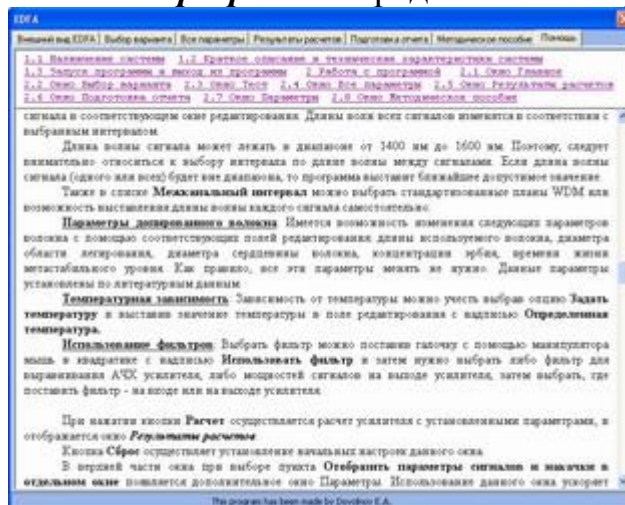


Рисунок 2.19 - Интерфейс окна *Описание программы*

Данное окно отображает содержимое данного документа, между пунктами которого можно переходить с помощью гипертекстовых ссылок, находящихся в верхней части окна.

### Список литературы

1. Заславский К.Е. Волоконно-оптические системы передачи со спектральным уплотнением: Учебное пособие для вузов. - Новосибирск: СибГУТИ, 2005. – 136 с.
2. Довольнов Е.А., Кузнецов В.В., Миргород В.Г., Шарангович С.Н. Мультиплексорное и усилительное оборудование многоволновых оптических систем передачи: учеб. пособие. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2016. – 156 с.
3. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи (4-е, дополненное издание)- М. : Эко-Тренд. 2007. -512 с..
4. Фокин В.Г. Оптические системы передачи и транспортные сети. Учебное пособие .- М.: Эко-Трендз, 2008. -288 с.
5. Скляров О К. Волоконно-оптические сети и системы связи. Учебное пособие.- С-Пб : Лань, 2010. – 272 с.
6. РД 45.286-2002. Руководящий документ отрасли аппаратура волоконно-оптической системы передачи со спектральным разделением. Технические требования.
7. Довольнов Е.А., Шарангович С.Н. Компьютерная лабораторная работа «Компьютерное исследование многоволновых эрбиевых волоконно-оптических усилителей - М.: ВНИИЦ, 2006. - № 50200501793 . (Свидетельство №5497 об отраслевой регистрации разработки «Компьютерная лабораторная работа «Компьютерное исследование многоволновых эрбиевых волоконно-оптических усилителей» в «Отраслевом фонде алгоритмов и программ» от 20.12.2005. Москва. )



## Приложение А

### Основные характеристики усилителей EDFA производителя THORLABS (Япония)

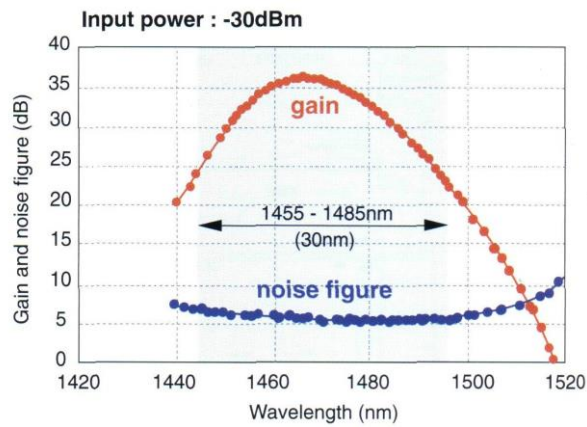


Рисунок А.1 – Внешний вид усилителя производства THORLABS.

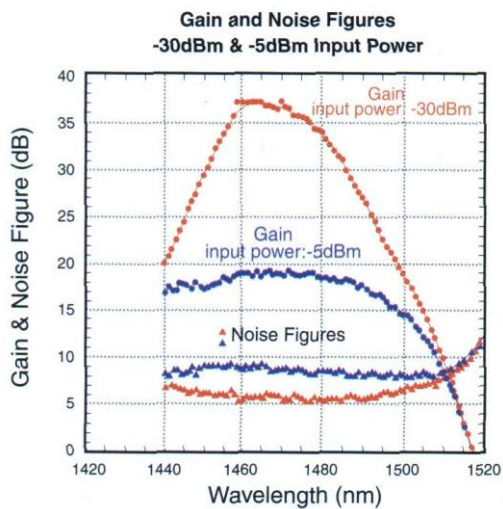
Таблица А.1 – Параметры усилителей трех диапазонов: S, C, L.

Название диапазона длин волн	S-BAND	C-BAND	L-BAND
Диапазон длин волн (нм)	1455-1485	1530-1565	1560-1600
Коэф. усиления ( $P_{ex}=-30$ дБм), (дБ)	>25	>40	>30
Коэф. Усиления ( $P_{ex}=0$ дБм), дБ	13	-	13
Коэффициент шума (дБм)	<7	<5	<5
Выходная мощность насыщения (дБм)	-	>17	-
Стабильность коэф. усиления (дБ)	0.001	0,005	0.005
Выходное волокно	SMF28	SMF28	SMF28
Температура хранения	-10°C - +45°C	-10°C - +45°C	-10°C - +45°C
Рабочая температура	+10°C - +40°C	0°C - +40°C	-10°C - +45°C
Цена (\$)	28000	17000	19000

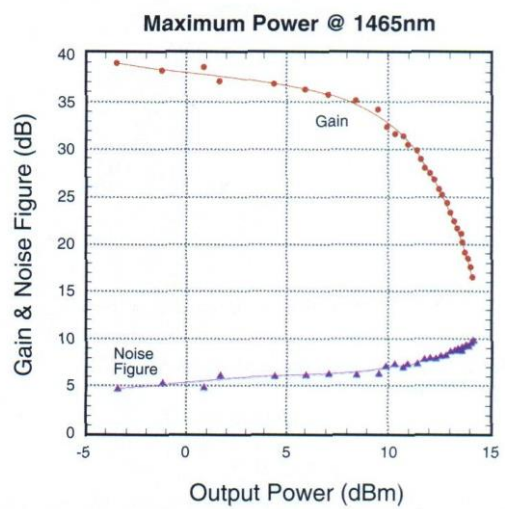
Основные характеристики усилителей различных диапазонов.



a)



б)



в)

Рисунок А.2 – Зависимость коэффициента усиления и коэффициента шума для усилителя диапазона S от длины волны (рис. а, б) и от входной мощности сигнала (рис. в).

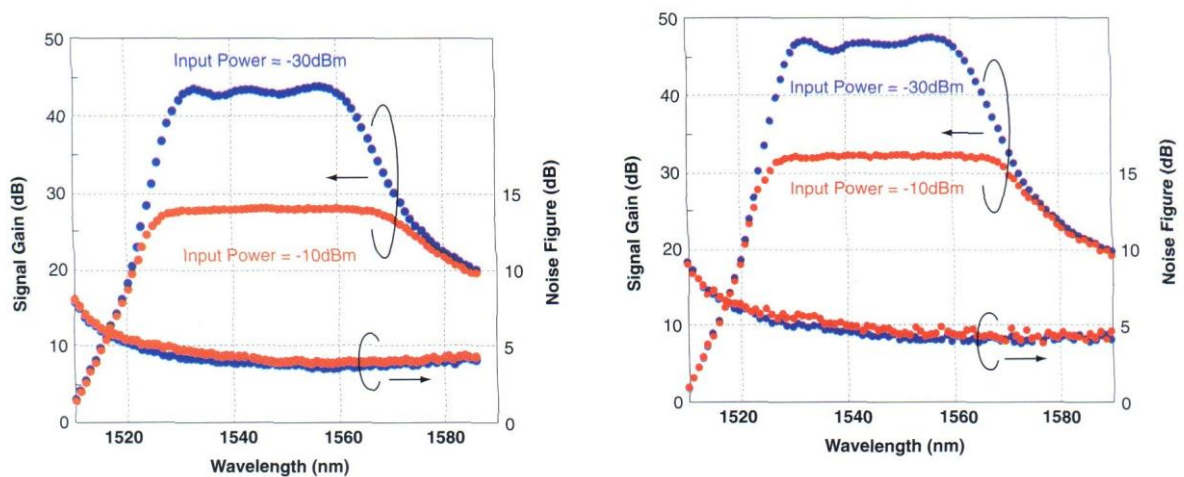


Рисунок А.3 – Зависимость коэффициента усиления и коэффициента шума от длины волны для усилителя диапазона С.

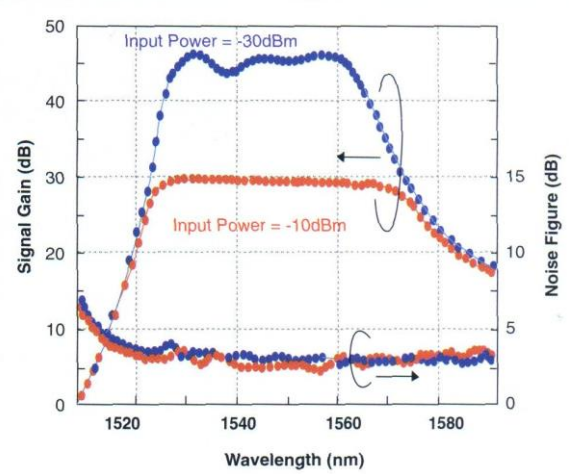
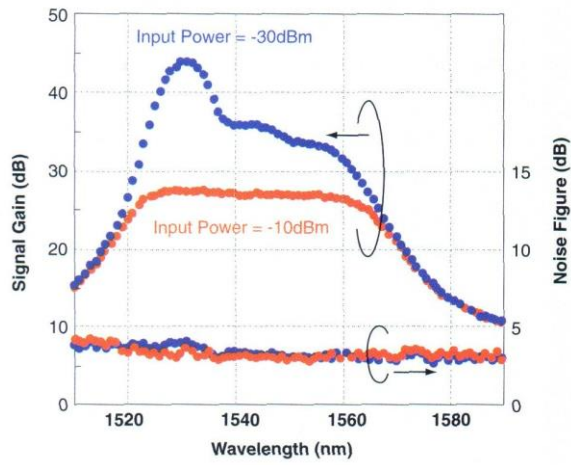
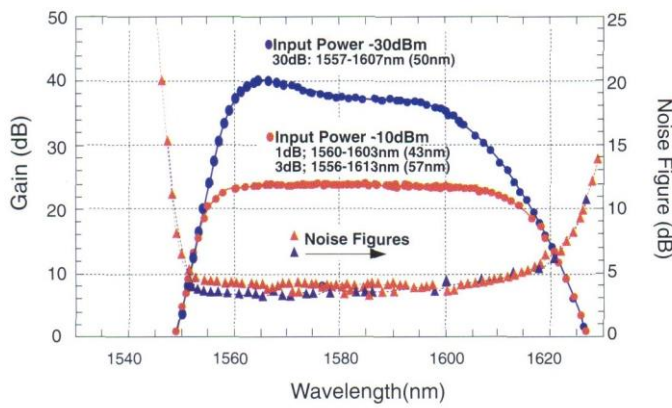
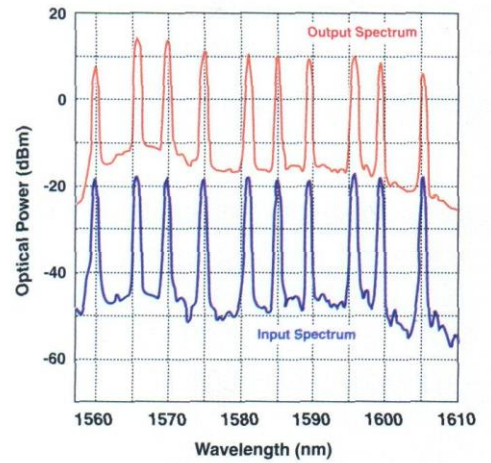


Рисунок А.4 – Зависимость коэффициента усиления и коэффициента шума от длины волны для предусилителя диапазона С.

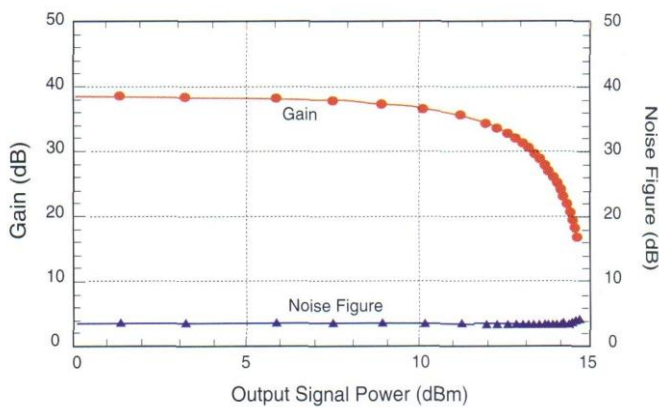


а)

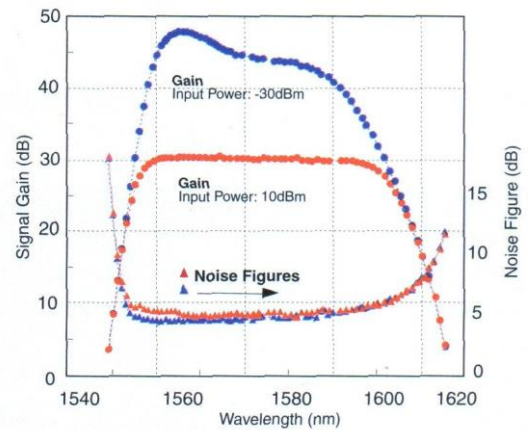


б)

Рисунок А.5 – Зависимость коэффициента усиления и коэффициента шума (рис. а) и входного и выходного сигналов (рис. б) от длины волны для усилителя диапазона L.



а)



б)

Рисунок А.6 – Зависимость коэффициента усиления и коэффициента шума от входной мощности сигнала (рис. а) и от длины волны (рис. б) для усилителя диапазона L.



### **3 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2 КОМПЬЮТЕРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ДЕМУЛЬТИПЛЕКСОРОВ НА ОСНОВЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ФИЛЬТРОВ И ФИЛЬТРОВ ФАБРИ-ПЕРО**

#### **Содержание**

1. Введение.....	58
2. Мультиплексоры на интерференционных фильтрах.....	58
2.1 Принципы действия и структура мультиплексора .....	58
2.2. Математическая модель .....	61
2.3. Расчет основных оценочных характеристик .....	64
3. Мультиплексоры на фильтрах Фабри –Перо .....	67
3.1..Принципы действия и структура мультиплексора .....	67
3.2. Математическая модель .....	68
3.3. Расчет основных оценочных характеристик .....	69
4. Рекомендации по выполнению работы.....	72
4.1. Расчётное задание .....	72
4.2. Экспериментальное задание .....	73
5. Описание программного обеспечения.....	76
Список литературы.....	85
ПРИЛОЖЕНИЕ А Характеристики и структура оборудования промышленных мультиплексоров Alcatel 1696 Metro Span .....	86

**Цель работы:** изучение принципов действия и компьютерное исследование характеристик и параметров, оптических демультиплексоров на основе интерференционных фильтров и фильтров Фабри-Перро.

## 1 Введение

Одним из основных направлений современного научно-технического прогресса является развитие волоконно-оптических систем связи, обеспечивающих возможность доставки на значительные расстояния чрезвычайно большого объема информации с наивысшей скоростью. Уже сейчас имеются волоконно-оптические линии связи большой информационной емкости с длиной регенерационных участков до 200 км и более.

Возможность передача такого большого количества информации по ВОЛС связана с использованием технологии WDM/DWDM [1,2], где передача информации по волокну ведётся одновременно на разных длинах волн. Для этого необходимо ввести разные длины волн в волокно с помощью оптических мультиплексоров (MUX) на передаче, и вывести на приёме при помощи демультиплексора (DMUX).

На сегодняшний день существуют множество различных устройств, для мультиплексирования/демультиплексирования оптического потока, изготавливаемых из различных материалов [1-5].

Оптический демультиплексор довольно сложное устройство, и на данный момент является актуальным разработку программного обеспечения, позволяющего не закупая дорогостоящее оборудование моделировать основные характеристики различных DMUX.

## 2 Мультиплексоры на интерференционных фильтрах

### 2.1 Принцип действия и структура мультиплексора

Принцип действия данного мультиплексора/демультиплексора основан на применении интерференционных (тонкопленочных) фильтров (thin films). Интерференционный фильтр состоит из нескольких чередующихся слоев прозрачного диэлектрического материала с различными показателями преломления, нанесенных на прозрачную подложку (рисунок. 2.1). Прозрачный диэлектрик имеет точный показатель преломления, который может изменяться от 1.42 до 2.0 (точность до 6 знаков после запятой), а разность показателей преломления обычно составляет порядка  $10^{-3} - 10^{-4}$ . Толщина структуры  $L_{TF}$  обычно составляет несколько десятков миллиметров.

Интерференционный фильтр, отражает заданный интервал длин волн и пропускает все остальные. Для определения этого интервала необходимо рассчитать следующие параметры фильтра: показатели преломления ( $n_1, n_2$ ), толщину периодической структуры –  $L$ , период следования слоёв –  $\Delta_{TF}$  и определить угол падения светового пучка на фильтр –  $\theta_{TF}$ .

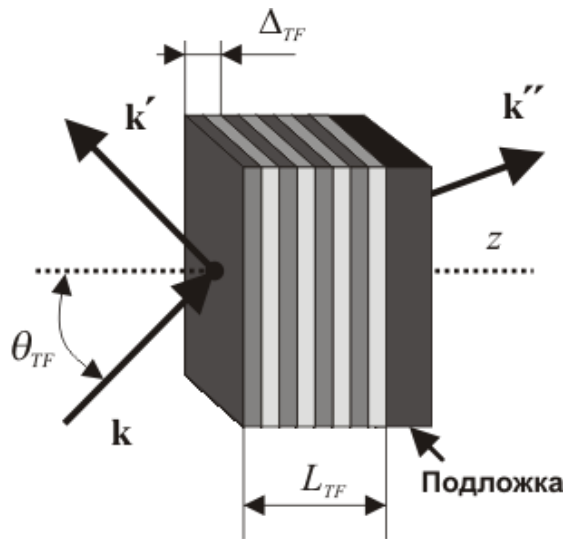


Рисунок 2.1 – Конструкция интерференционного фильтра, где  $\blacksquare$  и  $\square$  – слои с показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$ ,  $L_{TF}$  – толщина структуры,  $\Delta_{TF}$  – период структуры,  $\mathbf{k}$ ,  $\mathbf{k}'$ ,  $\mathbf{k}''$  – волновые вектора падающей, отражённой и прошедшей световых волн,  $\theta_{TF}$  – угол падения волны.

Расчётные формулы для определения параметров фильтра приведены в литературе [1] а техника нанесения слоев хорошо известны в оптической промышленности, что позволяет создавать недорогие фильтры с различными спектральными свойствами.

Тонкопленочные фильтры имеют полосу пропускания достаточную для использования в системах WDM с 16-ю и 32-мя каналами.

На рисунок 2.2 приведена структурная схема оптического мультиплексора/демультиплексора, состоящая из набора тонкопленочных фильтров, каждый из которых добавляет/выделяет из общего сигнала один информационный. Фильтры расположены под наклоном  $\theta_{TF}=45^\circ$  к оптической оси, чтобы отраженный свет не попал обратно в общий сигнал.

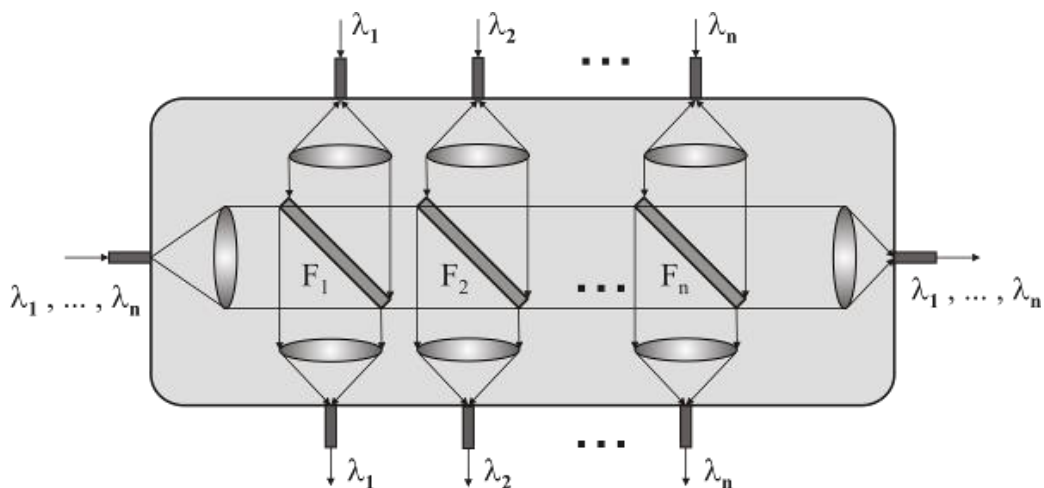


Рисунок 2.2 – Мультиплексор/демультиплексор на основе многоступенчатой системы тонкопленочных фильтров, где  $F_1, F_2, \dots, F_n$  – набор фильтров, настроенных каждый на свою длину волны.

На рисунке 2.3 представлена структурная схема модуля мультиплексора/демультиплексора для выделения/ответвления одного канала из группового

сигнала. Основу модуля составляют два одинаковых интерференционных фильтра находящихся в разных плечах интерферометра Маха-Цендера [2].

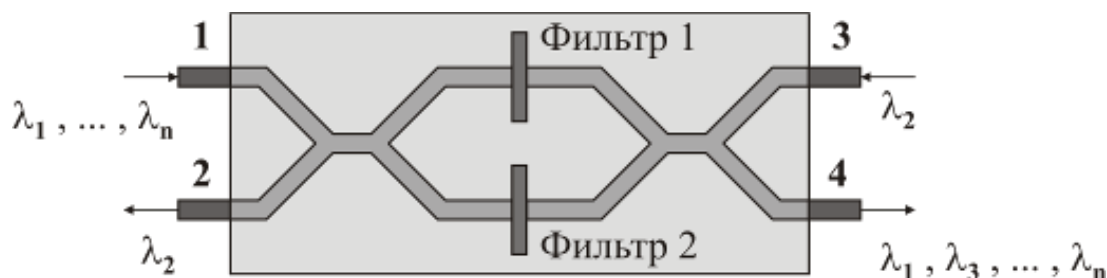


Рисунок 2.3 – Модуль мультиплексирования/демультиплексирования одного канала, на основе интерференционных фильтров и интерферометра Маха-Цендера.

Рассмотрим принцип действия этого устройства на примере выделения второго канала с  $\lambda_2$ . Групповой сигнал подается на вход **1**, делится поровну и попадает на фильтры, для которых условие Брегга выполняется для оптической несущей второго канала. Далее сигнал второго канала отражается от фильтра, вновь попадает на направленный ответвитель, где когерентно складывается и поступает на вход **2**. Этот модуль может так же добавлять сигнал с заданной несущей (в данном случае с  $\lambda_2$ ) в групповой сигнал, через порт **3**. Структурная схема демультиплексора на основе этого модуля, представлена на рисунке 2.4.

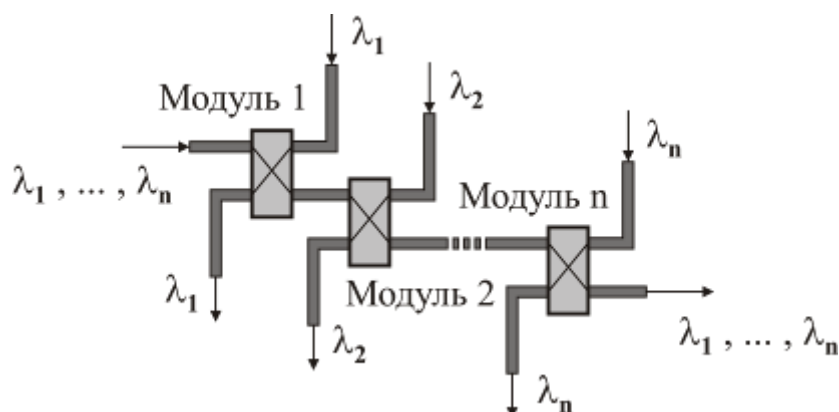


Рисунок 2.4 – Мультиплексор/демультиплексор на основе интерферометров Маха-Цендера.

К недостаткам демультиплексоров на основе этих модулей можно отнести условие точного равенства плеч у интерферометра Маха-Цендера.

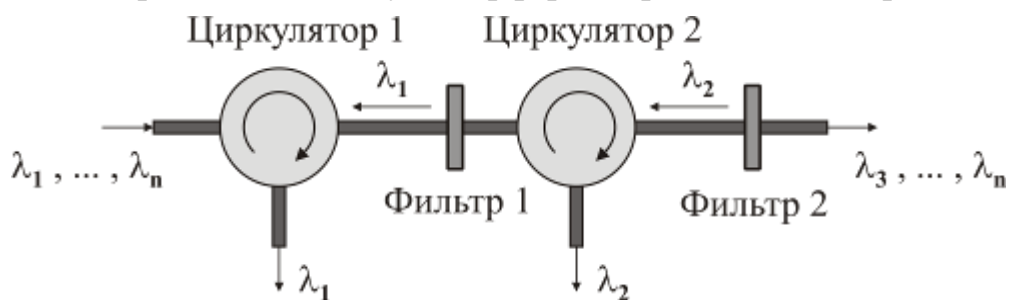


Рисунок 2.5 – Демультиплексор на основе циркулятора.

Часто, при построении демультиплексоров, используется структурная схема изображённая на рисунке 2.5. Из группового сигнала, фильтр отражает обратно только один канал, который затем отводится с помощью циркулятора.

Данная схема позволяет изготавливать интерференционный фильтр непосредственно в оптическом (фоточувствительном) волокне, как показано на рисунке 2.6. Такая конструкция называется *волоконная решётка*.

Волокно можно сделать фоточувствительным, если в него добавить примеси германия. Затем это волокно подвергают воздействию ультрафиолетового света, что вызывает изменения показателя преломления в сердцевине волокна. Обычно решётка создаётся с помощью облучения волокна двумя интерферирующими ультрафиолетовыми лучами.

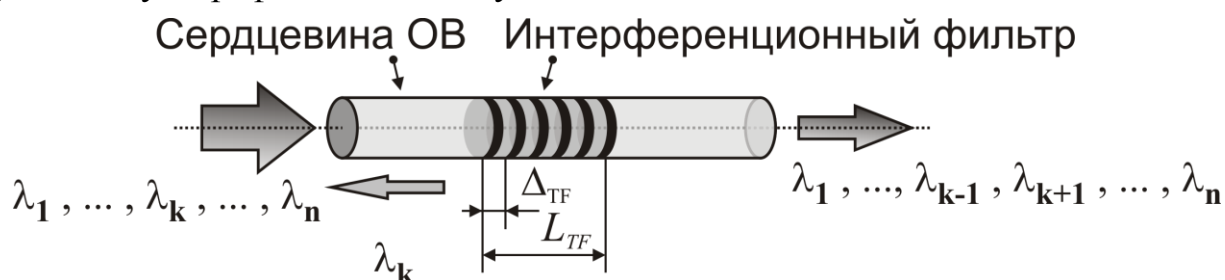


Рисунок 2.6 – Конструкция интерференционного фильтра, выполненного в оптическом волокне (волоконная решётка).

Для производства решеток также может быть использована фазовая маска, которая расщепляет пучок ультрафиолетового света на различные дифракционные порядки, которые, интерферируя, создают решетку внутри

## 2.2 Математическая модель

Расчёт основных характеристик интерференционного фильтра основан на теории Брэгговского отражения и представляет собой типичный пример связи между противоположно направленными модами [1].

На каждой границе раздела, часть падающего светового пучка отражается, вследствие различия показателей преломления. Отраженные волны интерферируют с падающей волной и в зависимости от длины оптической волны, усиливаются либо подавляются (рисунок 2.7).

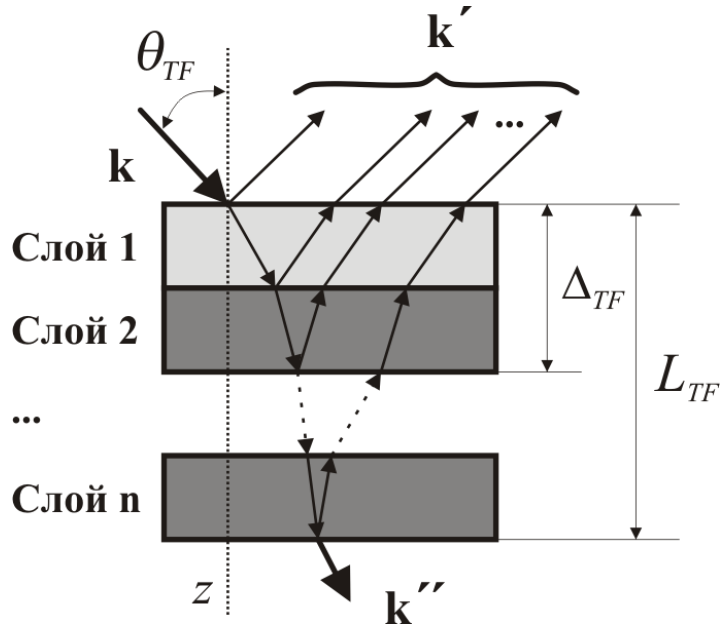


Рисунок 2.7 – Брэгговское отражение

В математической модели интерференционного фильтра, предположим, что толщина всех слоев одинакова, а зависимость диэлектрической проницаемости от  $z$  имеет вид:

$$\varepsilon(z) = \begin{cases} e_0 n_2^2, & 0 < z < \frac{1}{2} \Delta_{TF} \\ e_0 n_1^2, & \frac{1}{2} \Delta_{TF} < z < \Delta_{TF} \end{cases} \quad (2.1)$$

Нормальные моды невозмущенной среды представляют собой плоские волны  $e^{-ikr}$  с волновым числом, определяемым выражением:

$$k(\lambda) = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{n_1^2 + n_2^2}{2}} \quad (2.2)$$

В соответствии с состоянием поляризации эти плоские волны подразделяются на *TE*- и *TM*-волны, между которыми нет связи, поскольку как возмущенная так и невозмущенная диэлектрические проницаемости являются скалярными величинами. Следовательно, связь между волнами может быть, только если они имеют одинаковые состояния поляризации. Это возможно лишь для случая противоположно направленных мод, поскольку для одинаково направленных мод условие фазового синхронизма вообще не выполняется.

Характер модовой связи как для *TE*-, так и для *TM*-волн аналогичен. Отличие состоит только в том, что они имеют разные значения постоянной связи, которая вычисляется согласно выражениям:

$$\mathbf{K}(\lambda) = \begin{cases} \frac{i}{m\lambda \cos \theta_{TF}} \sqrt{\frac{2}{n_2^2 + n_1^2}} (n_2^2 - n_1^2) & (TE - \text{волна}) \\ \frac{i}{m\lambda \cos \theta_{TF}} \sqrt{\frac{2}{n_2^2 + n_1^2}} (n_2^2 - n_1^2) \cos \theta_{TF} & (TM - \text{волна}) \end{cases} \quad (2.3)$$

Постоянные связи отличаются лишь направляющим множителем  $\cos(2\theta_{TF})$ , который равен косинусу угла между векторами поляризации *TM*-волн.

Для *ТМ*-волн при  $\theta_{TF} = 45^\circ$ , постоянная связи обращается в нуль. Это соответствует нулевому отражению *ТМ*-волн при угле Брюстера.

Величина фазового рассогласования  $\Delta\beta(\lambda)$  (определяет, при каком  $\lambda$  будет выполняться условие Брегга), определяется выражением:

$$\Delta\beta(\lambda) = 2k(\lambda)\cos\theta_{TF} - m\left(\frac{2\pi}{\Delta_{TF}}\right) \quad (2.4)$$

В соответствии с этим выражением, брегговское отражение четных порядков отсутствует, поскольку при  $m=2,4,6$ , и т.д.,  $k=0$ . Это соответствует случаю, когда толщина каждого слоя составляет целое число длин волн, что приводит к нулевому отражению.

Для того чтобы получить выражение для коэффициента отражения интерференционного фильтра, предположим, что для света, падающего при  $z=0$ , выполняются следующие граничные условия:  $A_1(0)=1$ ,  $A_2(L)=0$ , где  $A_1$  и  $A_2$  – нормированные амплитуды падающей и отражённой волн.

Коэффициент матрицы передачи для  $i$ -ого канала демультиплексора (коэффициент отражения, аппаратная функция или спектр отражения) определяется следующим образом:

$$T_i = \left| \frac{A_2(0)}{A_1(0)} \right|^2 \quad (2.5)$$

где  $A_1(0)$  и  $A_2(0)$  – амплитуды падающей и отражённой волн. Решая уравнения связанных мод, получим:

$$T_i(\lambda) = \frac{K(\lambda) \cdot K(\lambda) \cdot sh^2 s(\lambda) L_{TF}}{s(\lambda)^2 ch^2 s(\lambda) L_{TF} + \left(\frac{\Delta\beta(\lambda)}{2}\right)^2 sh^2 s(\lambda) L_{TF}} \quad (2.6)$$

где  $s(\lambda)$  дается выражением  $s(\lambda)^2 = K(\lambda) \cdot K(\lambda) - (\Delta\beta(\lambda)/2)^2$ .

Таким образом, аппаратная функция (коэффициент отражения) интерференционного фильтра рассчитывается по формуле (2.6). Она состоит из основного пика с отчетливым максимумом и ряда побочных пиков.

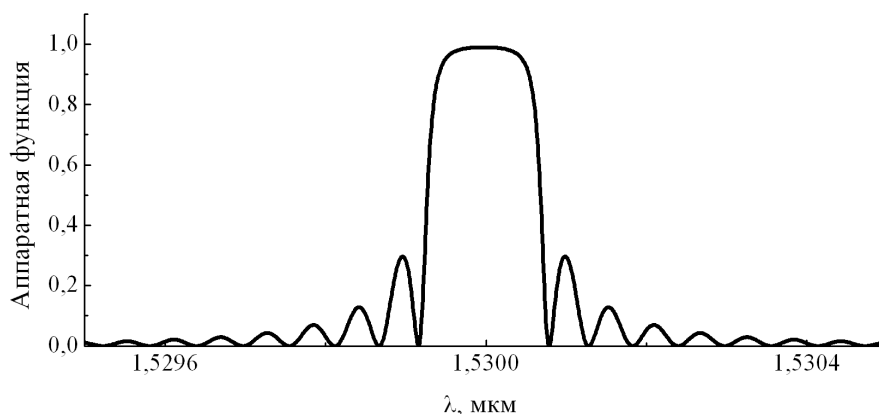


Рисунок 2.8 – Типичный вид аппаратной функции интерференционного фильтра.

На рисунке 2.8, изображена аппаратная функция интерференционного фильтра, рассчитанного согласно выражению 2.6 со следующими параметрами:  $n_1=3.47$ ,  $n_2=3.4704$ ,  $L_{TF}=5.725$ мм,  $\theta_{TF}=0^\circ$ ,  $\Delta_{TF}=0.220448$ мкм. По приведенному

графику можно определить полосу пропускания канала ( $\Delta\lambda$ ) – 0.14нм.

### 2.3 Расчет основных оценочных характеристик

Для того чтобы построить демультиплексор на основе интерференционных фильтров, по какой либо из структурных схем, изображённых на рисунках 2.2, 2.4, либо 2.6, необходимо рассчитать некоторые конструкционные параметры этих фильтров, в соответствии с заданными требованиями к разрабатываемому демультиплексору. Определим эти параметры.

#### Центральная длина отражённой оптической волны $\lambda_i$

(где,  $i=1, 2, \dots, \mathbf{n}$ ;  $\mathbf{n}$  – число каналов демультиплексора)

Прежде всего, каждый фильтр должен быть настроен на свою длину волны  $\lambda_i$ , для выделения из группового сигнала одного информационного канала. Это означает, что на заданной длине волны, коэффициент  $T_i$  должен быть максимальным, что достигается при  $\Delta\beta(\lambda_i)=0$ , т.е. когда выполняется условие Брега:

$$T(\lambda_i)_{\max} = th^2(|K(\lambda_i)|L_{TF}) \quad (2.7)$$

Т.к. речь идёт о фильтре настроенном на отражение центральной длины волны  $\lambda_i$ , то индекс  $i$  у коэффициента передачи опускаем. Из этого выражения найдём  $\lambda_i$ :

$$\lambda_i = \sqrt{2} \cdot \Delta_{TF,i} \cdot \sqrt{n_{1i}^2 + n_{2i}^2} \cdot \cos \theta_{TF,i} \quad (2.8)$$

Видно, что на центральную длину отражённой волны влияют все конструкционные параметры фильтра, кроме толщины структуры  $L_{TF}$ . Для приведённых структурных схем демультиплексоров, угол  $\theta_{TF,i}$  фиксированный (либо  $0^\circ$ , либо  $45^\circ$ ). Показатели преломления, кроме величины фазовой расстройки входят и в выражение постоянной связи, следовательно, оказывают влияние и на полосу пропускания фильтра. Таким образом, у показателей преломления и у угла наклона фильтра индекс  $i$  можно опустить, а для настройки  $i$ -ого фильтра на отражения спектра с заданной центральной длиной волны  $\lambda_i$ , (согласно частотному плану ITU-T), необходимо подобрать для него только период структуры  $\Delta_{TF,i}$ , который однозначно определяется выражением 2.8. Согласно этому выражению, фильтр, построенный на основе параметров, соответствующих аппаратной функции, изображенной на рис.2.8, отражает спектр с центральной длиной волны равной 1.53мкм.

#### Ширина полосы пропускания ( $\Delta\lambda$ )

Ширина полосы пропускания фильтра определяет переходные помехи в демультиплексоре. Чем она уже, тем большее число каналов можно разместить в одном и том же частотном диапазоне. На ширину полосы пропускания интерференционного фильтра оказывает влияние значение постоянной связи, в которую входит разностью показателей преломления  $\Delta n$  и толщина структуры  $L_{TF}$ .

Важно подобрать такие значения этих параметров, чтобы коэффициент отражения для  $\lambda_i$  был максимальным (т.е. близок к единице), а ширина полосы



пропускания фильтров такая, что переходные помехи  $P_i$  у демультиплексора будут не более заданных (приложение Б).

Таким образом, чтобы найти максимальное отражение, при заданной центральной длине волны  $\lambda_i$  необходимо решить уравнение:

$$T_{\max}(\lambda_i) = 0.999 \quad (2.9)$$

Как было сказано выше, на максимальное отражение и ширину полосы пропускания существенное влияние оказывает длина периодической структуры  $L_{TF}$  и разность показателей преломления  $\Delta n = |n_2 - n_1|$ . Чем уже должна быть ширина полосы пропускания, тем больше должно быть  $L_{TF}$  и меньше  $\Delta n$ . Следовательно, уравнение 2.9 можно переписать в виде:

$$T_{\max}(\lambda_i, L_i, \Delta n) = 0.999 \quad (2.10)$$

Из этого уравнения можно выразить только толщину структуры  $L_{TF,i}$ , при заданном  $\Delta n$ :

$$L_{TF,i} = \frac{\operatorname{ath}(\sqrt{0.99})}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\lambda_i \cdot \cos(\lambda_i) \cdot \sqrt{n_2^2 + n_1^2}}{|n_2^2 - n_1^2|} \quad (2.11)$$

Таким образом, для достижения у демультиплексора заданных переходных помех, необходимо у фильтров варьировать величину  $\Delta n$ , а толщина структуры для  $i$ -ого фильтра будет определяться выражением 2.11.

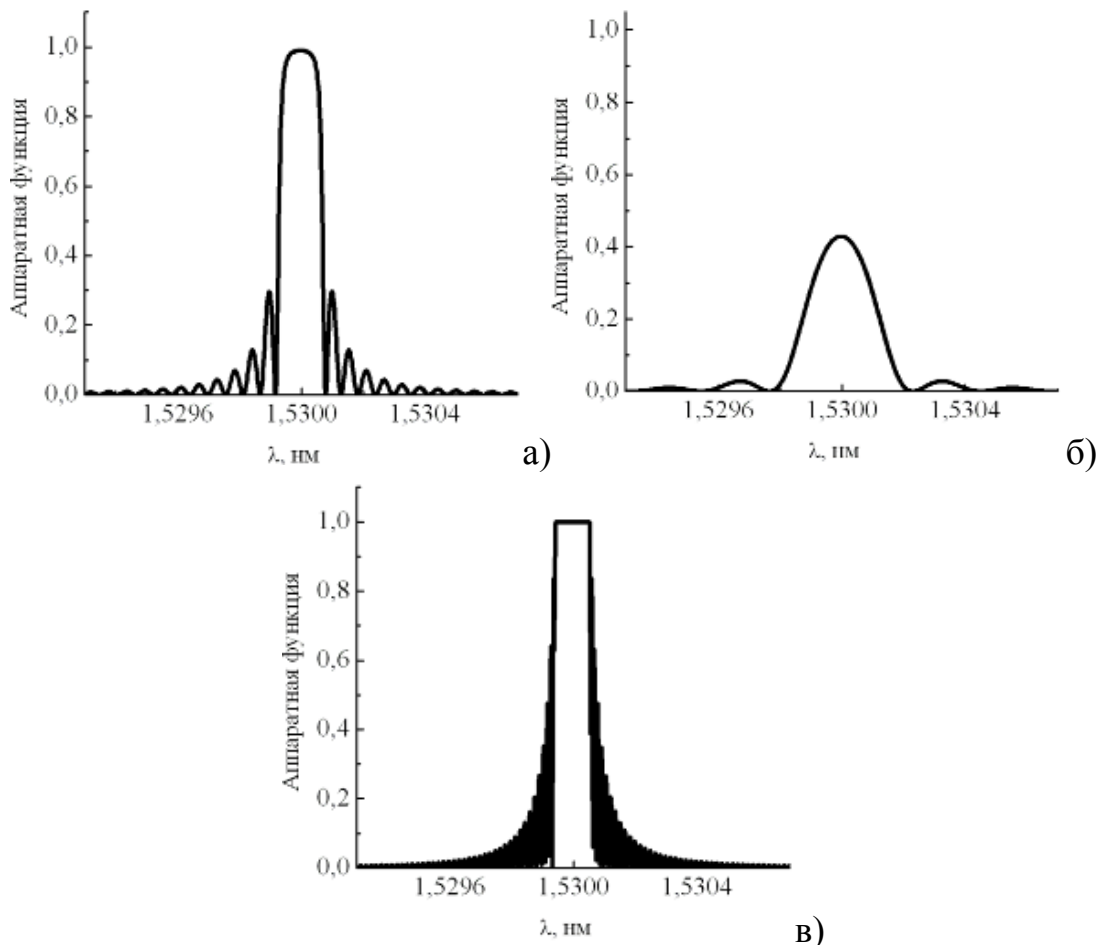


Рисунок 2.9 – Аппаратные функции тонкоплёночных фильтров, рассчитанных при различных значениях  $L_{TF}$  (мкм): а) 5.725, б) 1.5, в) 20.

На рисунке 2.9, изображены аппаратные функции фильтров ( $n_1=3.47$ ,  $n_2=3.4704$ ,  $\theta_{TF}=0^\circ$ ,  $\Delta_{TF}=0.220448\text{мкм.}$ ), настроенных на центральную длину волны  $1.53\text{мкм}$ , при различных значениях  $L_{TF}$ .

У зависимости изображённой на рисунке 2.9а, толщина структуры рассчитана по формуле (2.27) ( $L_{TF}=5.725\text{мкм}$ ). Эта толщина является оптимальной. На рисунке 2.9б, зависимость рассчитана при меньших значениях толщины, что сказывается на коэффициенте отражения, а на 2.9в при больших, что приводит к насыщению.

### Вывод

Таким образом, для того чтобы программно рассчитать конструкционные параметры демультиплексор на основе интерференционных фильтров необходимо:

1. Определить угол падения светового пучка на фильтры  $\theta_{TF}$ , исходя из схемы построения демультиплексора (рисунки 2.2, 2.4, 2.6);
2. Исходя из частотного плана ИТУ-Т, выбрать центральные частоты информационных каналов ( $\lambda_i$ ) и число каналов ( $n$ ).
3. Рассчитать для каждого  $i$ -ого фильтра значения  $\Delta_{TF,i}$  по формуле (2.8).
4. Рассчитать значение  $L_{TF,i}$  по формул (2.11).
5. Определить для фильтров значения полосы пропускания  $\Delta\lambda$ .
6. Задать для фильтров оценочные показатели преломления  $n_1$  и  $n_2$ , исходя из стандартных границ для показателей преломления и величины  $\Delta n$ .
7. Варьируя значение  $\Delta n$  добиться, чтобы максимальная переходная помеха  $P_{max}$ , была не больше чем заданная в техническом задании ( $P_0$ ).

Данную последовательность действий поясняет блок-схема на рисунке 2.10.

На рисунке 2.11 изображена аппаратная функция демультиплексора на четыре канала, для частотного плана 100 ГГц, рассчитанная по вышеприведённой схеме. Максимальная переходная помеха для него составляет -23 Дб.

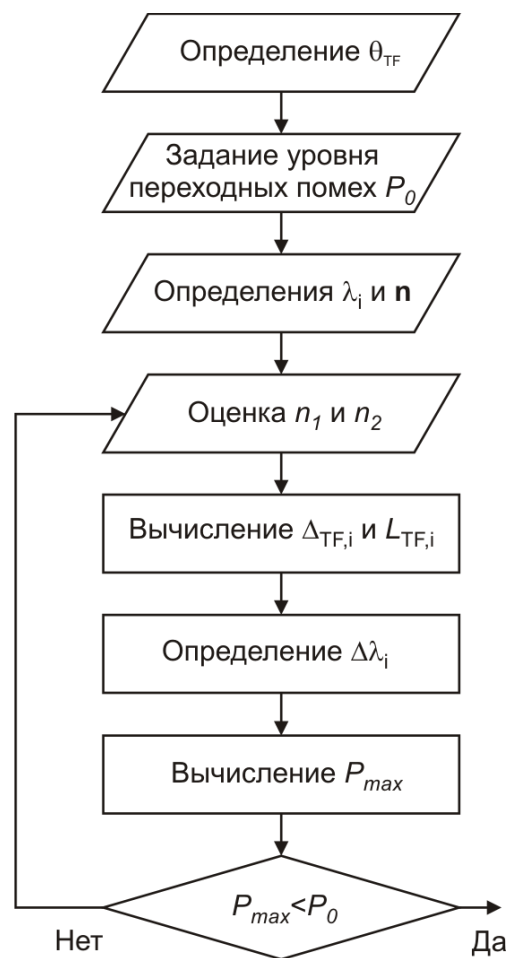


Рисунок 2.10 – Блок-схема построения демультиплексора на основе интерференционных фильтров.

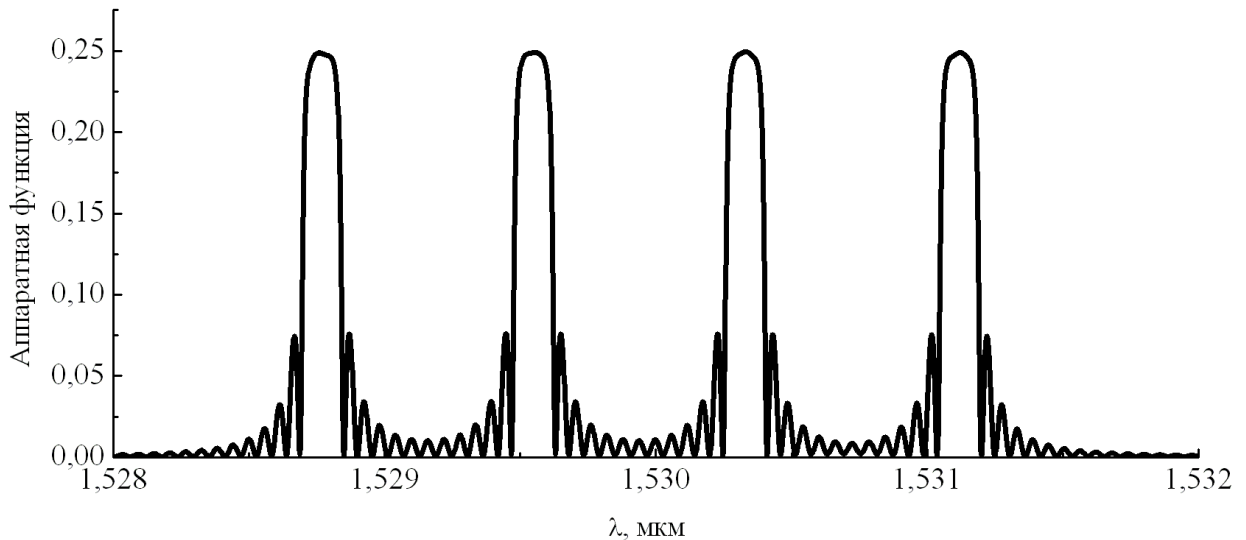


Рисунок 2.11 – Аппаратная функция демультиплексора на основе интерференционных фильтров.

### 3 Мультиплексоры на фильтрах Фабри –Перо

#### 3.1 Принцип действия и структура мультиплексора

Два полупрозрачных зеркала, расположенных на некотором расстоянии друг от друга образуют резонатор Фабри–Перро (рисунок 3.1).

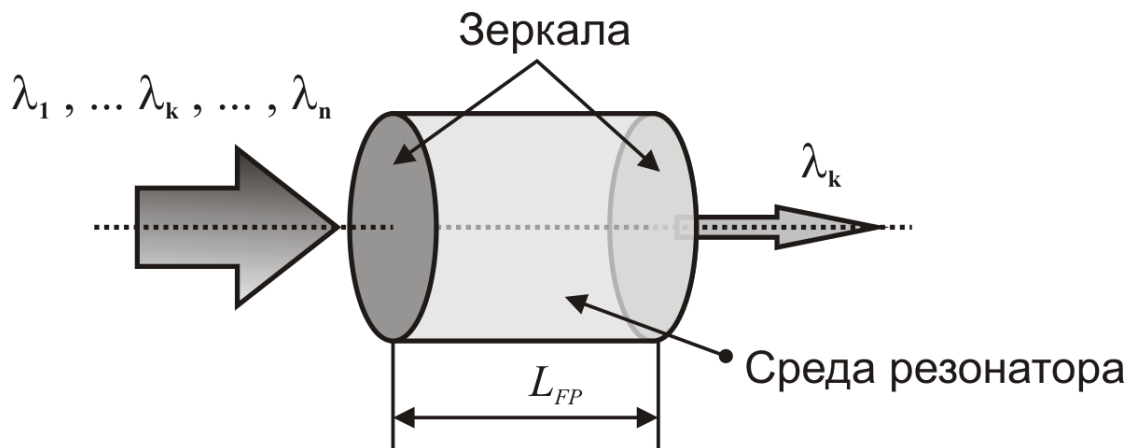


Рисунок 3.1 – Конструкция фильтра на основе резонатора Фабри–Перро, где  $L_{FP}$  – длина резонатора.

Отраженный луч внутри резонатора многократно отражается от зеркал и если  $L_{FP}$  кратно  $\lambda_k/2$ , то все лучи, проходящие через правое зеркало, оказываются в фазе. Длины оптических волн  $\lambda_k$  называются резонансными.

Данная конструкция очень чувствительна к погрешностям изготовления. Наличие очень узких максимумов приводит к тому, что при незначительном отклонении длины резонатора от заданной, пик пропускания существенно сме-

щается. Особенно критичны к погрешности длины резонатора фильтры с более высокими коэффициентами отражения зеркал.

Полоса пропускания таких фильтров достаточно широкая по сравнению с фильтрами на плёнках, а аппаратная функция имеет периодический характер, что делает их применение в WDM системах с большой плотностью размещения каналов, практически невозможным.

Для фильтров Фабри–Перро можно предложить схему, показанную на рисунке 3.2. С оптического волокна сигнал поступает на набор фильтров, настроенные каждый на «свою» оптическую несущую.

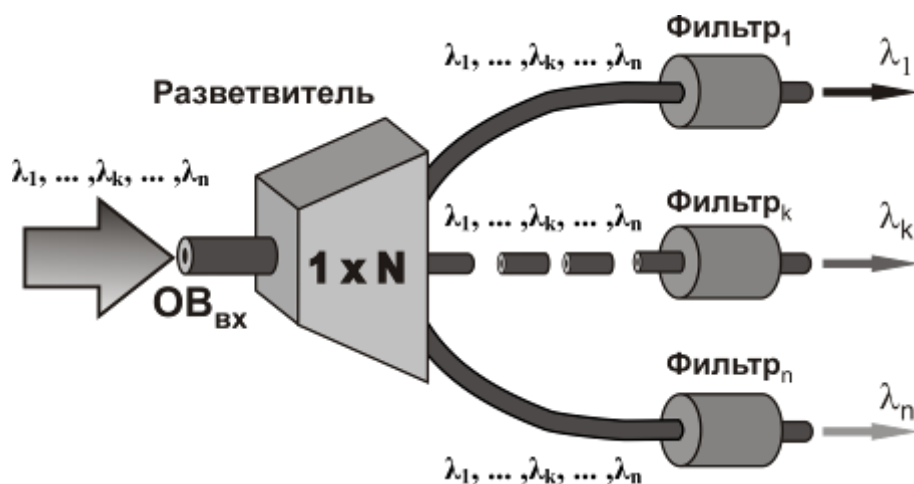


Рисунок 3.2 – Схема оптического демультиплексора многоволнового сигнала.

Интересной особенностью фильтра Фабри-Перро является возможность его динамической настройки на заданную длину волны путём изменения расстояния между зеркалами. Но высокую разрешающую способность можно реализовать только в том случае, когда коэффициент отражения зеркал близок к единице.

### 3.2 Математическая модель

Коэффициент матрицы передачи для  $i$ -ого канала демультиплексора построенного на фильтрах Фабри-Перро, определяется следующим выражением [2]:

$$T_i(\lambda) = \frac{(1 - R_{FP})^2}{(1 - R_{FP})^2 + 4R_{FP} \left[ \sin\left(2\pi \frac{L_{FP} \cdot n}{\lambda}\right) \right]^2} \quad (3.1)$$

где,  $R_{FP}$  – коэффициент отражения зеркал,  $n$  – показатель преломления среды резонатора. Также в выражении предполагается, что свет падает нормально на резонатор. Из формулы видно, что спектр пропускания фильтра имеет периодический характер.

Таким образом, коэффициент пропускания фильтра на основе резонатора Фабри-Перро (аппаратная функция или спектр пропускания) рассчитывается по формуле (3.1).

На рисунке 3.3, изображена аппаратная функция фильтра на основе резо-

натора Фабри–Перро, рассчитанного по формуле (3.1) со следующими параметрами:  $n=1.53$ ,  $L_{FP}=100\text{мкм}$ ,  $R_{FP}=0.9$ .

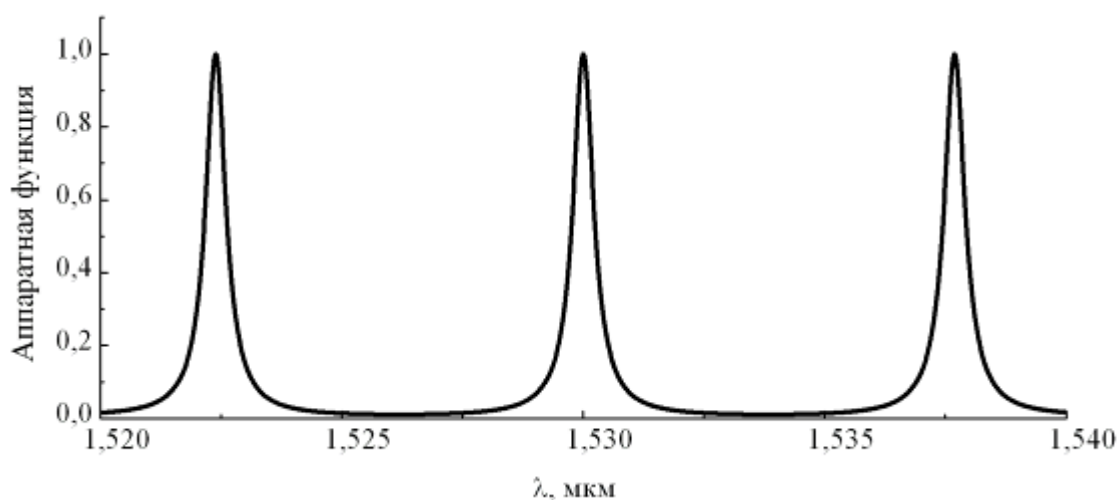


Рисунок 3.3 – Типичный вид аппаратной функции фильтра на основе резонатора Фабри–Перро.

По приведенному графику можно определить полосу пропускания канала – 0.5нм.

### 3.3 Расчет основных оценочных характеристик

Для того чтобы построить демультиплексор по схеме изображённой на рисунке 3.2, необходимо рассчитать некоторые конструкционные параметры фильтров, в соответствии с заданными требованиями к разрабатываемому демультиплексору. Определим эти параметры.

#### Центральная длина отражённой оптической волны $\lambda_i$

Для того чтобы на заданной длине волны  $\lambda_i$  (согласно частотному плану ITU-T) пропускание фильтра было максимально необходимо, чтобы выражение, стоящее под знаком синуса равнялось  $m\pi$ , где  $m=1,2,3, \dots$ , т.е. при длине резонатора выраженной целым числом, для пропускания оптической волны с центром на  $\lambda_i$ , должно выполняться следующее отношение:

$$\frac{n_i}{\lambda_i} = m \quad (3.2)$$

где  $n_i$  – показатель преломления для  $i$ -ого фильтра, а  $\lambda_i$  в берётся в микрометрах.

Согласно этому отношению, фильтр, построенный на основе параметров, соответствующих аппаратной функции, изображенной на рисунке 3.3, пропускает спектр со следующими центральными длинами волн: 1.52239мкм, 1.53мкм, 1.53769мкм (в пределах изменения  $\lambda$  от 1.52 до 1.54 мкм).

#### Ширина полосы пропускания

На ширину полосы пропускания фильтра на основе интерферометра Фабри-Перро оказывает влияние коэффициент отражения зеркал  $R_{FR}$  и длина резонатора  $L_{FP}$ . Чем выше коэффициент отражения зеркал и чем больше значение  $L_{FP}$  тем уже будет ширина полосы пропускания.

Из-за периодичности аппаратной функции фильтра, следующий максимум первого канала может попасть в спектр последнего информационного канала (рисунок 3.4). По этому, необходимо рассчитать такую длину резонатора  $L_{FP}$ , чтобы период аппаратной функции был больше свободного спектрального диапазона демультиплексора  $\Delta\lambda_{FSR}$  ( $\Delta\lambda_{FSR} = \lambda_n - \lambda_1$ ). На рисунке 3.4, этот период обозначен как  $\Delta\lambda'_{FSR}$ .

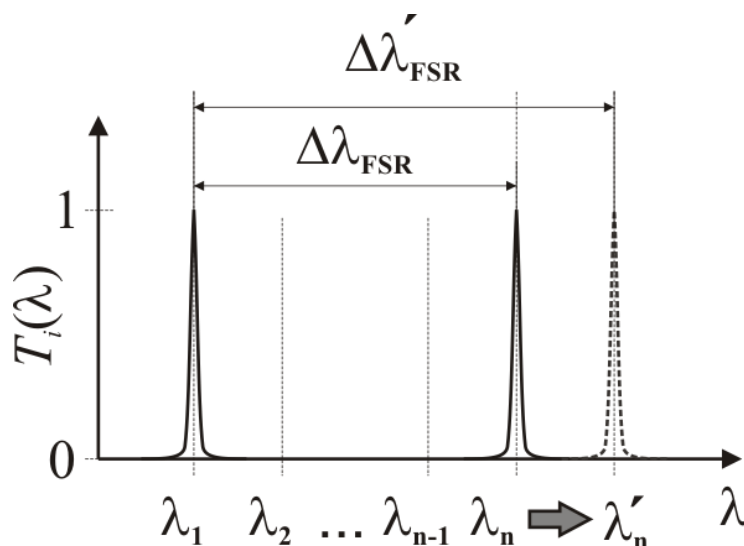


Рисунок 3.4

Длина резонатора, при известном периоде аппаратной функции  $\Delta\lambda'_{FSR}$ , и центральной длине волны  $\lambda_i$  находится из выражения 3.1 и равна:

$$L_{FP,i} = \text{int} \left( \lambda_i \cdot \frac{\Delta\lambda'_{FSR} + \lambda_i}{2 \cdot \Delta\lambda'_{FSR} \cdot n} \right) \quad (3.3)$$

где значения  $\lambda_i$ , и  $\Delta\lambda'_{FSR}$  берутся в микрометрах. Из формулы видно, что наибольшая длина резонатора будет у фильтра настроенного на пропускание последнего канала. Величину  $\Delta\lambda'_{FSR}$  можно оценить по формуле:

$$\Delta\lambda'_{FSR} = \Delta\lambda_{FSR} + \Delta\lambda_k \quad (3.4)$$

где  $\Delta\lambda_k$  – канальный интервал демультиплексора в микрометрах. Данная формула является эмпирической, полученной при условии, что последний канал демультиплексора будет вносить переходную помеху в первый канал не больше чем -25 Дб.

Значение  $R$  обычно лежит в диапазоне от 0.9 до 0.99 и для его оценки можно воспользоваться формулой ( $\Delta\lambda_k$  в микрометрах):

$$R_{FP} = 1 - \sqrt{\Delta\lambda_k} \quad (3.5)$$

Так как канальный интервал для всех фильтров единый, то полученный коэффициент отражения будет справедлив для всех фильтров входящих в демультиплексор.

Формула (3.5) также эмпирическая и получена при условии, что  $i$ -ый канал демультимплексора будет вносить переходную помеху в соседний канал не больше чем -25 Дб.

### Вывод

Таким образом, для того чтобы программно рассчитать демультимплексор основе фильтров Фабри-Перро необходимо:

1. Исходя из частотного плана ИТУ-Т, выбрать центральные частоты информационных каналов ( $\lambda_i$ ) и число каналов ( $\mathbf{n}$ ).
2. Вычислить для каждого фильтра показатель преломления резонатора ( $n_i$ ),.
3. Вычислить для каждого фильтра длину резонатора  $L_{FP,i}$ .
4. Оценить коэффициент отражения зеркал резонаторов  $R_{FP}$  по формуле (3.5).
5. Определить для фильтров значения полосы пропускания  $\Delta\lambda$ .
6. Варьируя значения  $R_{FP}$  и  $L_{FP,i}$ , добиться, чтобы максимальная переходная помеха  $P_{max}$ , была не больше чем заданная в техническом задании ( $P_0$ ).

Данную последовательность действий поясняет блок-схема на рисунке 3.5.

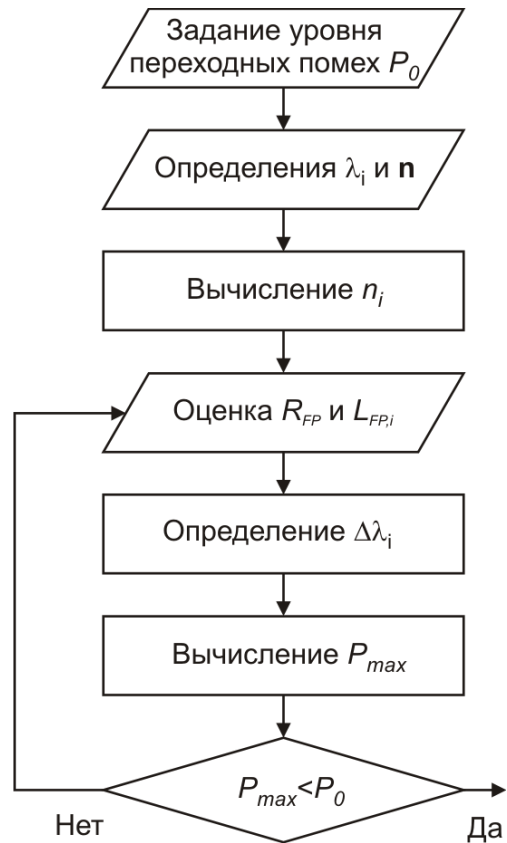


Рисунок 3.5 – Блок-схема построения демультимплексора на основе фильтров Фабри-Перро.

## 4 Рекомендации по выполнению работы

### 4.1 Расчётное задание

1. Согласно своему варианту задания, из таблицы 1 получить исходные данные для расчёта демультимплексора.
2. По таблице ITU-T найти число каналов  $n$  и центральные частоты  $\lambda_j$ .

Таблица 4.1 – Исходные данные для выполнения работы

Параметры	Вариант				
	1	2	3	4	5
Диапазон длин волн*	1528,77 нм – 1532,68 нм	1528,77 нм – 1536,61 нм	1546,12 нм – 1554,13 нм	1539,77 нм – 1549,32 нм	1535,82 нм – 1538,98 нм
$\Delta f_k$ , ГГц	100	200	400	200	100
$P_0$ (Дб)**	20	22	25	26	22
Тип [И.Ф]***	В.Р.	Р.Ф.П.	И.М-Ц.	В.Р.	Р.Ф.П.
$n_l$ [И.Ф]****	1.458	1.56	1.55	1.458	1.51
Параметры	Вариант				
	6	7	8	9	10
Диапазон длин волн*	1549,32 нм – 1553,33 нм	1533,47 нм – 1542,94 нм	1546,12 нм – 1554,13 нм	1535,04 нм – 1557,36 нм	1530,33 нм – 1536,61 нм
$\Delta f_k$ , ГГц	100	200	400	500	200
$P_0$ (Дб)**	21	19	25	18	24
Тип [И.Ф]***	И.М-Ц.	В.Р.	Р.Ф.П.	И.М-Ц.	В.Р.
$n_l$ [И.Ф]****	1.5	1.458	1.59	1.52	1.458
Параметры	Вариант				
	11	12	13	14	15
Диапазон длин волн*	1550,92 нм – 1554,13 нм	1550,92 нм – 1560,61 нм	1533,47 нм – 1557,36 нм	1533,47 нм – 1557,36 нм	1541,35 нм – 1550,92 нм
$\Delta f_k$ , ГГц	100	200	600	1000	200
$P_0$ (Дб)**	23	20	18	19	24
Тип [И.Ф]***	Р.Ф.П.	И.М-Ц.	В.Р.	Р.Ф.П.	И.М-Ц.
$n_l$ [И.Ф]****	1.557	1.533	1.458	1.55	1.565

\* – центральные максимумы первого и последнего канала;

\*\* – уровень переходных помех, который должен обеспечивать демультимплексор.



- \*\*\* – тип демультиплексора, построенного на интерференционных фильтрах: **И.М-Ц** – Интерферометр Маха-Цендера, **Р.Ф-П.** – резонатор Фабри-Перро, **В.Р.** – волоконная решётка;
- \*\*\* – значение показателя преломления  $n_i$  для демультиплексора построенного на интерференционных фильтрах.

### Исследование оптического демультиплексора, на основе интерференционного фильтра.

1. Определить угол падения светового пучка на фильтр, исходя из данной в задании схемы построения демультиплексора.
2. Рассчитать период структуры для всех тонкоплёночных фильтров, входящих в демультиплексор и толщину фильтров для  $\Delta n=10^{-4}$ ,  $3 \cdot 10^{-4}$ ,  $7 \cdot 10^{-4}$  и  $10^{-3}$ . Толщину всех фильтров считать постоянной, равной толщине центрального фильтра. Результаты расчёта для всех  $\Delta n$  занести в таблицу:

Параметр/ № фильтра	1	2	...	n
$\lambda_i$				
$\Delta_{TF,i}$				
$L_{TF}$				

### Исследование оптического демультиплексора, на основе фильтров Фабри-Перро.

1. Найти показатели преломления среды резонатора для каждого фильтра.
2. Оценить значение коэффициента отражения зеркал.
3. Оценить значение длины резонатора для центрального фильтра демультиплексора настроенного на отражение спектра с максимальной центральной длиной волны. Это значение будем считать постоянным для всех фильтров демультиплексора. Оно равно длине последнего фильтра. Все результаты расчёта занести в таблицу:

Параметр/ № фильтра	1	2	...	n
$\lambda_i$				
$n$				
$R_{FP}$				
$L_{FP}$				

## 4.2 Экспериментальное задание

Занести в расчётную программу количества каналов демультиплексора и центральные частоты, отражаемые фильтрами

### Исследование оптического демультиплексора, на основе интерференционного фильтра.

1. Исследовать зависимость максимальных переходных помех ( $P_{max}$ ) от  $\Delta n$ . Для этого необходимо определить переходные помехи демультиплексора, при различных значениях  $\Delta n$ , вычисленных в расчётном задании (перед расчётом  $P$ , необходимо определить  $\Delta\lambda$ ). Результаты занести в таблицу:

Параметр / $\Delta n$	$10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$	$10^{-3}$
$\Delta\lambda$ (нм)				
$P_{max}$				

По таблице постройте зависимость  $P_{max}(\Delta n)$ . В отчёте, так же отобразите полученные графики аппаратных функции демультиплексоров и рассчитанные графики переходных помех, при различных значениях  $\Delta n$ . Объясните, чем вызвано различие в переходных помехах.

2. Найти оптимальную разницу показателей преломления, при которой максимальный уровень переходных помех будет равен  $P_0 \pm 1$  дБ. Для этого, необходимо, на основе аппроксимации зависимости  $P_{max}(\Delta n)$  найдите такой  $\Delta n$ , который удовлетворял бы уравнению  $P_{max}(\Delta n) = P_0 \pm 1$  дБ. Обозначим его как  $\Delta n_{opt}$ .
3. Рассчитать конструкционные параметры фильтров, при  $\Delta n_{opt}$ . На основе полученных параметров смоделировать аппаратную функцию демультиплексора и рассчитать переходные помехи. Результаты занести в таблицу:

Параметр / № фильтра	1	2	...	n
$\lambda_i$				
$\Delta n_{opt i}$				
$\Delta_{TF}$				
$L_{TF, \text{int}(n/2)}$				
$\Delta\lambda$ (нм)				
$P_i$				

В отчёте отобразите смоделированный график аппаратной функции демультиплексора и рассчитанный график переходных помех. Объясните, чем вызван полученный вид зависимости переходных помех от номера канала.

4. Для демультиплексора с оптимальными параметрами, пронаблюдать влияние всех соседних каналов на каждый канал в отдельности. Объясните, чем вызван полученный вид зависимости переходных помех от номера канала.

### Исследование оптического демультиплексора, на основе фильтров Фабри-Перро.

1. Исследовать зависимость переходных помех от коэффициента отражения зеркал. Для этого необходимо определить переходные помехи демультиплексора для двух центральных соседних каналов (каналы с номерами  $\text{int}(n/2)$  и  $\text{int}(n/2)+1$ ) при  $R_{FP} = 0.9, 0.95$  и  $0.99$ . Для каждого коэффициента

отражения рассчитать длину резонатора. Значение  $\Delta\lambda'_{FSR}$  при этом будет равно:  $\Delta\lambda'_{FSR} = \Delta\lambda_{FSR} + (1-R)^2$ , где  $\Delta\lambda_{FSR}$  в микрометрах. Перед расчётом  $P$ , необходимо определить  $\Delta\lambda$ . Результаты занести в таблицу:

Параметр / $R_{FP}$	0.90	0.95	0.99
$\Delta\lambda$ (нм)			
$L_{FP}$ (мкм)			
$P_{max}$			

По таблице постройте зависимость  $P_{max}(R_{FP})$ . В отчёте, так же отобразите полученные графики аппаратных функции демультиплексоров (только для двух исследуемых каналов) и рассчитанные графики переходных помех, при различных значениях  $R$ . Объясните, чем вызвано различие в переходных помехах и почему были взяты каналы с номерами  $\text{int}(\mathbf{n}/2)$  и  $\text{int}(\mathbf{n}/2)+1$ .

2. Найти оптимальный коэффициент отражения зеркал, при котором максимальный уровень переходных помех будет равен  $P_0 \pm 1$  дБ. Для этого, необходимо, на основе аппроксимации (либо экстраполяции) зависимости  $P_{max}(R_{FP})$  найдите такой  $R_{FP}$ , который удовлетворял бы уравнению  $P_{max}(R_{FP}) = P_0 \pm 1$  дБ. Обозначим его как  $R_{FP, opt}$ .
3. Исследовать зависимость переходных помех от длины резонатора. Для этого необходимо определить переходные помехи демультиплексора для первого и последнего канала при  $L_{FP} = L_{FP, \text{расчётное}}, L_{FP, \text{расчётное}} - 10\%$  и  $L_{FP, \text{расчётное}} + 10\%$  (перед расчётом  $P$ , необходимо определить  $\Delta\lambda$ ). Коэффициент отражения зеркал для всех  $L_{FP}$  будет  $R_{FP, opt}$ . Результаты занести в таблицу:

Параметр / $L_{FP}$	$L_{FP, \text{расчётное}}$	$L_{FP, \text{расчётное}} - 10\%$	$L_{FP, \text{расчётное}} + 10\%$
$\Delta\lambda$ (нм)			
$P_{max}$			

По таблице постройте зависимость  $P_{max}(L_{FP})$ . В отчёте, так же отобразите полученные графики аппаратных функции демультиплексоров (только для первого и последнего каналов) и рассчитанные графики переходных помех, при различных значениях  $L_{FP}$ . Объясните, чем вызвано различие в переходных помехах и почему были взяты каналы с первым и последним номерами.

4. Найти оптимальную длину резонатора для последнего фильтра, при котором максимальный уровень переходных помех будет равен  $P_0 \pm 1$  дБ. Для этого, необходимо, на основе аппроксимации (либо экстраполяции) зависимости  $P_{max}(L_{FP})$  найдите такую  $L_{FP}$ , которая удовлетворяла бы уравнению  $P_{max}(L_{FP}) = P_0 \pm 1$  дБ. Обозначим её как  $L_{FP, opt}$ .
5. Рассчитать конструкционные параметры фильтров, при  $R_{FP, opt}$  и  $L_{FP, opt}$ . На основе полученных параметров смоделировать аппаратную функцию демультиплексора и рассчитать переходные помехи. Результаты занести в таблицу:

Параметр/ № фильтра	1	2	...	n
$\lambda_i$				
$n$				
$R_{FP, opt}$				
$L_{FP, opt}$				

В отчёте отобразите смоделированный график аппаратной функции демультиплексора и рассчитанный график переходных помех. Объясните, чем вызван полученный вид зависимости переходных помех от номера канала.

6. Для демультиплексора с оптимальными параметрами, пронаблюдать влияние всех соседних каналов на каждый канал в отдельности. Объясните, чем вызван полученный вид зависимости переходных помех от номера канала.

### Заключительная часть

Сравнить переходные помехи обоих демультиплексоров. Сделать выводы о возможности построения демультиплексора на интерференционных фильтрах и фильтрах Фабри-Перро.

### Содержание отчета

Отчет о проделанной работе должен содержать следующие разделы:

- Цель работы.
- Краткая теория.
- Результаты работы – графики с краткими пояснениями полученных зависимостей.
- Выводы по проделанной работе.

### Контрольные вопросы

- 1 Что такое волоконно-оптическая линия связи (ВОЛС). Изобразите обобщённую схему ВОЛС. Назовите основные элементы ВОЛС.
- 2 Какие вы знаете виды оптических демультиплексоров. В чём достоинства и недостатки каждого из них?
- 3 Как классифицируются оптические демультиплексоры?
- 4 На каких длинах волн работают WDM и DWDM демультиплексоры?
- 5 Назовите основные характеристики оптических демультиплексоров?

## 5 Описание программного обеспечения

# «КОМПЬЮТЕРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ДЕМУЛЬТИПЛЕКСОРОВ НА ОСНОВЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ФИЛЬТРОВ И ФИЛЬТРОВ ФАБРИ-ПЕРО»

Руководство пользователя  
(Редакция от 12.10.2006)

## **1. Общее описание**

### **1.1 Функциональное назначение системы, область применения и ограничения**

Компьютерная лабораторная работа «Исследование оптических демультиплексоров на основе интерференционных фильтров и фильтров Фабри-Перро» предназначена для расчета и оптимизации характеристик оптических демультиплексоров в учебных целях. Данная разработка может быть использована при обучении студентов технических вузов по направлению «Телекоммуникации», как в качестве лабораторной работы, так и в качестве инструмента для расчета и оптимизации данных демультиплексоров при курсовом проектировании волоконно-оптических систем передачи со спектральным разделением (ВОСП-СП), использующих демультиплексоры на основе интерференционных фильтров или фильтров Фабри-Перро в качестве одного из основных элементов.

Программное обеспечение представляет собой пакет программ генерации форм для задания параметров обоих демультиплексоров, отображения результатов расчета и вывода методических рекомендаций по работе с гипертекстовой навигацией. Пакет включает 15 вариантов заданий для проведения лабораторных работ, а также прикладные программы по проведению необходимых вычислений, предусматривающих численный расчет преобразований, описывающих волновые процессы в интерференционных фильтрах и фильтрах Фабри-Перро. В основу расчетов положены математические модели, описанные в [1]. Ограничения для модели, описывающей работу интерференционного фильтра, является одинаковая толщина всех слоёв и отсутствие обратного отражения, а для модели описывающей работу фильтра Фабри-Перро – нормальное падение света из торца оптического волокна на фильтр и отсутствие обратного отражения от фильтра. В п.2.2 приведена математическая модель, положенная в основу программного обеспечения.


### **1.2 Краткое описание системы и ее технические характеристики**

Компьютерная лабораторная работа, далее программа, представляет собой компьютерную программу, которая состоит из методического пособия (краткая теория с заданием на работу), входного теста и оболочки моделирования. Программа может функционировать под управлением операционных систем Windows всех поколений, начиная с Windows 95. Для нормального функционирования программы компьютер должен быть оснащен не менее чем 16 Мб оперативной памяти и не менее чем 6 Мб свободного места на жестком диске. Сама программа занимает около 0,25 Мб дисковой памяти. Программа не требует установки.

Оболочка моделирования построена по модальному принципу и предусматривает последовательное компьютерное моделирование каждого типа демультиплексора с возможностью сравнения их работы по результатам вычис-

ления перекрёстных помех. При этом предусмотрена регистрация студента и преподавателя для заполнения форм отчета, генерируемого по окончании работы в MS Word. Для осуществления допуска к оболочке моделирования предусмотрен автоматический тестовый контроль, выполняемый в отдельном окне.

### 1.3 Запуск программы и выход из программы

Запуск программы осуществляется запуском файла EDFA.exe на выполнение, данный файл расположен в папке EDFA. После запуска на экране компьютера появляется главное окно программы «Компьютерное моделирование многоволнового эрбиевого волоконно-оптического усилителя» (далее по тексту описания данное окно называется *Главное*). Данное окно содержит главное меню и основные кнопки управления. Выход из программы осуществляется нажатием кнопки  в верхнем правом углу окна «Главное».

## 2 Работа с программой

В дальнейшем предполагается, что пользователь имеет определенные навыки работы в операционной системе Windows 95 или Windows 98.

При работе с программой для перемещения между полями ввода, и нажатий на кнопки удобней всего использовать манипулятор "мышь".

В том же окне предусмотрена возможность ввода Ф.И.О. студента и преподавателя для заполнения форм отчета, генерируемого по окончании работы в MS Word. Также можно выбрать вариант и номер стартового пункта работы. Всего работа содержит 20 вариантов заданий по 8 пунктов.

В соответствии с выполняемым пунктом задания, текст которого загружается при выборе варианта и номера пункта автоматически, исполнителю необходимо ввести исходные параметры расчета:

Оболочка моделирования построена по модальному принципу и предусматривает последовательное компьютерное моделирование каждого типа демультимплексора с возможностью сравнения их работы по результатам вычисления перекрёстных помех. При этом предусмотрена регистрация студента и преподавателя для заполнения форм отчета, генерируемого по окончании работы в MS Word. Для осуществления допуска к оболочке моделирования предусмотрен автоматический тестовый контроль, выполняемый в отдельном окне.

Для моделирования демультимплексоров исполнителю необходимо ввести исходные параметры:

- б) информационных сигналов:
  - число оптических каналов (1-150);
  - центральные длины волн каналов (1400нм - 1600нм)
- 7) интерференционных фильтров: показатели преломления периодической структуры, толщина и период структуры, угол падения света из торца оптического волокна на мультимплексор, полоса пропускания.

8) фильтров Фабри-Перро: показатель преломления, коэффициент отражения зеркал, толщина структуры, полоса пропускания.

Для заданных параметров производится расчет следующих характеристик для каждого демультиплексора:

5) график аппаратной функции (для интерференционного фильтра - зависимость коэффициента отражения от длины оптической волны, для фильтра Фабри-Перро - зависимость коэффициента прохождения от длины оптической волны);

6) график и таблица перекрёстных помех (зависимость перекрёстных помех от номера канала).

Настройка фильтра на заданную длину волны производится визуально по графику аппаратной функции, путём изменения внутренних параметров.

Пакет программ также позволяет осуществить оптимизацию внутренних параметров любого из исследуемых демультиплексоров для достижения заданного уровня перекрёстных помех.

По результатам расчета заполняются таблицы с информацией, требуемой в задании к выполняемому пункту. После выполнения пункта программа строит необходимые графики в отдельном окне, где также есть возможность для записи выводов по проделанному пункту и перехода к выполнению следующего пункта.

При возвращении к выполнению пункта, который был уже сделан, данные в таблицах с информацией, требуемой в задании к этому пункту, и выводы по нему сохраняются в последней редакции исполнителя. Однако при выходе из программы данные о выполнении работы сохраняются только в графическом виде в формате \*.emf в поддиректории с названием выполняемой работы в каталоге «Мои документы». При этом сохраняются только те графики, которые необходимы для оформления отчета по работе.

После выполнения последнего пункта задания или по желанию исполнителя в любой момент выполнения работы происходит генерация отчета по форме, принятой в вузе-разработчике программы, включающей информацию об исполнителе работы, требуемые в задании графики (полученные в результате выполнения работы), а также выводы, написанные исполнителем по каждому пункту.

После генерации отчета работа заканчивается. Для выполнения новой работы (другого варианта) необходимо выйти из программы и запустить ее заново.

Далее более подробно остановимся на программных окнах.

## **2.1 Главное окно**

В главном окне (рисунок 2.1) осуществляется ввод данных и расчёт параметров каждого демультиплексора. Оно состоит из:

- файлового меню, где отображаются все функции программы;
- панели инструментов, где дублируются некоторые важные элементы файлового меню;

- закладок вида моделирования;
- панелей ввода основных параметров демультиплексора;
- области построения графиков.

Так же, при загрузке приложения, появляется окно помощи, где отображаются подсказки по выполняемому пункту лабораторной работы.

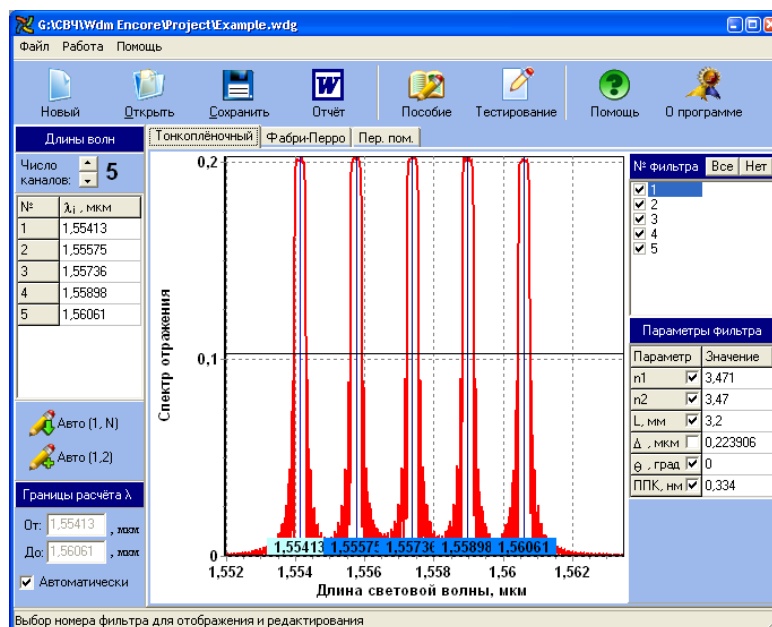


Рисунок 2.1 – Главное окно программы.

Главное меню состоит из двух разделов: Файл, Работа и Помощь. Рассмотрим пункты каждого раздела (Рисунок 2.2)



### Файл

<b>Новый</b>	Замена исходных данных, данными по умолчанию.
<b>Открыть файл</b>	Открыть файл с исходными данными. *
<b>Сохранить файл</b>	Сохранить исходные данные в файл. *
<b>Отчёт в MSWord</b>	Импортировать результаты моделирования в приложение MSWord.
<b>Параметры графиков</b>	Параметры, отвечающие за внешний вид отображаемых графиков.
* Файл с данными имеет расширение .wdg.	

### Работа

<b>Пособие</b>	Электронный вариант учебного пособия.
<b>Тестирование</b>	Прохождение теста.
<b>Обновить весь диапазон</b>	Пересчитать текущий график по всему диапазону.



 <b>Обновить выбранный диапазон</b>	Пересчитать текущий график по диапазону, выбранному пользователем.
 <b>Копировать график в буфер</b>	Копировать текущий график в буфер обмена в виде битового изображения.

**Помощь:**



 <b>Помощь</b>	Руководство пользования программой.
 <b>О программе</b>	Информация о разработчиках программы.

Рисунок 2.2

## 2.2. Панель редактирования центральных частот для каналов демультиплексора

Для ввода числа каналов ( $n$ ) и центральных длин волн ( $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ ), предназначена панель, находящаяся в левой части главного окна (рисунок 2.3). Эти данные являются общими для моделирования демультиплексоров на основе интерференционного и Фабри-Перо фильтров. В верхней части панели, через счётчик задаётся число каналов демультиплексора, а ниже в таблицу, вводятся центральны длины волн (в микрометрах) исходя из ITU-T плана.



Рисунок 2.3

По завершению заполнения таблицы необходимо нажать клавишу *Enter*, либо выбрать пункт файлового меню «Работа → Обновить весь диапазон». Если пользователь в таблицу ввёл неверные данные, то панель заголовка станет красного цвета.

Ниже таблицы расположены кнопки автоматического заполнения таблицы центральных длин волн:

- **Авто (1,N)** – распределяет равномерно длины волн между первым и последним каналами;
- **Авто (1,2)** – заполняет таблицу длин волн с шагом  $(\lambda_2 - \lambda_1)$ .

## 2.2 Закладки вида моделирования

Для моделирования параметров демультиплексоров, предназначены закладки, расположенные снизу инструментальной панели (рисунок 2.4).



Рисунок 2.4

Первые две закладки отображают аппаратные функции и параметры демультиплексора на интерференционных (тонкоплёночных) фильтрах и фильтрах Фабри-Перо, а третья – рассчитывает переходные помехи в каждом демультиплексоре и отображает их в табличном и графическом видах.

### 2.3. Моделирование демультиплексора

Первые две закладки моделирования демультиплексора состоят из трёх областей: график аппаратной функции, панель выбора фильтров и панель параметров выбранного фильтра. Рассмотрим эти области более подробно.

**График аппаратной функции демультиплексора (рисунок 2.5).** График отображает саму аппаратную функцию и центральные частоты, занесенные в таблицу, в виде вертикальных линий и числовых подписей снизу. Активный канал (параметры фильтра которого в данный момент можно редактировать) выделяется цветом.

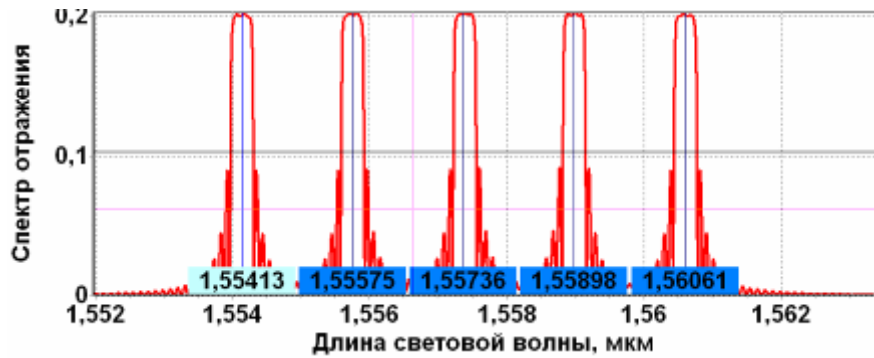
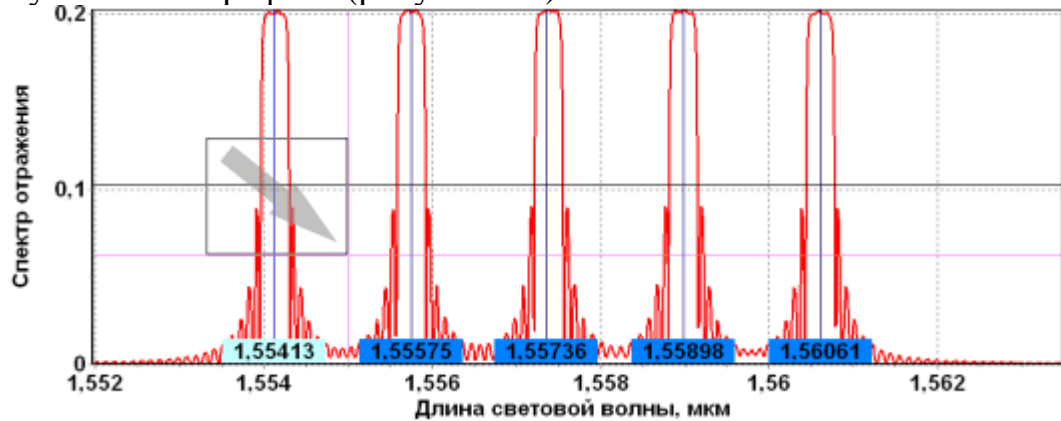
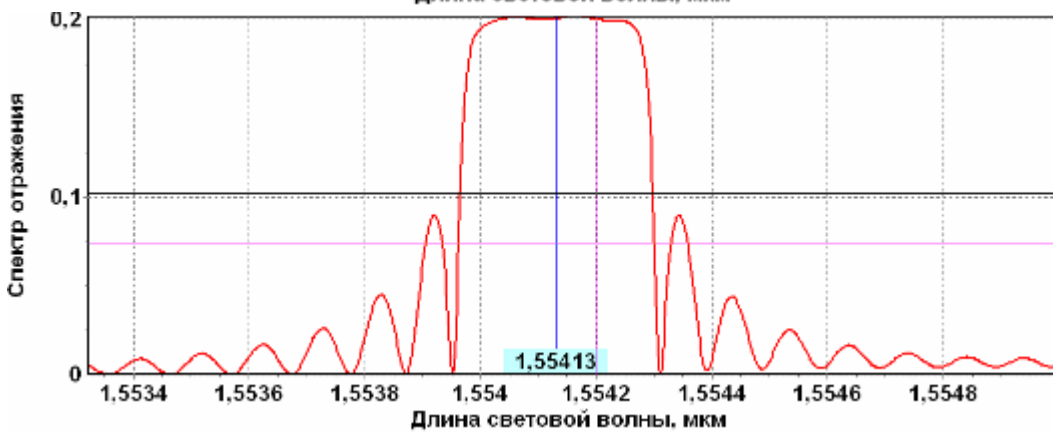


Рисунок 2.5

Границы просмотра длин волн можно изменять (увеличивать часть аппаратной функции), если левой кнопкой мыши, слева на право, выделить необходимый участок на графике (рисунок 2.6).



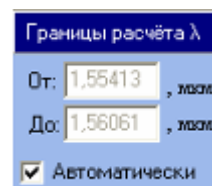
а)



б)

Рисунок 2.6 – Исходный вид аппаратной функции (а) и вид после увеличения (б).

Границы отображения графика всей аппаратной функции определяются автоматически. Для ручного задания границ отображения необходимо воспользоваться панелью «**Границы расчёта**» (рисунок 2.7). В однострочные редакторы, при отключенном переключателе «**Автоматически**», заносятся частоты в пределах которых будет произведён расчёт аппаратной функции. Для перехода обратно в режим автоматических границ, необходимо включить переключатель «**Автоматически**».



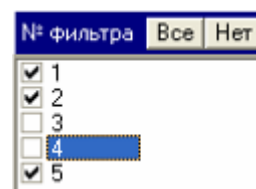
λ»  
ТЫ,

Рисунок 2.7

Значение координат по осям X и Y, выводятся автоматически в строку статуса, при перемещении над графиком мышью. При этом на графике, положение курсора будет указано розовым перекрестьем на всю область

Параметры отображения графиков можно изменить в разделе: **Файл**→**Параметры графиков** (см. раздел 2.6).

**Панель выбора фильтров (рисунок 2.8).** Панель служит для выбора из списка, соответствующего фильтра, параметры которого можно модифицировать (выбранный фильтр ется на панели и на графике аппаратной функции демультимплектора).



ва-

Панель позволяет отключать/включать фильтры с помощью независимых переключателей, слева от номера фильтра. Для отображения одного фильтра, необходимо дважды на нём щёлкнуть мышью.

Рисунок 2.8 ра

Кнопки «**Все**» и «**Нет**» предназначены для выбора либо для исключения из расчёта всех фильтров.

**Панель параметров выбранного фильтра (рисунок 2.9).** Панель состоит из таблицы, где отображаются параметры выбранного фильтра. Для интерференционных и Фабри-Перо фильтров, набор параметров будет различен.

Параметры фильтра		Значение
n1	<input checked="" type="checkbox"/>	3,471
n2	<input checked="" type="checkbox"/>	3,47
L, мм	<input checked="" type="checkbox"/>	3,2
Δ, мкм	<input type="checkbox"/>	0,224605
φ, град	<input checked="" type="checkbox"/>	0
ППК, нм	<input checked="" type="checkbox"/>	0,334

Параметры фильтра		Значение
n	<input type="checkbox"/>	1,55413
L, мкм	<input checked="" type="checkbox"/>	100
R	<input checked="" type="checkbox"/>	0,98
ППК, нм	<input checked="" type="checkbox"/>	0,1

а) б)

Рисунок 2.9 – набор параметров для интерференционных (а) и Фабри-Перро фильтров (б)

Напротив каждого параметра расположен независимый переключатель, с помощью которого можно выбирать, какие из параметров будут едиными для всех фильтров. При включенном переключателе, модификация параметра в любом из фильтров, автоматически повлечёт изменение этого параметра и у других фильтров.

По завершению модификации параметров необходимо нажать клавишу **Enter**, либо выбрать пункт файлового меню «**Работа** → **Обновить весь диапазон**» или «**Работа** → **Обновить выбранный диапазон**». Если пользователь в таблицу ввёл неверные данные, то панель заголовка станет красного цвета.

## 2.4 Расчёт переходных помех

Для расчёта уровня переходных помех, необходимо определить полосу пропускания каждого фильтра (в панели параметров фильтра обозначена как «ППК, нм»). Для этого нужно исключить из расчёта все фильтры кроме выбранного, увеличить аппаратную функцию и удерживая клавишу **Ctrl, Shift** или **Alt**, мышью выделить область по уровню 0.5 (рисунок 2.10).

Далее необходимо перейти третью вкладку программы «Пер. пом.» (рисунок 2.11). В ней будут отображены переходные помехи для того демультимплекса, какой вкладки перешёл. Справа (панель «Каналы») будет отображён список выбора каналов для расчёта переходных помех (в Дб):

«Все» - Расчёт суммарных переходных помех от всех соседних каналов, для всех фильтров

«1..N» - Расчёт переходных помех от каждого соседнего канала в отдельности, для выбранного канала. (Суммарная переходная помеха, для текущего канала, отображается в таблице в пункте «Sum»).

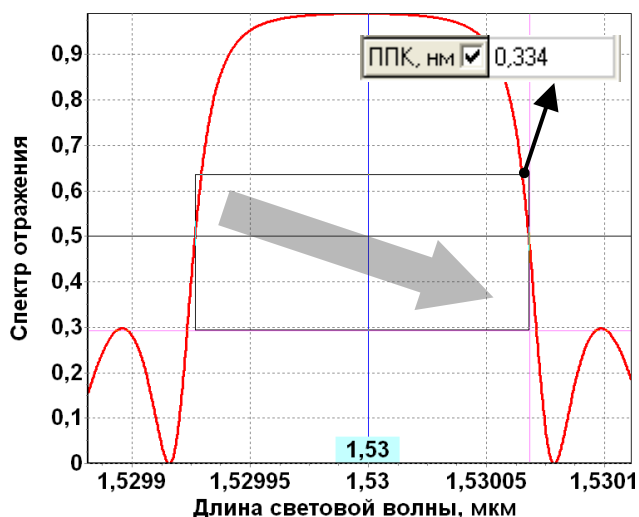


Рисунок 2.10

на  
ней  
по-  
ра, с  
ва-  
бу-  
на-  
мех  
пе-  
них  
ных

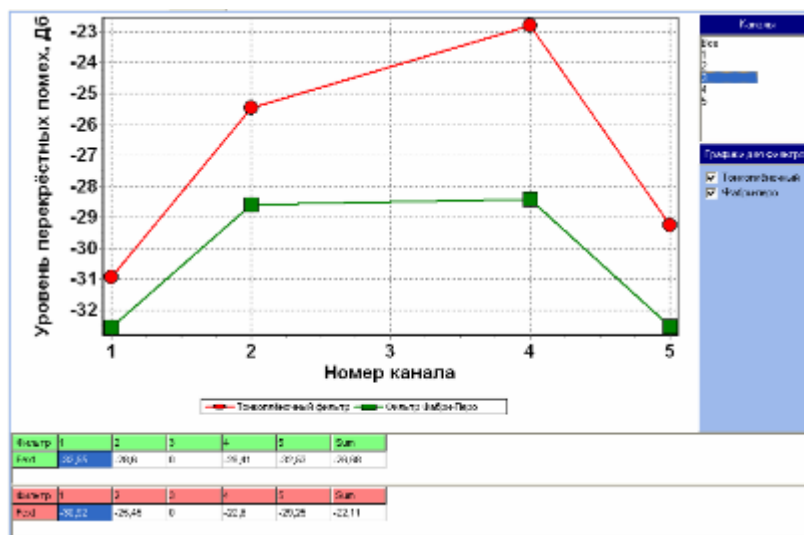


Рисунок 2.11– Расчёт уровня переходных помех

Рассчитанные переходные помехи отображаются в табличном и графическом видах. Для включения/отключения отображения переходных помех для какого-либо типа демультимплексора, можно воспользоваться панелью «График для фильтров».

## 2.5 Окно помощи

Окно помощи (рисунок 2.12) предназначено для отображения хода вы-

полнения лабораторной работы, методического пособия и руководства пользователя.

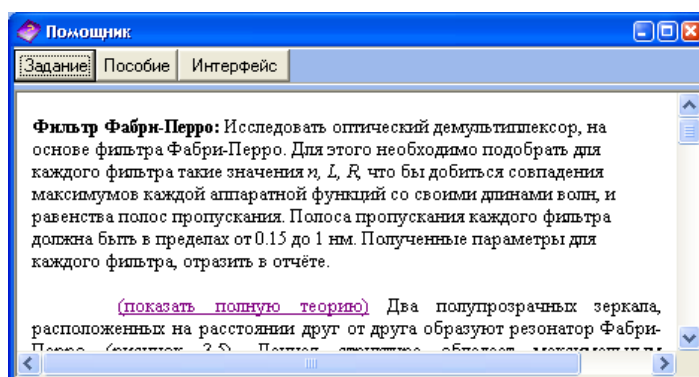


Рисунок 2.12 – Окно помощи

### Список литературы

8. Заславский К.Е. Волоконно-оптические системы передачи со спектральным уплотнением: Учебное пособие для вузов. - Новосибирск: СибГУТИ, 2005. – 136 с.
9. Довольнов Е.А., Кузнецов В.В., Миргород В.Г., Шарангович С.Н. Мультиплексорное и усилительное оборудование многоволновых оптических систем передачи: учеб. пособие. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2016. – 156 с.
10. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи (4-е, дополненное издание)- М. : Эко-Тренд. 2007. -512 с..
11. Фокин В.Г. Оптические системы передачи и транспортные сети. Учебное пособие .- М.: Эко-Трендз, 2008. -288 с.
12. Скляр О К. Волоконно-оптические сети и системы связи. Учебное пособие.- С-Пб : Лань, 2010. – 272 с.
13. РД 45.286-2002. Руководящий документ отрасли аппаратура волоконно-оптической системы передачи со спектральным разделением. Технические требования.
14. Кузнецов В.В., Шарангович С.Н. Компьютерная лабораторная работа «Исследование оптических демультиплексоров на основе интерференционных фильтров и фильтров Фабри-Перро» .- М.: ВНИИЦ, 2006. - № 50200501792.

## Приложение А

### Характеристики и структура оборудования промышленных мультиплексов Alcatel 1696 Metro Span

Представляет собой мультисервисную DWDM платформу, поддерживающую передачу широкого спектра протоколов и интерфейсов сигналов данных. Конфигурация системы, включающая оконечное оборудование с волновыми адаптерами (до 32-х каналов), оптические мультиплексоры ввода/вывода с или без оптических усилителей и т.п., позволяет строить как корпоративные или городские, так и региональные сети. Внешний вид стойки системы представлен на рисунке А.1.



Рисунок А.1

#### Основные характеристики

- Количество каналов — до 32 с частотным разнесением 100 ГГц
- Оптический диапазон: C
- Максимальная дальность пролета без регенерации сигнала: до 75 км — в конфигурации без усилителей и до 380 км — в конфигурации с усилителями
- HUB — 8+8+8+8 каналов
- OADM — 4 или 8 каналов
- Система контроля качества передачи
- Различные системы резервирования: пассивная оптическая система резервирования, система резервирования каналов данных

#### Сетевая топология

Alcatel 1696 Metro Span поддерживает сетевые топологии следующих типов:

- «точка-точка»;
- «точка-точка» с промежуточными узлами ввода/вывода;
- двухволоконное кольцо с одним центральным узлом-концентратором (single HUB-node);
- кольцо из двух волокон с полностью распределенной топологией (full mesh)
- кольца, соединенные между собой с использованием топологии «сквозная передача с ответвлением» (drop-and-continue).



## Конфигурация стойки

Специальная полка с платоместами предназначена для размещения всех основных системных плат. Лицевая сторона полки изображена на рисунке А.2.

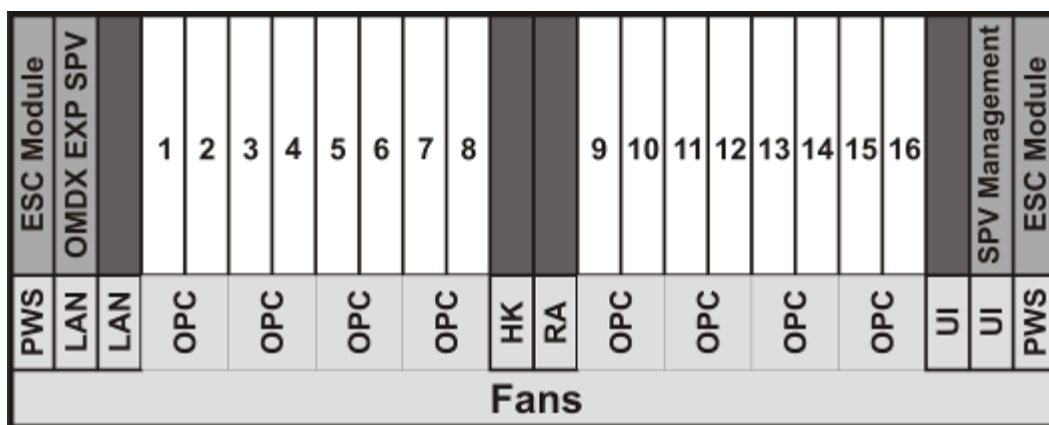


Рисунок А.2

Полка имеет ширину 533 мм (что полностью соответствует ширине стандартных стоек NEBS и ETSI), высоту 442 мм и глубину 269 мм. Полка состоит из трех частей: основной части и двух расширений. В основной части полки можно установить до 24 плат. Обычно устанавливается следующее:

- одна плата контроллера оборудования (две для мастер-полки) (ESC);
- до 16 транспондеров (TSP). пронумерованы с 1 по 16;
- один оптический мультиплексор/демультиплексор для конфигурации оконечного узла (два оптических мультиплексора/демультиплексора или OADM для поддержки двух направлений – на восток и на запад);
- одна плата для оптического канала управления и обслуживания (SPVM).

Кроме четырех слотов, выделенных для платы контроллера оборудования и оптического канала управления, все остальные слоты могут принимать платы любого типа. В первом расширении устанавливается следующее:

- два блока питания -48 В (PWS);
- один блок местного доступа для подключения портативного терминала оборудования или системы сетевого управления EML (LAN\_Q);
- один блок местного доступа для связи между полками (LAN\_I);
- один служебный блок (housekeeping board) с 8 входящими и 8 исходящими портами служебных интерфейсов (HK, только на мастер-полке);
- один блок удаленных сигналов тревоги (RA);
- два блока пользовательских интерфейсов (UI) (только на мастер-полке);
- по одному блоку оптической защиты каналов на каждый защищенный канал (optical SNCP/UPSR) (OPC).

Второе расширение используется для вентиляторов охлаждения. Все соединения (оптические и электрические) выполняются на передней панели, что значительно облегчает доступ. Каждая полка имеет два избыточных силовых разъема -48 В.

## **4 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3 КОМПЬЮТЕРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ДЕМУЛЬТИПЛЕКСОРОВ НА ОСНОВЕ НАЛОЖЕННЫХ ГОЛОГРАММ В ФОТОПОЛИМЕРНОМ МАТЕРИАЛЕ**

### **Содержание**

1. Введение.....	89
2. Теоретические сведения .....	90
2.1 Принципы действия и структура мультиплексора .....	92
2.2. Математическая модель .....	93
2.3. Расчет основных оценочных характеристик .....	101
3. Рекомендации по выполнению работы.....	106
3.1. Расчётное задание .....	106
3.2. Экспериментальное задание .....	107
4. Описание программного обеспечения.....	109
Список литературы.....	116



**Цель работы:** изучение принципов действия и компьютерное исследование характеристик и параметров, оптического демультиплексора на основе наложенных дифракционных решёток записанных в фотополимерном материале.

## 1 Введение

Одним из основных направлений современного научно-технического прогресса является развитие волоконно-оптических систем связи, обеспечивающих возможность доставки на значительные расстояния чрезвычайно большого объема информации с наивысшей скоростью. Уже сейчас имеются волоконно-оптические линии связи большой информационной емкости с длиной регенерационных участков до 200 км и более.

Возможность передача такого большого количества информации по ВОЛС связана с использованием технологии WDM/DWDM [1,2], где передача информации по волокну ведётся одновременно на разных длинах волн. Для этого необходимо ввести разные длины волн в волокно с помощью оптических мультиплексоров (MUX) на передаче, и вывести на приёме при помощи демультиплексора (DMUX).

На сегодняшний день существуют множество различных устройств, для мультиплексирования/демультиплексирования оптического потока, изготавливаемых из различных материалов [3,4]. В данной лабораторной работе будет рассмотрен ещё один метод селекции длин волн, основанный на использовании наложенных дифракционных (голографических) решёток (НДР) в фотополимерном материале (ФПМ).

Голографическая запись информации на ФПМ может быть так же использована для создания различных элементов голограммной оптики и систем долговременной памяти. Перспективность указанных сред для подобных применений обуславливается их высокой разрешающей способностью, высокой дифракционной эффективностью и стабильностью записи. Так же основным преимуществом фотополимеров является то, что голограммы в них формируются в процессе записи и не нуждаются в химической обработке.

Оптический демультиплексор довольно сложное устройство, и на данный момент является актуальным разработка программного обеспечения, позволяющего не закупая дорогостоящее оборудование моделировать основные характеристики различных DMUX.

## 2 Теоретические сведения

### Матрица передачи

Оптические свойства волоконно-оптических устройств ветвления могут быть определены в терминах матрицы коэффициентов  $\mathbf{n} \times \mathbf{n}$ , где  $\mathbf{n}$  – число портов, а коэффициенты представляют часть мощности, передаваемой между назначенными портами. В общем случае матрица передачи  $T$  имеет вид:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & \cdot & T_{1j} & \cdot & T_{1n} \\ T_{21} & T_{22} & \cdot & T_{2j} & \cdot & T_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ T_{i1} & T_{i2} & \cdot & T_{ij} & \cdot & T_{in} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ T_{n1} & T_{n2} & \cdot & T_{nj} & \cdot & T_{nn} \end{bmatrix}. \quad (2.1)$$

Структурная схема многопортового  $\mathbf{n} \times \mathbf{n}$  распределителя изображена на рисунке 2.1, где  $i=1..n$  и  $j=1..n$  – номера соответствующих входных и выходных портов;  $[T_{i,j}]$  – матрица передачи.

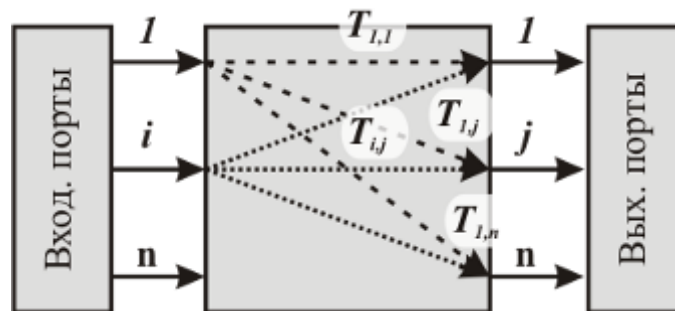


Рисунок 2.1 – Структурная схема распределителя

Демультимплексор, в отличие от распределителя имеют один вход и  $\mathbf{n}$  выходов (рисунок 2.2), между которыми распределяется мощность входного сигнала. Следовательно, матрица передачи (2.1) трансформируется в вектор:

$$\mathbf{T} = (T_1 \quad \dots \quad T_i \quad \dots \quad T_n). \quad (2.2)$$

В данной записи опущен первый индекс, а выходы демультимплексора обозначены через индекс  $i$ . Так же не учитывается затухание сигнала в оптических элементах демультимплексора.

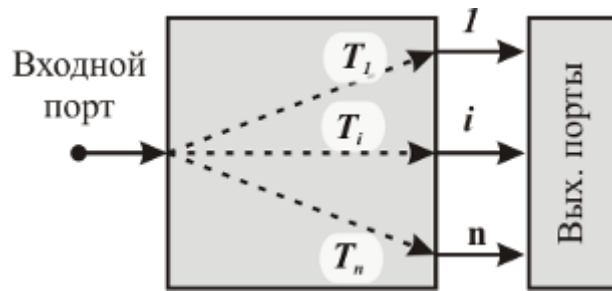


Рисунок 2.2 – Структурная схема демультиплексора

## 2.1 Принцип действия и структура демультиплексора

Принцип действия данного демультиплексора основан на пространственном разделении группового сигнала с помощью голографических дифракционных решёток записанных в фотополимерном материале (ФПМ). Фактически, это серия дифракционных решёток, настроенных на определённую длину волны, но не стоящих последовательно, а записанных в одну пространственную область ФПМ.

Применение этой технологии демультиплексирования приведёт к увеличению мощности дифрагируемых лучей полезного сигнала, так как они не будут проходить через цепочку последовательно стоящих фильтров и значительно облегчит конструкцию демультиплексора, что приведёт к удешевлению устройства.

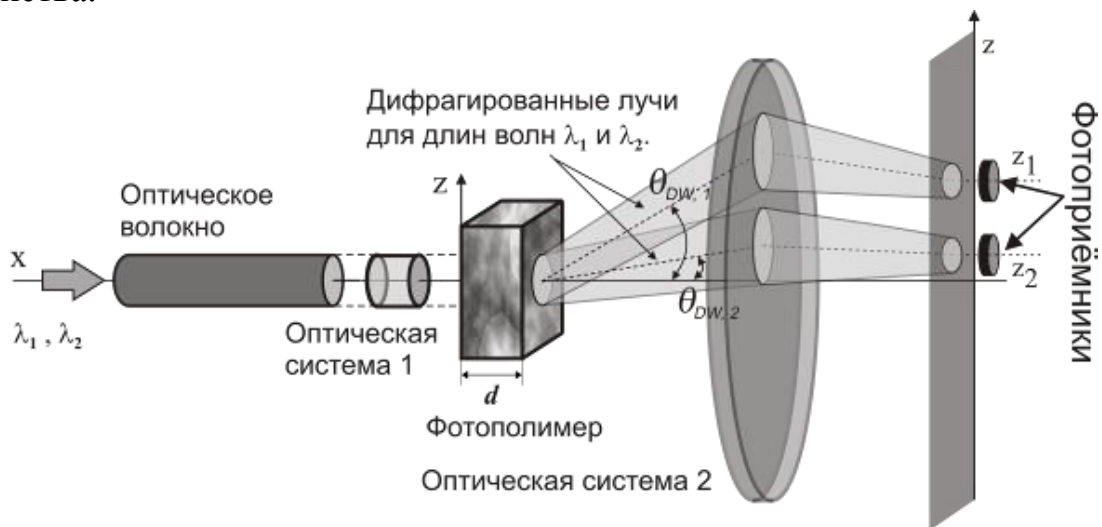


Рисунок 2.3 – Применение НДР в ФПМ, для демультиплексирования группового оптического сигнала.

На рисунке 2.3 схематически изображена схема демультиплексора на основе ФПМ, в котором записаны две решётки пропускающего типа под разными углами к оси  $z$ . Длины волн, со своими волновыми векторами соответствующие векторам этих решёток дифрагируют на них под различными углами ( $\theta_{DW,1}$ ,  $\theta_{DW,2}$ ), после чего поступают каждый на своё фотоприёмное устройство.

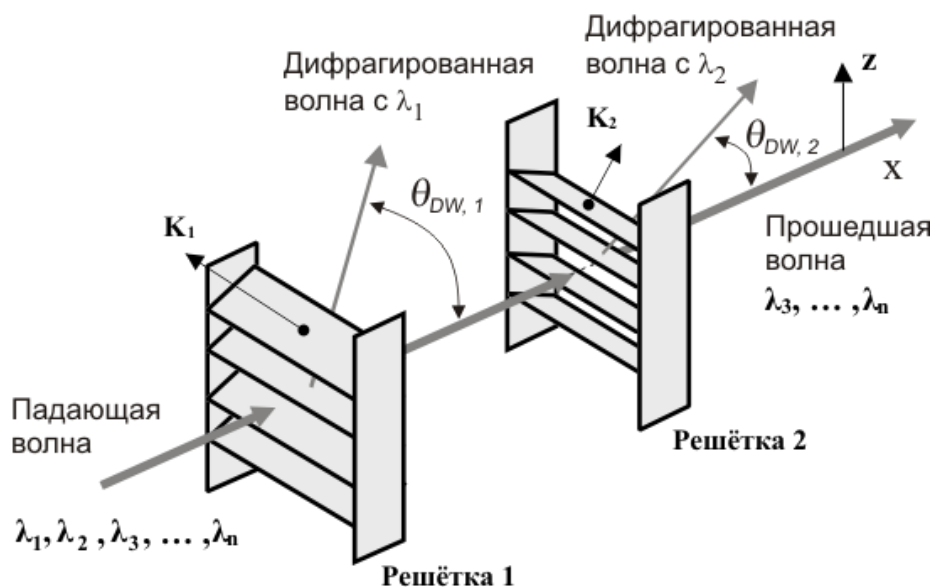


Рисунок 2.4 – Принцип селекции длин волн на основе фазовых решёток

Более детально принцип селекции длин волн показан на рисунке 2.4. Для удобства визуализации, НДР размещены последовательно. Пусть из оптического волокна на ФПМ падает пучок света с составляющими длинами волн  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ . Так же пусть в ФПМ записаны две решётки со своими векторами  $\mathbf{K}_1$ , и  $\mathbf{K}_2$ , соответствующими длинам волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ . На первой и второй решётке свет с длинами волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  соответственно, будет дифрагировать на углы  $\theta_{DW,1}$  и  $\theta_{DW,2}$ , а остальные длины волн пройдут через ФПМ.

Следует отметить, что на каждой записанной решётке, дифрагируют волны со всеми длинами волн, внося в выделенный информационный канал переходные помехи.

## 2.2 Математическая модель

**Механизм записи дифракционных решёток в ФПМ.** Процесс полимеризации подробно изложен в [6]. Основными компонентами ФПМ являются полимеризационно-способные соединения (мономеры, олигомеры), инициатор и сенсibilизатор радикальной фотополимеризации (рисунок 2.5а). Композиции выпускаются либо как жидкая смесь компонент, либо в виде пленок, представляющих собой раствор компонент в нейтральной полимерной матрице. При изготовлении регистрирующего слоя жидкая смесь заливается между стеклянными подложками.

Полимеризация среды в интерференционном поле приводит к пространственной модуляции показателя преломления  $\Delta n$ . Его величина определяется модуляцией плотности и поляризуемости полимера, а также модуляцией его состава вследствие диффузионного перераспределения компонент между освещенными и неосвещенными областями регистрирующего слоя. Кинетическое описание свободно-радикальной полимеризации включает следующие основные элементарные реакции:

- 1) фото(термо)распад инициатора с образованием свободных (первич-

ных) радикалов;

2) образование активных полимерных радикалов в результате взаимодействия первичных радикалов с молекулами мономера (реакция иницирования цепи);

3) увеличение длины полимерного радикала за счет присоединения мономерных звеньев (реакция роста цепи). Скорость роста цепи характеризуется параметром роста цепи  $K_g$ ;

4) переход полимерного радикала в неактивную форму с образованием конечного продукта реакции - молекулы полимера (реакция обрыва цепи). Скорость обрыва полимерной цепи характеризуется параметром обрыва  $K_b$ ;

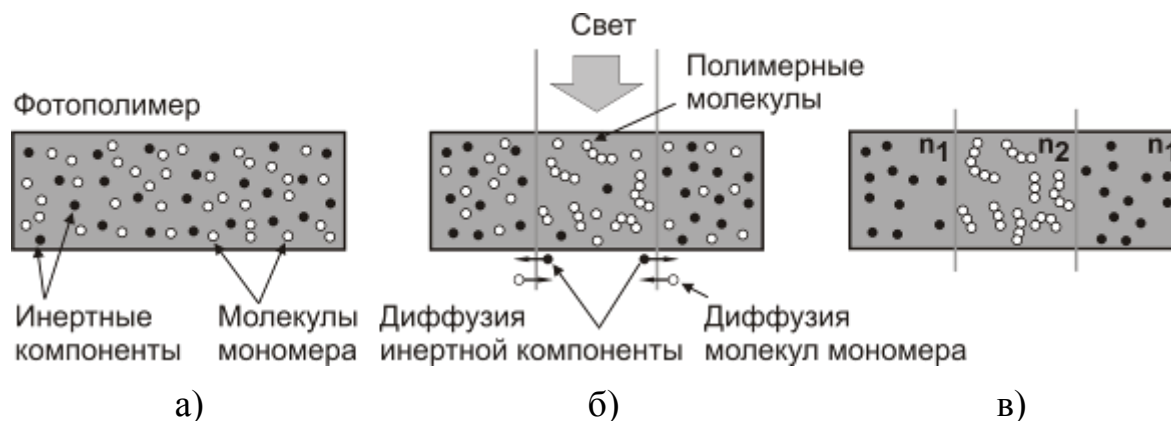


Рисунок 2.5 – Процесс полимеризации в ФПМ

Интерференционная картина, которая является следствием взаимодействия лазерных пучков на участке записи, приводит к неравномерной интенсивности падающего света в поперечном направлении (вдоль границы раздела ФПК с воздухом). В тех местах, где интенсивность света больше, реакция фотополимеризации протекает быстрее. Поэтому области максимумов интерференционной картины содержат максимальное количество полимера и минимальное количество мономера, красителя и донора, которые расходуются в процессе реакции. Возникающие при этом градиенты концентрации веществ приводят к тому, что мономер, краситель и донор диффундируют из темных областей в светлые и, если экспозиция продолжается, также принимают участие в реакции фотополимеризации (рисунок 2.5б). Диффузия указанных компонент ФПК происходит до тех пор, пока их концентрации не выравняются во всем слое (рисунок 2.5в).

Аналогичным образом возникает градиент концентрации полимера. Диффузия полимерных молекул из максимумов в минимумы ИК приводит к рассасыванию решетки и уменьшению ее дифракционной эффективности. Поскольку подвижность молекул образующегося полимера значительно меньше подвижности молекул мономера, красителя и донора, то диффузия полимера проявляется на гораздо больших временных интервалах.

Показатель преломления полимера больше показателя преломления исходного мономера (на рисунке 2.5в,  $n_2 > n_1$ ). Таким образом, модуляция показателя преломления  $\Delta n$  в ФПК возникает как следствие модуляции концентрации

полимера. Скорость изменения концентрации мономера со временем записи равна:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \text{div}(D_m \text{grad } M) - K_g K_b^{-1/2} \sqrt{\frac{\alpha_d \beta K I(\mathbf{r})}{1/\tau_0 + \beta M}} M^{3/2}, \quad (2.3)$$

где  $I(\mathbf{r})$  – интенсивность светового излучения в точке с радиус-вектором  $\mathbf{r}$ ,  $D_m$  – коэффициент диффузии мономера,  $\alpha_d$  – коэффициент поглощения красителя,  $K$  – концентрация красителя,  $\beta$  – параметр реакции фотоиницирования. Экспериментально было определено, что коэффициент диффузии уменьшается во время полимеризации [6].

Изменение во времени  $M$  в некоторой точке приводит за счет процесса полимеризации к изменению во времени плотности полимерных молекул в этой точке. За счет процессов диффузии мономера происходит также вытеснение инертной компоненты. Все эти процессы ведут к изменению показателя преломления  $n$ :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \Delta n_p K_g K_b^{-1/2} \sqrt{\frac{\alpha \beta K I(\mathbf{r})}{1/\tau_0 + \beta M}} \cdot \frac{M^{3/2}}{M_0} + \Delta n_i \text{div}(D_m \text{grad } M) \quad (2.4)$$

где  $M_0$  – начальная концентрация мономера

Система уравнений (2.3) и (2.4) является базовой для описания процесса записи голограмм в фотополимерном материале.

**Аналитическое описание динамики записи одиночных голограмм пропускающего типа.** Схема записи голограммы в полимерной среде изображена на рисунке 2.6. Оптическое поле представляется суммой двух волн с векторными амплитудами  $\mathbf{E}_0, \mathbf{E}_1$  и волновыми векторами  $\mathbf{k}_0, \mathbf{k}_1$ :

$$\mathbf{E}_0 = \mathbf{e}_0 \cdot A_0 e^{-i\mathbf{k}_0 \mathbf{r}}; \quad \mathbf{E}_1 = \mathbf{e}_1 \cdot A_1 e^{-i\mathbf{k}_1 \mathbf{r}}, \quad (2.5)$$

где  $A_0, A_1$  медленно меняющиеся по  $\mathbf{r}$  и времени амплитуды волн,  $\mathbf{e}_0, \mathbf{e}_1$  – векторы поляризации этих волн.

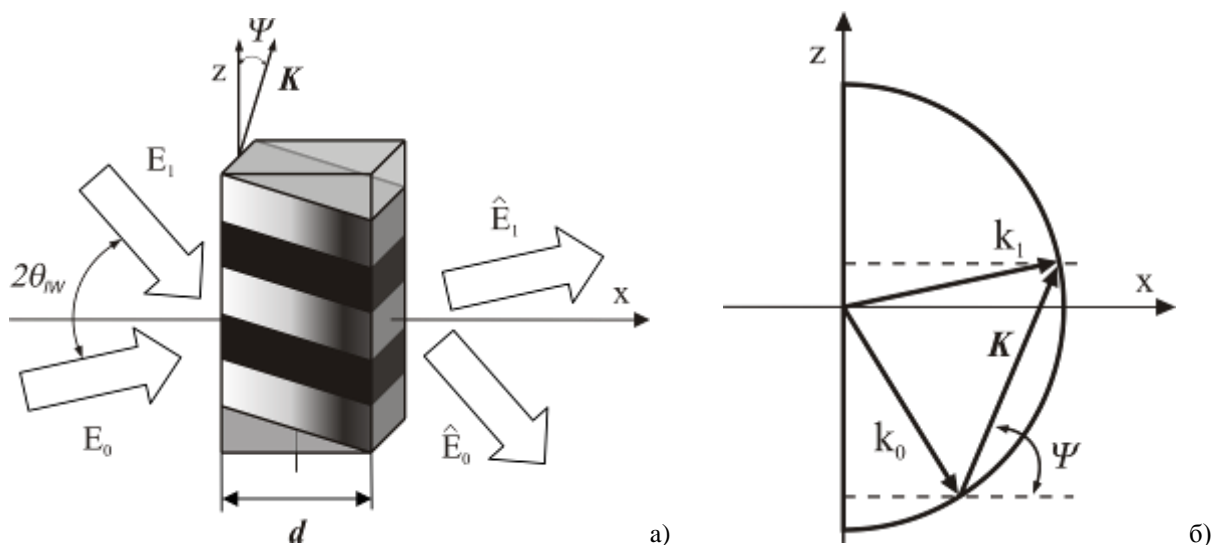


Рисунок 2.6 – Пространственная геометрия (а) и векторная диаграмма (б) нестационарного взаимодействия световых волн с голографической решеткой в фотополимерном материале для несимметричной модели записи.

Система уравнений связанных волн для задачи записи, находится из решений Уравнения Максвелла (волнового уравнения), где в качестве исходных полей взяты (2.5). Выполнив усреднение по периоду записанной решётки для  $A_0$  и  $A_1$ , получим:

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_1}{\partial y} &= -i \cdot g_1 \cdot n_1(y, t) \cdot \exp[i\Delta y] \cdot A_0 \\ \frac{\partial A_0}{\partial y} &= -i \cdot g_0 \cdot n_1^*(y, t) \cdot \exp[-i\Delta y] \cdot A_1 \end{aligned} \quad (2.6)$$

где  $y = x/d = (\mathbf{r} \cdot \mathbf{x}_0)/d$ ,  $\mathbf{x}_0$  – нормаль к границе среды,  $\Delta = (\mathbf{k}_0 - \mathbf{k}_1 + \mathbf{K}) \cdot \mathbf{x}_0 \cdot d$ ,  $g_1 = \pi / \lambda_{\text{записи}} \cdot \cos(\theta_0)$ ;  $\theta_0$  – углы между осью  $y$  и векторами  $\mathbf{k}_j$  внутри полимерного слоя.

Рассмотрим несимметричную геометрию записи голографической решётки, показанную на рисунке 2.6 б. На этом рисунке, радиус полуокружности равен  $2\pi/\lambda$ .

Падающие волны интерферируют внутри полимерного слоя и формируют интерференционную картину. Предположим, что  $A_0 = A_1$ , и что среда обладает коэффициентом затухания  $\alpha$ , так что интерференционная картина светового поля будет:

$$I(\mathbf{r}, t) = I_0(t) \exp[-\alpha y] \{1 + \cos(\varphi)\} \quad (2.7)$$

где  $I_0(t)$  – временная огибающая лазерного импульса.

Запись голографической решетки произойдет в соответствии с распределением света (2.7). Дифракция световых пучков на этой решетке приведет к изменению данного распределения, однако, будем полагать дифракционную эффективность малой и возмущением поля (2.7) будем пренебрегать. Это позволяет не решать задачу дифракции и положить амплитуду опорного пучка  $A_0$  постоянной. Тогда из системы (2.6) получим следующие выражения для амплитуды дифрагированного пучка  $A_1$  и того интенсивности  $I_1$ :

$$A_1(t) = -i \cdot d \cdot g_1 \cdot A_0 \int_0^1 n_1(t, y) dy \rightarrow I_1(t) = I_0(t) \left[ d \cdot g_1 \int_0^1 n_1(t, y) dy \right]^2 \quad (2.8)$$

где  $I_1$ ,  $I_0$  – интенсивность прошедшего и дифрагированного пучков соответственно.

Совокупность уравнений (2.3), (2.4), (2.6) образует замкнутую систему, описывающую процесс записи голограмм в фотополимерном материале.

Поясним момент, связанный с малой дифракционной эффективностью НДР. В ФПМ необходимо записать большое количество НДР с равной дифракционной эффективностью. Это приведёт к тому, что мономера не хватит для достижения больших дифракционных характеристик у каждой голограммы. И по этому будет достаточным рассматривать случай малых эффективностей дифракции. В этом случае, из системы (2.6) останется только первое уравнение.

Уравнение для нулевой гармоники концентрации мономера  $M_0(\tau, y)$ , определяющее среднее его значение будет:



$$M_0(\tau, y) = M_n \left[ 1 + \frac{2\tau}{\pi} \exp \left[ -\alpha \frac{y}{2} \right] \right]^{-2}, \quad (2.9)$$

где  $\tau = t/T_p$  – относительное время,  $T_p^{-1} = \sqrt{\alpha\beta\tau_0 \langle K \rangle M_n I_0} \cdot K_g / \sqrt{2K_b}$  – время полимеризации.

Уравнения для амплитуды первой гармоники  $M_1(t, y)$  и  $n_1(t, y)$  будут:

$$M_1(\tau, y) = \frac{1}{\exp \left( \int_0^\tau A(\tau', y) d\tau' \right)} \cdot \int_0^\tau B(\tau', y) \cdot \exp \left( \int_0^{\tau'} A(\tau'', y) d\tau'' \right) d\tau', \quad (2.10)$$

где  $\int_0^\tau A(\tau', y) d\tau' = \exp \left( K_p^2 \cdot \int_0^\tau D_m(\tau', y) d\tau' + \frac{5.6 \cdot \exp \left( -\alpha \frac{y}{2} \right)}{\pi T_p \sqrt{M_n}} \int_0^\tau \sqrt{M_0(\tau')} d\tau' \right)$

Для  $n_1(t, y)$ :

$$n_1(t, \tau_y) = n_{1p}(t, \tau_y) + n_{1i}(t, \tau_y), \quad (2.11)$$

$$n_{1p}(\tau, y) = \left[ \frac{28}{5\pi T_p M_n^{3/2}} \int_0^\tau \sqrt{M_0(\tau', y)} \cdot M_1(\tau', y) d\tau' + \right. \quad (2.12)$$

$$\left. + \frac{8}{3\pi T_p \cdot M_n^{3/2}} \int_0^\tau M_0(\tau', y)^{3/2} d\tau' \right] \times \exp \left( -\alpha \frac{y}{2} \right) \cdot \delta n_p$$

$$n_{1i}(\tau, y) = -\frac{\delta n_p \cdot K_p^2}{M_n} \int_0^\tau D_m(\tau', y) M_1(\tau', y) d\tau' \quad (2.13)$$

Решение (2.10), (2.11) записаны как функции от пространственной и временной координаты. Отсюда следует, что в процессе записи, во-первых амплитудный профиль записываемой решетки является неоднородным, во-вторых трансформируется во времени, и в третьих, кинетика изменения амплитуды решетки в каждой пространственной точке является различной и определяется вкладами в амплитуду голографической решетки процессов полимеризации и вытеснения инертной компоненты за счет диффузии мономера, которые пропорциональны  $\delta n_p$  и  $\delta n_i$ . Это иллюстрируют графики на рисунке 2.7.

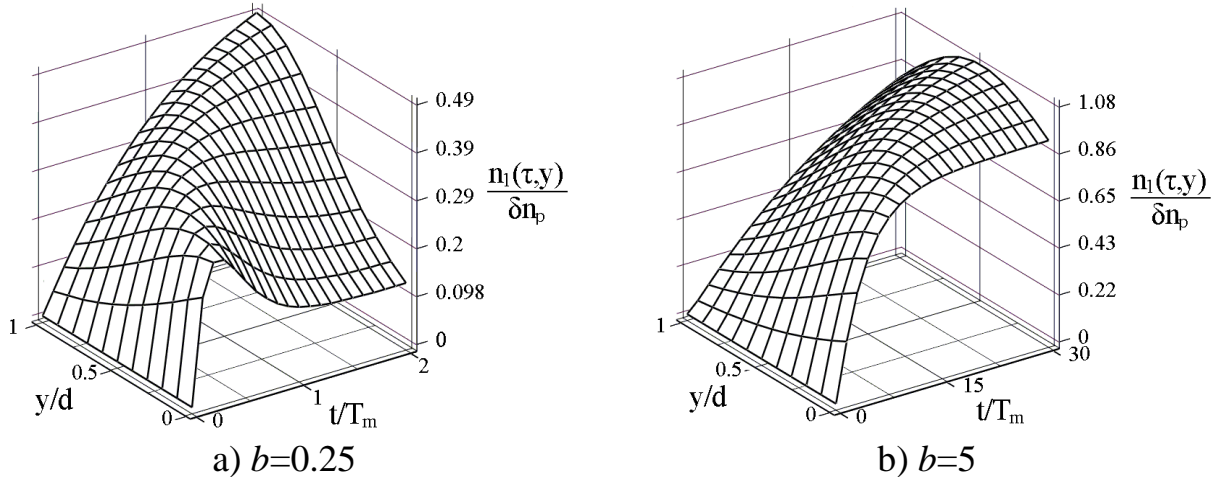


Рисунок 2.7 – Пространственно-временные профили нормированной амплитуды первой гар-



моники показателя преломления, где  $b=T_p/T_m$ ,  $T_m = 1/K^2 D_m$  – время диффузии мономера,  $T_p$  – время полимеризации.

В области параметра  $b \leq 1$  (рисунок 2.7 а) поглощение приводит к трансформации профиля по глубине решетки от спадающего к возрастающему за время записи. Это обусловлено уменьшением скорости полимеризации в области ( $0.5 < y/d < 1$ ) вследствие уменьшения интенсивности записывающих пучков, вызванного оптическим затуханием, что приводит на начальной стадии записи к спадающему профилю решетки. Затем профиль решетки со временем записи становится возрастающим. Это связано с изменением соотношения между временем полимеризации и временем диффузии мономера по глубине решетки. В результате диффузионные процессы мономера в областях решетки с наименьшей интенсивностью ( $0.5 < y/d < 1$ ) приводят в процессе записи к увеличению концентрации мономера и вследствие этого к увеличению амплитуды решетки в указанных областях.

В результате при выходе на стационарный участок записи профиль становится возрастающим и, как следствие, эффективность дифракции увеличится по сравнению со случаем без затухания. Следует отметить, что данный эффект имеет место только в данной области параметра  $b$ , когда диффузионные процессы не дают вклада в полимеризационные процессы записи.

В случае  $b=T_p/T_m > 1$  (рисунок 2.7 б) происходит уменьшение вклада самого полимеризационного процесса в результате уменьшения скорости полимеризации в области ( $0.5 < y/d < 1$ ) вызванного уменьшением интенсивностей записывающих пучков. Как результат профиль во все время записи остается убывающим и эффективность дифракции на стационарном участке меньше чем для случая без затухания.

В отсутствии оптического поглощения в ФПМ, зависимость дифракционной эффективности луча от относительной береговой расстройки будет:

$$\eta_d(\Delta) \propto \left( \frac{\sin \Delta}{\Delta} \right)^2 \quad (2.14)$$

Та же зависимость, но с учётом процессов протекаемых в поглощающих ФПМ будет:

$$\eta_d(\Delta) = \left| g_1 \cdot d \cdot \int_0^1 n_1(\tau, y) \cdot \exp(j \cdot \Delta \cdot y) dy \right|^2 \quad (2.15)$$

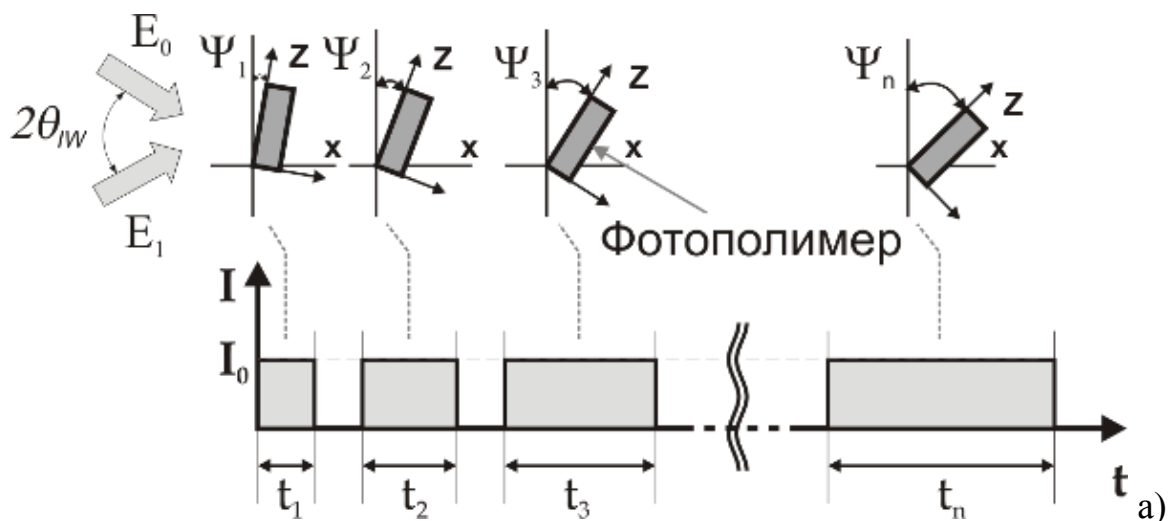
где  $j$  – мнимая единица. Таким образом, аппаратная функция фазовой голограммы, записанной в ФПМ, определяется выражением (2.15). Относительная Береговая расстройка  $\Delta$  может быть пересчитана в длину оптической волны или в угол наклона ФПМ.

**Аналитическое описание и алгоритм процесса записи НДР пропускающего типа путём углового мультиплексирования.** Математическую модель для записи одиночной голограммы, можно модифицировать на случай последовательной записи нескольких НДР в ФПМ. Как уже говорилось, последо-

вательная запись голограмм в ФПМ отличается от записи в кристаллах тем, что по мере записи решётки расходуется мономер на образование полимерной цепи.

Принцип записи голографических НДР схематически показан на рисунке 2.8 а. Каждая голограмма записывается под своим углом  $\Psi_i$ , с одинаковым углом схождения записывающих лазерных пучков  $\theta_{IW}$  в течение определённого времени  $t_i$ . При этом в ФПМ, из за процессов радикальной полимеризации, формируется фазовая голографическая решётка. Типовые характеристики динамики записи таких решёток, т.е. зависимости дифракционной эффективности от времени записи (экспозиции), для трёх первых НДР, представлены на рисунке 2.8б. Моделирование механизма последовательной записи НДР в ФПМ состоит в следующем:

- Записывается первая голограмма (кривая 1, на рисунке 2.8 б) под углом  $\Psi_1$  (угол между нормалью к полимеру и биссектрисой угла схождения записывающих пучков), и с начальной концентрацией мономера  $M_{n1}=M_{n0}$ , где  $M_{n0}$  – начальная концентрация мономера до процесса записи. По мере записи решётки мономер расходуется за счёт реакции полимеризации. При достижении заданной дифракционной эффективности решётки  $\eta_0$ , за время экспозиции  $t_1$ , запись голограммы прекращается (рисунок 2.4 а) и определяется оставшаяся концентрация мономера  $M_{n2} < M_{n1}$ . Отметим, что на рисунке 2.8 б, пунктирной линией обозначена динамика записи дифракционной решётки, если бы запись голограммы не прекращалась, а продолжалась дальше.



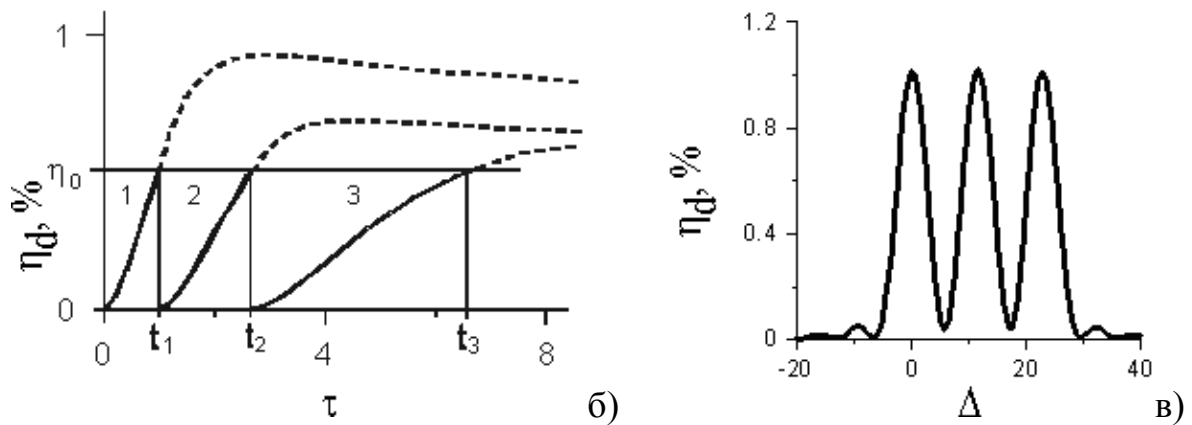


Рисунок 2.8 – Схема последовательной записи НДР в ФПМ (а), динамика дифракционной эффективности, для трёх последовательно записываемых НДР (б) и зависимость нормированной дифракционной эффективности от расстройки Брегга для трёх записанных НДР (в).

- Записывается вторая голограмма (кривая 2 на рисунке 2.8 б) под углом  $\Psi_2$  (рисунок 2.8 а), но уже с начальной концентрацией мономера  $M_{n2}$ . При достижении значения  $\eta_0$ , через промежуток времени  $t_2$ , запись голограммы снова прекращается и определяется оставшаяся концентрация мономера  $M_{n3} < M_{n2}$ . Далее этот процесс повторяется такое число раз, сколько голограмм необходимо записать. Отметим, что время экспозиции, с ростом порядкового номера записываемой голограммы и при условии равных дифракционных эффективностей увеличивается. Это связано с изменением динамики записи голограмм (рисунок 2.8 б). Вследствие истощения концентрации мономера необходимо больше энергии для достижения той же дифракционной эффективности, как и у предыдущих голограмм.

- На основе найденных времён записи рассчитывается зависимость интенсивности дифрагированного пучка от относительной расстройки Брегга, либо от угла падения считывающего голограмму луча, или от длины оптической волны. В последних двух случаях получаем угловой или частотный спектр для устройства селекции длин волн на основе НГР записанных в ФПМ. На основе этих спектров (аппаратных функций) определяются переходные помехи, и соответствие их поставленным требованиям. На рисунке 2.8 в, приведена зависимость нормированной дифракционной эффективности от расстройки Брегга для трёх записанных НДР при следующих параметрах модели:  $\alpha = 1$  Нп,  $\delta n_p = 10^{-2}$ ,  $\delta n_i = 10^{-2}$ ,  $d = 20$  мкм,  $n = 1.45$ ,  $\theta_{IW} = 20^\circ$ ,  $\Psi_1 = 0^\circ$ ,  $\Psi_2 = 5^\circ$ ,  $\Psi_3 = 10^\circ$ . Все три голограммы записаны при условии равенства их дифракционных эффективностей ( $\eta_0 = 1\%$ ).

• Отметим, что спектральные составляющие группового сигнала с  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ , дифрагируют не только на «своей» решётке с вектором  $\mathbf{K}_i$ , для которой выполняется условие Брега, но и на всех остальных. В этом случае уровень «просочившегося» сигнала из соседних каналов будет ниже, и его максимальное значение будет определяться значением Бреговской расстройки  $\Delta_i$ . На рисунке 2.9 изображена векторная диаграмма для записанных в ФПМ, трёх НГР в момент дифракции света на первой решётке с вектором  $\mathbf{K}_1$ . Для этой решётки выполняется условие Брега ( $\Delta = 0$ ). Так же световая волна дифрагирует и на двух остальных решётках с векторами  $\mathbf{K}_2$  и  $\mathbf{K}_3$ . В этом случае, интенсивность дифрагированных лучей будет очень мала (т.к. будут присутствовать расстройка Брега  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$ ) но, тем не менее, они будут вносить переходные помехи в соседние каналы.

Для учёта начальной концентрации мономера для каждой НГР, введём в уравнения (2.10, 2.11) индекс  $i$  – номер голограммы, и перепишем их, уже с учётом истощения мономера для каждой последующей записанной решётки. Выражение для амплитуды первой гармоники концентрации мономера для  $i$ -ой голограммы запишется:

$$M_1(\tau, y, i) = -\frac{8 \cdot M_{ni}}{A(\tau, y, i) \cdot 3\pi T_{pi} \cdot M_{ni}^{3/2}} \cdot \exp\left[-\alpha \frac{y}{2}\right] \cdot \int_0^\tau A(\tau', y, i) \cdot \sqrt{M_0(\tau', y, i)} \cdot M_1(\tau', y, i) d\tau' + \frac{8}{\sqrt{M_{ni}} \cdot 5\pi T_{pi}} \cdot \exp\left[-\alpha \frac{y}{2}\right] \cdot \int_0^\tau \sqrt{M_0(\tau', y, i)} d\tau', \quad (2.16)$$

где  $A(\tau, y, i) = K_p^2 \int_0^\tau D_m(\tau', y, i) d\tau' + \frac{28}{\sqrt{M_{ni}} \cdot 5\pi T_{pi}} \cdot \exp\left[-\alpha \frac{y}{2}\right] \cdot \int_0^\tau \sqrt{M_0(\tau', y, i)} d\tau'$ ,  
амплитуда нулевой гармоники:

$$M_0(\tau, y, i) = M_{ni} \left[ 1 + \frac{2\tau}{\pi} \exp\left[-\alpha \frac{y}{2}\right] \right]^{-2}, \quad (2.17)$$

$M_{ni}$  – начальная концентрация мономера на момент записи  $i$ -ой голограммы,  $T_{pi}$  – время полимеризации на момент записи  $i$ -ой голограммы.

Первая гармоника показателя преломления  $n_1(t, y, i)$  будет:

$$n_1(\tau, y, i) = \frac{\delta n_p}{\pi T_{pi}} \cdot \exp\left[-\alpha \frac{y}{2}\right] \cdot \int_0^\tau \left( \frac{28}{5} \sqrt{\frac{M_0(\tau', y, i)}{M_{ni}^3}} M_1(\tau', y, i) + \frac{8}{3\pi T_{pi}} \left( \frac{M_0(\tau', y, i)}{M_{ni}} \right)^{3/2} \right) d\tau' - \frac{\delta n_i K_p^2}{M_{ni}} \int_0^\tau D_m(\tau', y, i) M_1(\tau', y, i) d\tau' \quad (2.18)$$



Рисунок 2.9 – векторная диаграмма считывания НГР

Выражение (2.18) совместно с первым уравнением (2.37) составляет основу для определения дифракционной эффективности  $i$ -ой НДР

$$\eta_d(\Delta) = |A_{1i}|^2 / |A_0|^2 = \left| G_i \cdot \int_0^1 n_{1i}(\tau, y) \cdot \exp(i \cdot \Delta \cdot y) dy \right|^2,$$

где  $G_i = \pi d / \lambda \cos(\theta_i)$ ,  $\theta_i$  – угол считывания  $i$ -ой голограммы в фотополимере, и соответственно коэффициента передачи  $i$ -ого канала демультиплексора,:

$$T_i(\Delta) = \left| G_i \cdot \int_0^1 n_{1i}(\tau, y, i) \cdot \exp(i \cdot \Delta \cdot y) dy \right|^2. \quad (2.19)$$

Относительная расстройка  $\Delta$  в (2.48) связана с изменением длины оптической волны  $\delta\lambda = \lambda - \lambda_i$  и угла считывания  $\delta\theta = \theta - \theta_i$  ( $\delta\theta = \delta\lambda / 2n\lambda \cos\theta_i$ )

$$\Delta = \delta\theta \frac{4\pi nd}{\lambda_i} \sin\theta_i, \quad \Delta = \delta\lambda \frac{2\pi nd}{\lambda_i} \tan\theta_i,$$

относительно их значений, удовлетворяющих условию Брэгга  $\sin\theta_i = \lambda_i / 2n\lambda$ .

Таким образом, выражения (2.46), (2.48) являются математической основой для компьютерного моделирования аппаратной функции WDM демультиплексора на основе наложенных голограмм в ФПМ.

### 2.3 Расчёт основных оценочных характеристик

Для того чтобы построить демультиплексор на основе наложенных решёток в фотополимерном материале, необходимо рассчитать некоторые параметры их записи и условия считывания, в соответствии с заданными требованиями к разрабатываемому демультиплексору. Определим эти параметры.

#### Дифракционная эффективность

Дифракционная эффективность – это мощность излучения, направляемое в дифрагированную волну. Она является важной количественной характеристикой голограммы и зависит от множества факторов (параметров фотополимерного материала, условий записи и считывания, числа наложенных голограмм и т.д.). Дифракционная эффективность определяется как отношение потока излучения в дифрагированной волне  $I_1$  к падающему на голограмму потоку излучения  $I_0$  (рисунок 2.6).

Максимальную достижимую дифракционную эффективность можно оценить по формуле:

$$\eta_{d \max} \approx \frac{1}{\mathbf{n}}, \quad (2.20)$$

где  $\mathbf{n}$  – число наложенных решёток в ФПМ. На практике эта дифракционная эффективность будет значительно ниже из-за расхода мономера на образование полимерных цепей, которого в ФПМ ограниченное количество. По этому ре-

альную дифракционную эффективность, а тем более равную, для всех наложенных голограмм, записанных в ФПМ можно найти, только используя численные методы на ЭВМ.

**Угол дифрагированной волны ( $\theta_{DW}$ ) с заданной оптической длиной  $\lambda_i$ .**

При дифракции на объемной голографической решётке (рисунок 2.10) световой пучок последовательно рассеивается от большого числа периодически расположенных поверхностей (пучностей), на рисунке 2.10. обозначенных пунктиром. Чтобы амплитуда результирующей дифрагированной волны была максимальной, рассеянные волны должны быть в фазе. Для этого необходимо, чтобы выполнялся закон Брэгга.

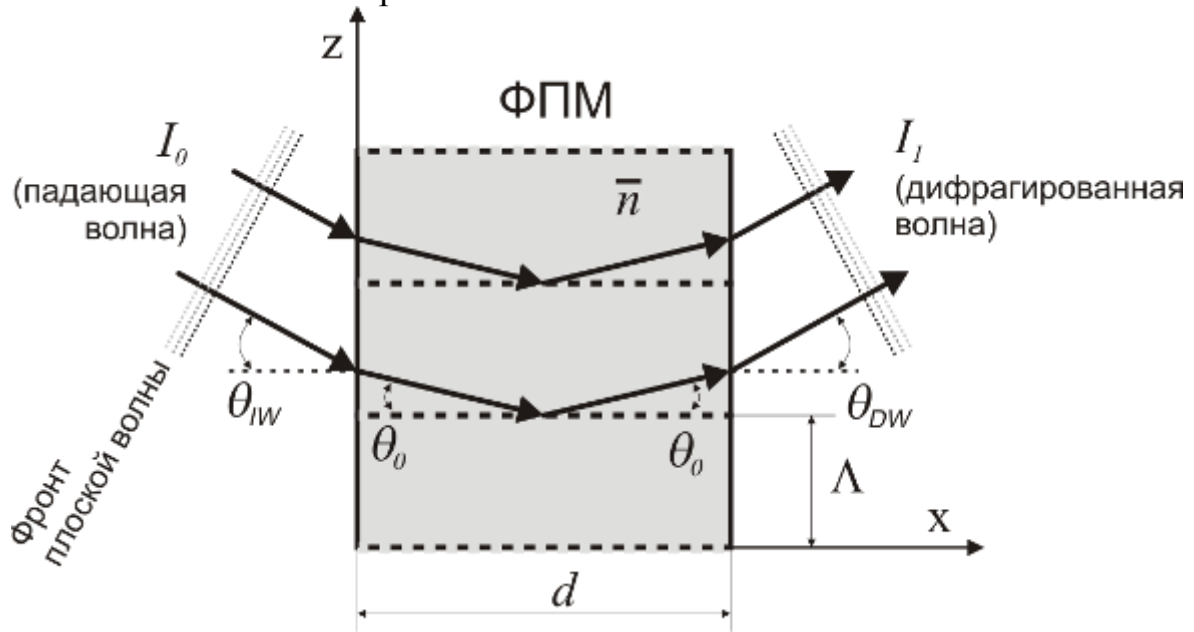


Рисунок 2.10 – Дифракция света на объёмной решётке

Этот закон связывает между собой длину волны света в воздухе  $\lambda_0$ , среднее значение показателя преломления ФПМ –  $\bar{n}$ ,  $\theta_0$  – угол падения световой волны на рассеивающие поверхности и расстояние  $\Lambda$  между этими поверхностями, называемое *периодом решётки*. Закон записывается следующим образом:

$$2\Lambda \sin \theta_0 = \frac{\lambda_0}{\bar{n}}, \quad (2.21)$$

Таким образом, при использовании голографической НДР в качестве фильтра важно определить угол  $\theta_{DF}$ , под которым будет дифрагировать луч с заданной длиной волны  $\lambda_0 = \lambda_i$  (где  $\lambda_i$  соответствует частотному плану ИТУ-Т). Период решётки  $\Lambda$  определяется из условий записи голограммы на основе (2.21), с учётом замены:  $\lambda_0 = \lambda_{записи}$ ,  $\theta_0 = \theta_{IW(записи)}$ . Так же следует учесть, что углы  $\theta_0$ ,  $\theta_{IW}$  и  $\theta_{DW}$ , связаны законом Снеллиуса:

$$\frac{\sin \theta_{IW(DW)}}{\sin \theta_0} = \frac{\bar{n}}{n'}, \quad (2.22)$$

где  $n'$  – показатель преломления среды вне ФПМ (для воздуха  $n' = 1$ ).

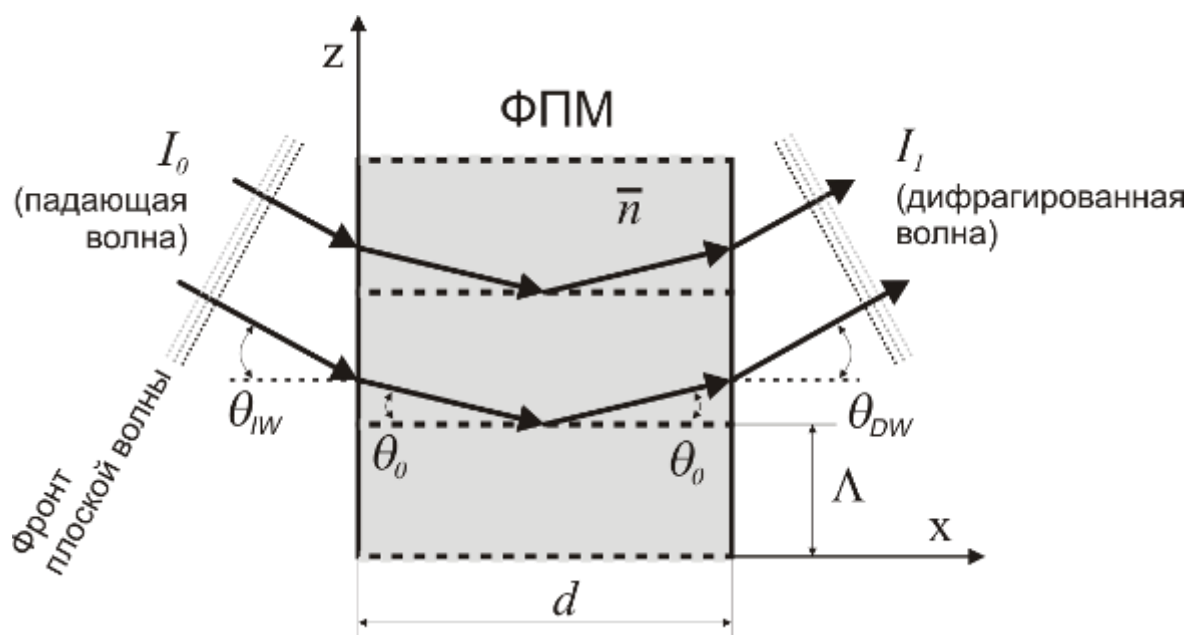


Рисунок 2.10 – Дифракция света на объёмной решётке

При записи НДР, по рассматриваемой схеме последовательного мультиплексирования, период решётки  $\Lambda$  будет постоянным, т.к. постоянен угол записи  $\theta_{IW}$  (записи) всех голограмм, а изменяется только наклон ФПМ на угол  $\Delta\Psi$ . Учитывая это, перепишем (2.21) в виде:

$$\theta_{DW, i} = a \sin\left(\frac{\lambda_i}{2\Lambda}\right) - \Delta\Psi \cdot (i - 1), \quad (2.23)$$

где  $i$  – индекс записываемой НДР.

Таким образом, угол дифрагированной волны  $\theta_{DW}$  с заданной оптической длиной  $\lambda_i$  для  $i$ -ого фильтра (НДР) определяется выражением (2.23).

### Селективность голографических НДР

Селективность голограммы определяет характер уменьшения интенсивности дифрагированной волны при отклонении условий считывания голограммы от условий Брэгга. Существует спектральная селективность голограммы, связанная с изменением длины волны излучения считывания, и угловая селективность, обусловленная изменением угла считывания голограммы. Голограммы, записанные в ФПМ обладают высокой селективностью, т.к. являются объёмными.

Максимум интенсивности дифрагированной волны наблюдается при угле Брэгга  $\theta_0$  и длине волны Брэгга  $\lambda_0$  (при этом,  $\Delta = 0$ ). При отклонении от условий Брэгга ( $\theta = \theta_0 \pm \delta\theta$  и  $\lambda = \lambda_0 \pm \delta\lambda$ ) интенсивность дифрагированной волны уменьшается ( $\Delta \neq 0$ ), как показано на рисунке 2.11.

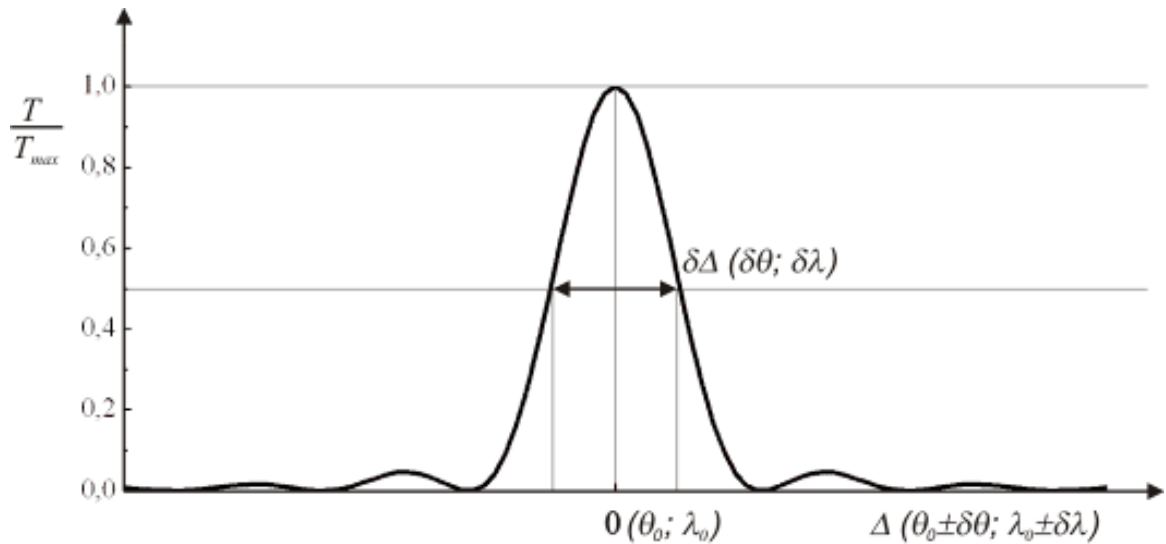


Рисунок 2.11 – Параметры, определяющие селективность голограммы

Угловая селективность голограммы определяется как интервал углов падения плоской монохроматической восстанавливающей волны на голограмму, в котором интенсивность дифрагированной волны превышает половину ее максимального значения (двухсторонняя стрелка на рисунке 2.11). Спектральная селективность голограммы определяется как интервал длин волн (частот), в котором интенсивность дифрагированной волны превосходит половину ее максимального значения (двухсторонняя стрелка на рисунке 2.11). При этом голограмма должна освещаться излучением, расходимость которого существенно меньше угловой селективности данной голограммы).

**Угловая селективность ( $\Delta\theta$ ).** Как уже говорилось выше, параметр  $\Delta$  является обобщённой расстройкой Брегга и может быть пересчитан в угол наклона ФПМ (либо, что тоже самое, в угол падения излучения на ФПМ) следующим образом:

$$\Delta = \frac{\delta\theta \cdot 2 \cdot \pi \cdot \bar{n}}{\lambda_0} d \cdot \sin \theta_0 \quad (2.24)$$

где  $\delta\theta$  – отстройка от угла Брегга. Угловую селективность решётки, в рамках двухволновой теории (для синусоидального профиля фазовой решётки) можно оценить выражением:

$$2\Delta\theta \approx \frac{\Lambda}{d} \quad (2.25)$$

Видно, что толщина ФПМ  $d$  является важным параметром управления угловой селективностью. Для современных самопроявляющихся фотополимеров возможны вариации их толщины от 10 до 2000 мкм.



При определении переходных помех в демультимплексоре на основе последовательной записи голограмм, при различном угле наклона ФПМ (вектора  $\mathbf{K}$ ), угловая селективность тесно связана с величиной угла  $\Delta\Psi$  (шаг угла наклона ФПМ). Чем он больше, тем на больший угол будет дифрагировать световая волна и тем меньшие переходные помехи будут у демультимплексора. Величину  $\Delta\Psi$  можно оценить следующим образом:

$$\Delta\Psi \geq 4 \cdot \Delta\theta \quad (2.26)$$

т.е. угловой разнос каналов, должен быть как минимум в два раза больше чем угловая селективность голографических НГР.

**Спектральная селективность ( $\Delta\lambda$ ).** При отклонении длины волны, падающей на голограмму от условия Брегга на значение  $\pm\delta\lambda$  ( $\delta\lambda / \lambda_0 \ll 1$ ), максимальная эффективность будет наблюдается при освещении не под углом  $\theta_0$ , а под новым углом Брэгга  $\theta_0 \pm \delta\theta$ . Величину  $\delta\theta$  можно выразить через  $\delta\lambda$ , введя в (2.21) новые брэгговские параметры  $\theta_0 \pm \delta\theta$  и  $\lambda_0 \pm \delta\lambda$ :

$$2\Lambda\bar{n} \sin(\theta_0 + \delta\theta) = \lambda_{rec} + \delta\lambda \quad (2.27)$$

Полагая, что  $\sin(\delta\theta) \approx \delta\theta$  и  $\cos(\delta\theta) \approx 1$  и используя (2.21), получим:

$$\delta\theta = \frac{\delta\lambda}{\lambda_0} \operatorname{tg} \theta_0 \quad (2.28)$$

Подставляя (2.28) в (2.24), получим выражение для зависимости относительной Брегговской расстройки  $\Delta$  от величины отклонения длины волны  $\delta\lambda$ :

$$\Delta = -\frac{\delta\lambda}{\lambda_0} \operatorname{tg} \theta_0 \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot \bar{n}}{\lambda_0} \right) \cdot d \cdot \sin \theta_0 \quad (2.29)$$

Спектральную селективность решётки, в рамках двухволновой теории (для синусоидального профиля фазовой решётки) можно оценить выражением:

$$2\Delta\lambda \approx \lambda_0 \frac{\Lambda}{d} \cot \theta_0 \quad (2.30)$$

Так же как и в случае определения угловой селективности (2.25), на спектральную селективность так же оказывает существенное влияние толщина ФПМ  $d$ .

На рисунке 2.12 изображены нормированные зависимости относительной дифракционной эффективности для двух голограмм, от длины оптической волны, при частотном разnose центральных максимумов дифрагированных световых волн – 400 ГГц. Спектральная селективность этих НГР составляет 0.8 нм при толщине ФПМ – 300 мкм и угле записи  $\theta_{TW} = 70^\circ$ .

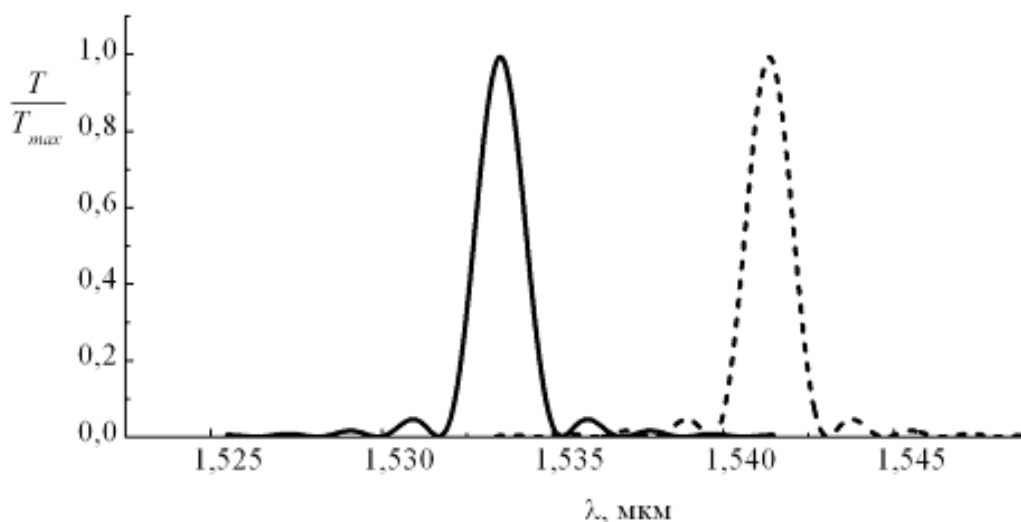


Рисунок 2.12 – Зависимость относительной дифракционной эффективности для двух голограмм, от длины оптической волны.

### 3 Рекомендации по выполнению работы

#### Порядок выполнения лабораторных работ

3. Получить вариант для выполнения лабораторной работы у преподавателя.
4. Выполнить расчётное задание, согласно своему варианту.
5. Ознакомится с руководством пользователя по работе с приложением по моделированию.
6. Запустить приложение.
7. Пройти тест-контроль.
8. Выполнить пункты экспериментального задания, согласно своему варианту.
9. Оформить отчёт о проделанной лабораторной работе в приложении MS Word.

#### Содержание отчёта

Отчёт о проделанной работе должен содержать следующие разделы:

1. Цель работы.
2. Краткая теория.
3. Результаты расчётного задания.
4. Результаты экспериментального задания.
5. Выводы по проделанной работе.

### 3.1 Расчётное задание

1. Согласно своему варианту задания, из таблицы исходных данных по таблице ИТУ-Т (приложение) найти число каналов (решёток)  $n$  и центральные частоты  $\lambda_i$ .

Таблица – Исходные данные для выполнения работы

Параметр	Вариант				
	1	2	3	4	5
Диапазон * (нм)	1528,77 – 1532,68	1528,77 – 1536,61	1546,12 – 1554,13	1539,77– 1549,32	1535,82 – 1538,98
$\Delta f_k$ , ГГц	100	200	400	200	100
$P_0$ (Дб)	25	22	25	26	22
Параметр	Вариант				
	6	7	8	9	10
Диапазон * (нм)	1549,32 – 1553,33	1533,47– 1542,94	1546,12 – 1554,13	1535,04 – 1557,36	1530,33 – 1536,61
$\Delta f_k$ , ГГц	100	200	400	500	200
$P_0$ (Дб)	21	19	25	18	24
Параметр	Вариант				
	11	12	13	14	15
Диапазон * (нм)	1550,92 – 1554,13	1550,92– 1560,61	1533,47– 1557,36	1533,47– 1557,36	1541,35– 1550,92
$\Delta f_k$ , ГГц	100	200	400	100	200
$P_0$ (Дб)	23	20	18	19	24

\* – центральные максимумы первого и последнего канала;

2. Оценить изменение угла наклона ФПМ ( $\Delta\psi$ ) исходя из отношения  $\Delta\psi = (160^\circ - 2 \cdot \theta)/n$ .
3. Оценить толщину ФПМ ( $d$ ), необходимую для достижения заданной селективности, исходя из выражений (2.24) и (2.25).
4. Найти углы  $\theta_i$  под которым будут дифрагировать лучи с длинами волн  $\lambda_i$  исходя из выражения (2.21).
5. Оценить теоретически максимальную достижимую дифракционную эффективность голограмм по формуле (2.20).

### 3.2 Экспериментальное задание.

1. Занести в программу параметры демультимплексора исходя из таблицы исходных данных и материальные параметры ФПМ:  $\delta_{ni}=10^{-3}$ ,  $\delta_{np}=10^{-2}$ ,  $s=1$ ,  $D=1 \cdot 10^{-15}$ ,  $n=1.45$ . Шаг углов наклона и толщина ФПМ находится из расчётного задания. Длину волны и угол записи взять из таблицы

Параметры	Вариант				
	1	2	3	4	5
$\lambda_{\text{зап}}$ (нм); $\theta_{\text{зап}}$ (град);	640 20	680 15	700 10	750 12	800 15
Параметры	Вариант				
	6	7	8	9	10
$\lambda_{\text{зап}}$ (нм); $\theta_{\text{зап}}$ (град);	850 10	900 15	950 20	630 10	1100 18
Параметры	Вариант				
	11	12	13	14	15
$\lambda_{\text{зап}}$ (нм); $\theta_{\text{зап}}$ (град);	730 13	990 15	620 12	785 13	700 10

2. Определить максимально достижимую дифракционную эффективность  $\eta_{d \max}$  для наложенных голограмм при отсутствии оптического затухания. Для этого необходимо определить такую дифракционную эффективность, при которой максимум кривой динамики записи последней голограммы проходил бы через  $\eta_{d \max}$ . Занести в таблицу получившиеся времена записи для каждой голограммы и максимумы относительной брэгговской расстройки  $\Delta i$ ;

№ голограммы	Время записи, сек	$\Delta i$

3. Исследовать зависимость дифракционной эффективности от относительной брэгговской расстройки  $Kd(\Delta)$ . Пронаблюдать изменения суммарных переходных помех на каждый канал и соответствие их требуемым нормам (P0). Для этого, переходные помехи перевести в децибелы и отразить в отчёте в виде таблиц и графиков. Если переходная помеха слишком большая, необходимо увеличить толщину ФПМ и повторить пункт 2 заново.
4. Повторить пункты 2-3, для оптического затухания в 3 Нэп. Сделать выводы о влиянии оптического затухания в ФПМ на динамику записи голограмм и дифракционные характеристики.
5. Сделать выводы по использованию оптического демультиплексора на основе наложенных дифракционных решёток записанных в ФПМ, как устройства селекции каналов в ВОСП. Выявить достоинства, недостатки и провести сравнительный анализ исследуемого демультиплексора, по сравнению с исследуемыми ранее демультиплексорами.

### Контрольные вопросы

1. Опишите принцип работы демультиплексора на основе наложенных дифракционных решеток.
2. В чём отличие демультиплексоров на основе наложенных голограмм в ФПМ от остальных существующих демультиплексоров?

3. В чём заключается процесс фотополимеризации?
4. Опишите основные механизмы записи голограммы в фотополимерном материале (ФПМ).
5. Как формируются наложенные голограммы в ФПМ?
6. Чем определяется угловая и частотная селективность голографических дифракционных решеток?
7. Какова зависимость переходных помех от углового рассогласования голограмм?
8. Как зависит максимальная дифракционная эффективность голограмм (вносимые потери) от количества каналов демультиплексора.?

#### **4 Описание программного обеспечения**

### **«ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ДЕМУЛЬТИПЛЕКСОРОВ НА ОСНОВЕ НАЛОЖЕННЫХ ГОЛОГРАММ В ФОТОПОЛИМЕРНОМ МАТЕРИАЛЕ»**

Руководство пользователя  
(Редакция от 12.10.2006)

#### **1 Общее описание**

##### **1.1 Функциональное назначение системы, область применения и ограничения**

Компьютерная лабораторная работа «Исследование оптических демультиплексоров на основе наложенных голограмм в фотополимерном материале» предназначена для исследования процессов голографической записи наложенных дифракционных решеток в фотополимерных материалах, расчета и оптимизации характеристик оптических демультиплексоров на их основе в учебных целях.


Программное обеспечение представляет собой приложение, в котором задаются параметры записи и считывания наложенных голограмм, материальные параметры фотополимерного материала и отображаются результаты расчета в виде графиков и таблиц. Приложение включает 15 вариантов заданий для проведения лабораторных работ, предусматривающих численный расчет интегральных преобразований, описывающих процессы записи и считывания наложенных голограмм в фотополимерном материале. В основу расчетов положена оригинальная математическая модель процесса последовательной голографической записи наложенных дифракционных решеток в поглощающих ФПМ при угловом мультиплексировании, описанная в п.2.4.

##### **1.2 Краткое описание системы и ее технические характеристики**

Компьютерная лабораторная работа, далее программа, представляет собой компьютерную программу, которая состоит из методического пособия (краткая теория с заданием на работу), входного теста и оболочки моделирования. Программа может функционировать под управлением операционных систем Windows всех поколений, начиная с Windows 95. Для нормального функционирования программы компьютер должен быть оснащен не менее чем 16 Мб оперативной памяти и не менее чем 8 Мб свободного места на жестком диске. Сама программа занимает около 20 Мб дисковой памяти. Программа не требует установки.

Оболочка моделирования построена по модальному принципу и предусматривает последовательное исследование на основе компьютерного моделирования различных характеристик демультимплексора.

### **1.3 Запуск программы и выход из программы**

Запуск программы осуществляется запуском файла PolyGrating.exe на выполнение, данный файл расположен в папке PolyGrating. После запуска на экране компьютера появляется главное окно программы. Оно окно содержит главное меню, панель инструментов, панелей для ввода исходных данных расчётные таблицы и графики. Выход из программы осуществляется нажатием кнопки  в верхнем правом углу главного окна.

## **2 Работа с программой**

В дальнейшем предполагается, что пользователь имеет определенные навыки работы в операционной системе Windows 95 или выше.

При работе с программой для перемещения между полями ввода, и нажатий на кнопки удобней всего использовать манипулятор "мышь".

Для моделирования демультимплексора, исполнителю необходимо ввести следующие исходные параметры:

9) для фотополимерного материала: среднее значение показателя преломления и его изменение при фотополимеризации, коэффициент диффузии компонент, толщина, коэффициент поглощения;

10) для условия записи: длину волны оптического излучения, число голограмм, угол схождения записывающих пучков, набор углов наклона ФПМ для записи каждой решётки.

Для заданных параметров производится расчет следующих основных характеристик, представленных в графической или табличной формах:

7) кинетика голографической записи наложенных голографических решёток и их дифракционных эффективностей;

8) дифракционная эффективность наложенных голограмм от относительной брэгговской расстройки;

9) перекрёстные помехи в каждом канале.

По полученным результатам расчета производится оценка вносимых потерь и селективных свойств исследуемого демультиплексора.

Настройка голографической решётки на заданную длину волны производится путём изменения углов наклона фотополимерного материала для каждой голографической решётки во время её записи.

Приложение позволяет осуществить оптимизацию материальных параметров фотополимерного материала для достижения определённого уровня перекрестных помех при заданном числе каналов, либо при известных материальных параметрах фотополимерного материала и заданном числе каналов, определить максимальную дифракционную эффективность, которая будет у всех каналов на выходе демультиплексора.

## 2.1 Главное окно

В главном окне (рисунок 2.1) осуществляется ввод исходных данных и расчёт параметров записи и считывания наложенных голографических решёток. Оно состоит из:

- файлового меню, где отображаются все функции программы;
- панели инструментов, где дублируются некоторые важные элементы файлового меню;
- закладок вида моделирования (запись голограмм, считывание голограмм и расчётная таблица);
- панелей ввода основных параметров;
- области построения графиков.

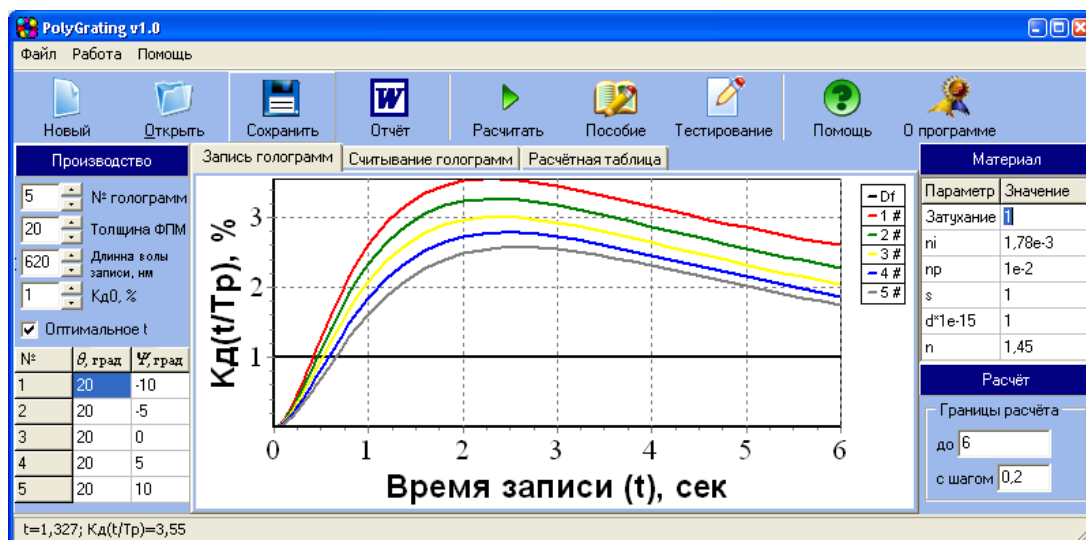





Рисунок 2.1

Главное меню состоит из трёх разделов: **Файл**, **Работа** и **Помощь**. Рассмотрим пункты каждого раздела.

### Файл






 **Новый**

Замена исходных данных, данными по умолча-



	нию.
 <b>Открыть файл</b>	Открыть файл с исходными данными. *
 <b>Сохранить файл</b>	Сохранить исходные данные в файл. *
 <b>Отчёт в MSWord</b>	Импортировать результаты моделирования в приложение MSWord.

\* Файл с данными имеет расширение .glm.

### Работа

 <b>Пособие</b>	Электронный вариант учебного пособия.
 <b>Тестирование</b>	Прохождение теста.
 <b>Рассчитать</b>	Пересчитать текущий график или таблицу.
 <b>Остановит расчет</b>	Остановка текущего расчёта.
 <b>Копировать график в буфер</b>	Копировать текущий график в буфер обмена в виде битового изображения.

### Помощь:

 <b>Помощь</b>	Руководство пользования программой.
 <b>О программе</b>	Информация о разработчиках программы.

## 2.2. Панель параметров записи голограммы

В левой части главного окна расположена панель «**Производство**» для задания значений параметрам записи голограмм (рисунк 2.2):

- число наложенных голограмм;
- толщина ФПМ, мкм;
- длина световой волны, на которой происходит запись голограмм, нм;
- дифракционная эффективность всех записанных голограмм;
- таблица для задания углов схождения  $\theta$ , углов поворота ФПМ  $\Psi$  и времён записи каждой голографической решётки (при отключенной опции «**Оптимальное t**»). Число строк в таблице определяется значением поля ввода данных «**№ голограмм**».

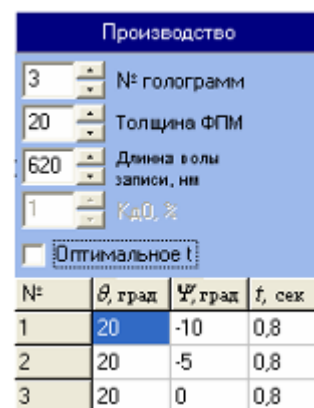


Рисунок 2.2.

Переключатель «**Оптимальное t**», предназначен для отображения дополнительного столбца таблицы «**t, сек**». В него вводятся заданные пользователем времена записи каждой голограммы.



## 2.3 Панель материальных параметров ФПМ

В правой части главного окна расположена панель для задания материальных параметров ФПМ (рисунок 1.3): затухание в ФПМ, амплитуды решётки:  $\delta n_i$ ,  $\delta n_r$ , скорость диффузии мономера  $\mathbf{d}$ , показатель преломления ФПМ.

Материал	
Параметр	Значение
Затухание	1
$n_i$	1,78e-3
$n_r$	1e-2
$s$	1
$d \cdot 1e-15$	1
$n$	1,45

Рисунок 2.3.

## 2.4 Моделирование записи наложенных голограмм

Первая закладка главного окна производит численное моделирование записи наложенных голограмм (рисунок 2.4). В закладке находится график динамики записи последовательно-наложенных голограмм в ФПМ (зависимость дифракционной эффективности каждой из наложенных голограмм в ФПМ от времени экспозиции). Черная горизонтальная линия – это значение дифракционной эффективности  $Kd_0$ .

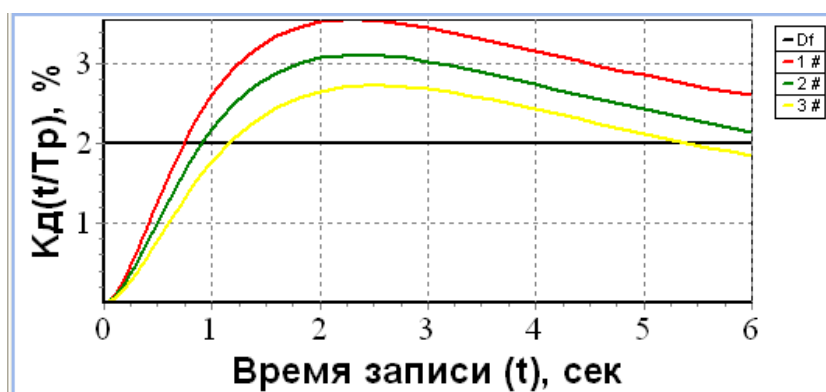


Рисунок 2.4.

В панели «*Расчет*» можно изменить просмотр времени записи голограмм и шаг построения графиков.

## 2.5 Моделирование записи наложенных голограмм

Вторая закладка главного окна производит численное моделирование считывания наложенных голограмм (рисунок 2.5). В закладке находится график зависимости интенсивности дифрагируемого луча от относительной расстройки Брега  $\Delta$ . В панели «*Расчёт*» задаются минимальное и максимальное значения расчёта  $\Delta$  и шаг. С помощью переключателя «*Логарифмический масштаб*» можно отобразить зависимости в децибелах.

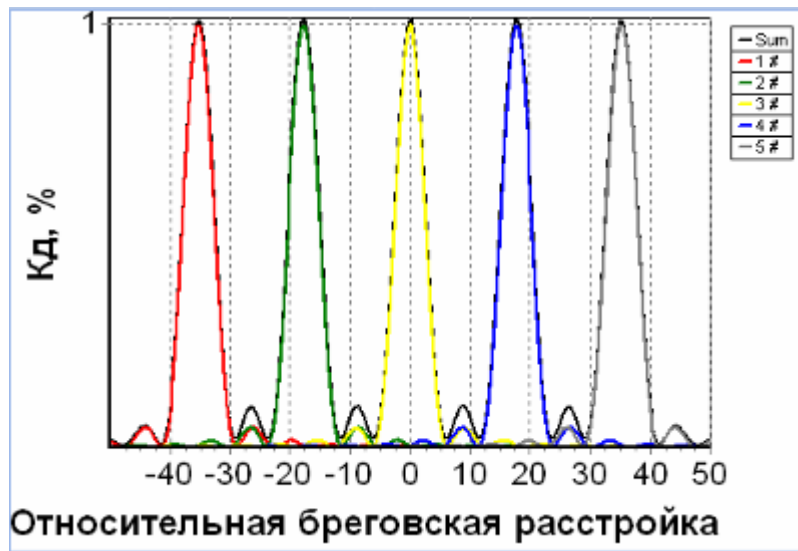


Рисунок 2.5

## 2.6 Расчётная таблица

Вторая закладка главного окна производит численное моделирование считывания наложенных голограмм (рисунок 2.6). В закладке находится табличное представление результатов моделирования. В ней, для каждой голограммы отображаются следующие параметры:

- ***Mn*** – начальная относительная концентрация мономера, на момент записи голограммы;
- ***Tr*** – время полимеризации, для очередной голограммы;
- ***t, сек*** – время записи голограммы;
- ***Delta*** – максимумы относительной береговой расстройки;
- ***I, Single*** – интенсивность дифрагированного луча;
- ***Iвнес.*** – интенсивность перекрёстных помех от соседних решёток;
- ***ISum*** – суммарная интенсивность дифрагированного луча:  $ISum = I_{Single} + I_{внес.}$

Nº	Mn	Tr	t, сек	delta	Кд, %	I, Single	Iвнес.	ISum
1	1	1,4142135	0,4131691	-35,19560	0,0099983	9,998E-03	1,483E-03	1,148E-02
2	0,9182463	1,4758267	0,4581398	-17,66502	0,0100005	1,000E-02	2,462E-03	1,246E-02
3	0,8390709	1,5438874	0,5105812	0	0,0099996	1,000E-02	4,000E-02	5,000E-02
4	0,7626224	1,6194226	0,5725441	17,665022	0,0100005	1,000E-02	2,464E-03	1,246E-02
5	0,6890140	1,7037306	0,6465187	35,195602	0,0100013	1,000E-02	1,485E-03	1,149E-02

Рисунок 2.6

## 2.7 Окно помощи

Окно помощи (рисунок 2.7) предназначено для отображения хода выполнения лабораторной работы, методического пособия и руководства пользователя.

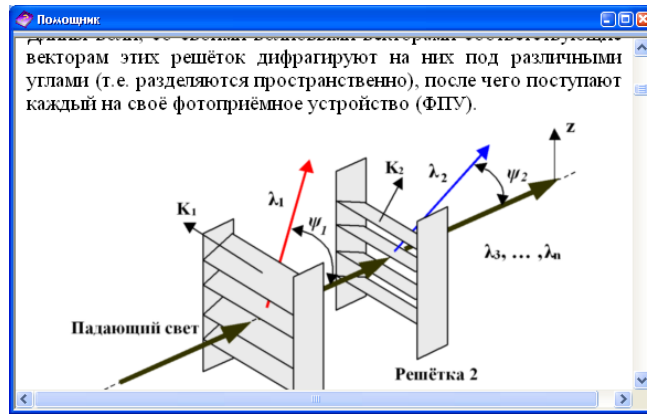


Рисунок 2.7 – Окно помощи

## 2.8 Окно тестирования

Перед началом выполнения лабораторной работы и в процессе её выполнения (*Работа*→*Тестирование*), можно пройти тестирования по теме «Создания демультиплекторов на основе интерференционных и Фабри-Перро фильтров». Окно тестирования представлено на рисунке 1.8.

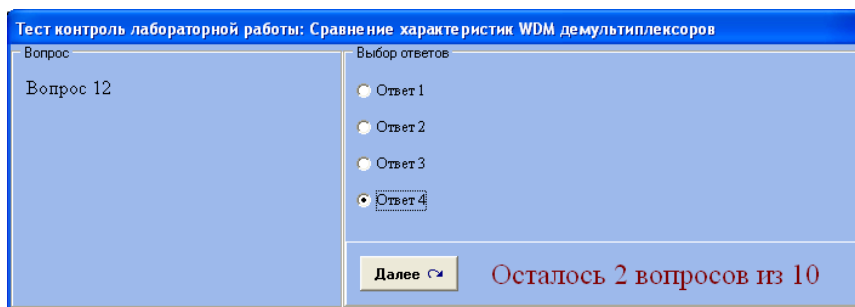


Рисунок 2.8 – Окно тест контроля

Слева расположена область вопросов, справа область вариантов ответов. Внизу расположена кнопка перехода на следующий вопрос, общее количество вопросов и сколько вопросов осталось. По окончании теста выдаётся оценка по пяти бальной шкале.

## Список литературы

1. Заславский К.Е. Волоконно-оптические системы передачи со спектральным уплотнением: Учебное пособие для вузов. - Новосибирск: СибГУТИ, 2005. – 136 с.
2. Довольнов Е.А., Кузнецов В.В., Миргород В.Г., Шарангович С.Н. Мультиплексорное и усилительное оборудование многоволновых оптических систем передачи: учеб. пособие. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2016. – 156 с.
3. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи (4-е, дополненное издание)- М. : Эко-Тренд. 2007. -512 с..
4. Фокин В.Г. Оптические системы передачи и транспортные сети. Учебное пособие .- М.: Эко-Трендз, 2008. -288 с.
5. Скляров О К. Волоконно-оптические сети и системы связи. Учебное пособие.- СПб : Лань, 2010. – 272 с.
6. РД 45.286-2002. Руководящий документ отрасли аппаратура волоконно-оптической системы передачи со спектральным разделением. Технические требования.
7. Кузнецов В.В., Шарангович С.Н. Компьютерная лабораторная работа «Исследование оптических демультиплексоров на основе наложенных голограмм в фотополимерном материале» - М.: ВНТИЦ, 2006. - № 50200501796

## **5 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4 КОМПЬЮТЕРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО МУЛЬТИПЛЕКСОРА НА ОСНОВЕ МАССИВА ПЛАНАРНЫХ ВОЛНОВОДОВ**

### **Содержание**

1. Введение.....	118
2. Теоретический материал по AWG.....	118
2.1 Принципы действия и структура мультиплексора .....	118
2.2. Математическая модель .....	120
2.3. Расчет основных оценочных характеристик .....	127
3. Рекомендации по выполнению работы.....	128
3.1. Расчётное задание .....	128
3.2. Экспериментальное задание .....	129
4. Описание программного обеспечения.....	130
Список литературы.....	140

**Цель работы:** изучение принципов действия и компьютерное исследование основных характеристик и параметров оптического мультиплексора на основе массива планарных волноводов (AWG) на основе программного обеспечения [14],

## 1 Введение

Возможность передачи большого количества информации по ВОЛС связана с использованием технологии WDM/DWDM, где передача информации по волокну ведётся одновременно на разных длинах волн. Для этого необходимо ввести разные длины волн в волокно с помощью оптических мультиплексоров (MUX) на передаче, и вывести на приёме при помощи демультиплексоров (DMUX).

На сегодняшний день существуют различные устройства для мультиплексирования/демультиплексирования оптического потока, у каждого из которых есть свои достоинства и недостатки. Одним из приоритетов является возможность создания WDM/DWDM устройств с применением интегрально-оптической технологии.

Интегральная оптика успешно применяется для создания решеток на основе массива планарных волноводов различной длины между двумя планарными линзами смесителями AWG (Arrayed Waveguide Gratings).

Решетки на основе массива волноводов AWG используются для того, чтобы перераспределять сигналы различных длин волн (каналы) между двумя наборами волокон или выделить (демультиплексировать) отдельные каналы составного сигнала в отдельные волокна. Эта технология сейчас становится основной для производителей мультиплексоров и демультиплексоров систем DWDM. Благодаря легко масштабируемой структуре, она может широко применяться в системах с сотнями каналов [1].

## 2 Теоретический материал по AWG

### 2.1 Принципы действия и структура мультиплексора

#### Принцип действия

Устройство работает следующим образом. Если на вход планарной структуры подсоединить одномодовый световод и подавать по нему оптические сигналы с несколькими спектральными составляющими (на длинах волн  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$ ) в магистральный канал, то в первом фокусирующем элементе, выполняющем роль коллиматора, свет равномерно разделится и будет распространяться по канальным волноводам с разными длинами пробега, отличающимися постоянным интервалом. За счет материальной и волноводной дисперсии разные длины волн достигнут второго фокусирующего элемента с разными фазами. В зависимости от фаз световые пучки разных спектральных составляющих, выходящие из этого фокусирующего элемента, будут интерферировать, и создавать равномерное угловое спектральное распределение, направляя различные спектральные составляющие в разные выходящие каналы. К выходным каналам на торцевом конце

планарного устройства может быть подсоединена линейка фотодиодов или линейка с встроенными стандартными одномодовыми волокнами для транспортировки оптических сигналов на различных длинах волн к оптоэлектронным блокам. Особенностью рассмотренной волноводной структуры является ее обратимость. Она может использоваться как мультиплексор и как демультиплексор. [8]

**Одной из конфигураций AWG** (см. рис. 2.1) – является планарный оптический многопортовый разветвитель в форме таблетки с портом входа  $\lambda_0$  и группой выходных портов  $\lambda_0^o, \lambda_1^o, \dots, \lambda_n^o$ , расположенной симметрично относительно  $\lambda_0$  на периферии волновода слева, и группой внутренних выходных портов  $\lambda_0^i, \lambda_1^i, \dots, \lambda_n^i$ , расположенной симметрично группе выходных портов на периферии справа.

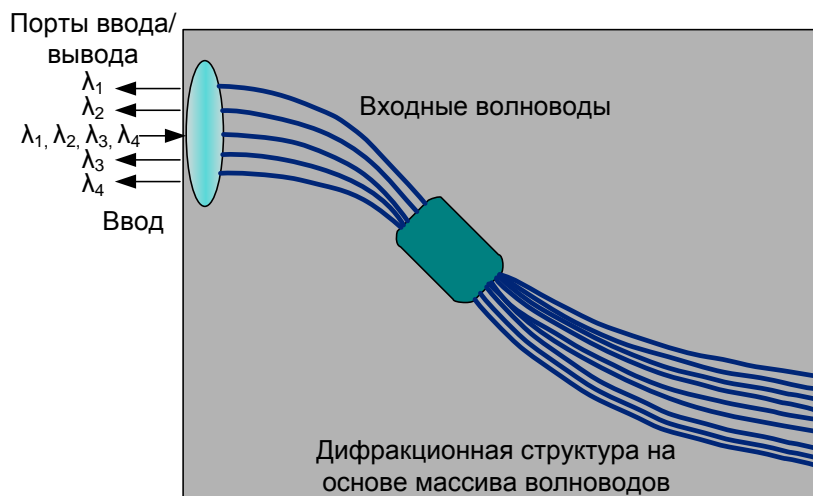


Рис. 2.1 – Многопортовый разветвитель

Внутренние выходные порты соединены через массив световодов с плоским отражающим зеркалом. Входной поток  $\lambda_0 = \sum \lambda_i (i=1, 2, \dots, n)$  подается в оптический волновод и распределяется по всем внутренним портам, откуда он распространяется по массиву световодов (с разным фазовым запаздыванием) до зеркала, отражается и подается со стороны внутренних выходных портов в тот же волновод, где происходит интерференция входной и отраженных волн [9].

**Еще одной конфигурацией планарных дисперсионных устройств**, является устройство с волноводами массива одинаковой длины, но с участками различных замедлений.

**Существует еще одна модификация AWG**, называемая Cross Array Waveguide (XWG) или Crossing Focal Points Waveguide (XFP-WG) (рис.2.2).

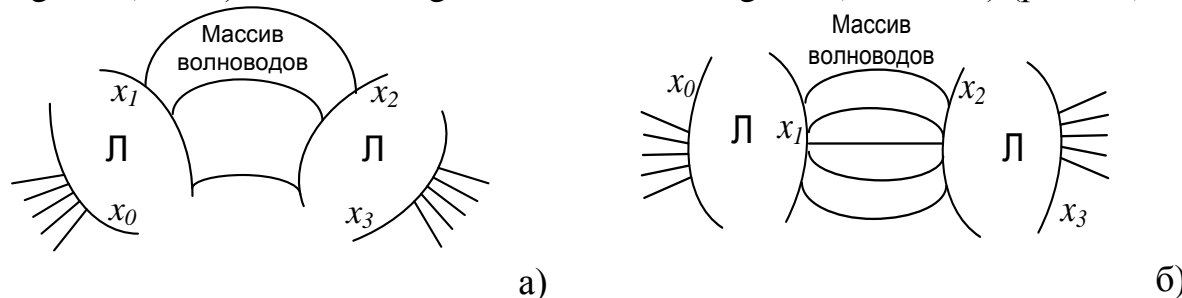


Рис. 2.2 – Конфигурация а) AWG, б) XWG

Ее отличие заключается в том, что у AWG приращение длины  $\Delta l$  между соседними волноводами начинается с нижнего волновода, который имеет наименьшую длину, а у XWG наименьшую длину имеет средний волновод массива, а приращение длины  $\Delta l$  происходит в обе стороны от него, поэтому верхний и нижний крайние волноводы имеют наибольшую длину.

Приведенные выше конфигурации интегрально-оптических решеток на основе массива планарных волноводов, по сути, относятся к одному и тому же устройству (AWG), но с небольшими конструкторскими изменениями.

## 2.2 Математическая модель

### 1 Многопортовый $N \times N$ мультиплексор AWG

Многопортовый  $N \times N$  мультиплексор/демультиплексор AWG осуществляет мультиплексирование или демультиплексирование входного многочастотного информационного сигнала.

Структурная схема многопортового  $N \times N$  мультиплексора AWG изображена на рис. 2.3, где  $i=1..N$  и  $j=1..N$  – номера соответствующих входных и выходных портов;  $[T_{ij}]$  – матрица передачи.

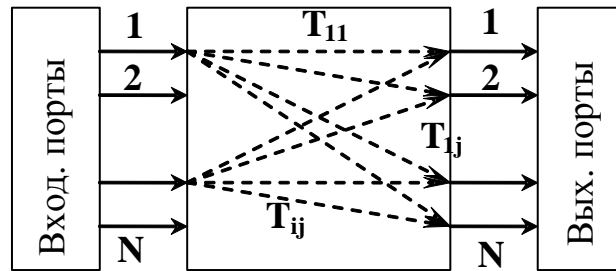


Рисунок 2.3 – Структурная схема AWG

Взаимосвязь входных и выходных сигналов AWG может быть представлена в следующем виде:

$$\begin{bmatrix} E_1^{out}(\omega_1 \dots \omega_k \dots \omega_N) \\ E_2^{out}(\omega_1 \dots \omega_k \dots \omega_N) \\ \vdots \\ E_j^{out}(\omega_1 \dots \omega_k \dots \omega_N) \\ \vdots \\ E_N^{out}(\omega_1 \dots \omega_k \dots \omega_N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & \dots & T_{1j} & \dots & T_{1N} \\ T_{21} & T_{22} & \dots & T_{2j} & \dots & T_{2N} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ T_{i1} & T_{i2} & \dots & T_{ij} & \dots & T_{iN} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ T_{N1} & T_{N2} & \dots & T_{Nj} & \dots & T_{NN} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} E_1^{in}(\omega_1 \dots \omega_k \dots \omega_N) \\ E_2^{in}(\omega_1 \dots \omega_k \dots \omega_N) \\ \vdots \\ E_i^{in}(\omega_1 \dots \omega_k \dots \omega_N) \\ \vdots \\ E_N^{in}(\omega_1 \dots \omega_k \dots \omega_N) \end{bmatrix}, \quad (1.1)$$

где входной и выходной многочастотные информационные сигналы во входных и выходных портах имеют вид:

$$E_i^{in}(\omega_1 \dots \omega_k \dots \omega_N) = \sum_{k=1}^N f_i(\omega_k),$$

$$E_j^{out}(\omega_1 \dots \omega_k \dots \omega_N) = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^N T_{ij}^{\omega_k} \cdot f_i(\omega_k),$$



где  $i$  – номер входного порта,  $j$  – номер выходного порта, а  $k$  – текущий номер частоты, на которой передается информационный сигнал.

Если сигнал есть только на  $i$ -ом входном порте на  $k$ -ой частоте, то выходной сигнал, регистрируемый на  $j$ -ом порте, можно записать:

$$f_j^{out}(\omega_k) = T_{ij}^{\omega_k} \cdot f_i^{in}(\omega_k).$$

Таким образом, задавшись массивом входных сигналов и зная матрицу передачи  $[T_{ij}]$ , можно рассчитать сигнал на выходе мультиплексора AWG. Поэтому для получения массива выходных информационных сигналов, далее рассчитываются элементы  $T_{ij}$ .

## 2 Физическая схема AWG мультиплексора

Для определения элементов  $T_{ij}$  матрицы передачи  $[T_{ij}]$  в (1.1) воспользуемся физической схемой преобразования входного оптического сигнала  $f_{in}$  в AWG, изображенной на рис. 2.4.

AWG состоит из массива волноводов, на концах которого находятся две линзы FPR1 и FPR2, имеющие одинаковые геометрические размеры. В выходной плоскости FPR1 ( $x_1$ ) помещены симметрично относительно оси  $x_1$   $K$  волноводов массива (AW), которые отделены друг от друга на расстояние  $d_w$ . Длины AW отличаются на постоянную величину  $\Delta l$ , которая является равной целому числу ( $m$ -порядок решетки) длин волн устройства ( $\lambda_0$ ) внутри AW. Входные и выходные волноводы находятся в произвольных местах  $d_i$  и  $d_o$  соответственно. Входной, выходной и волноводы массива характеризуются своей мощностью, нормализованной профилем модового поля  $b_i(x)$ ,  $b_o(x)$  и  $b_g(x)$  соответственно.

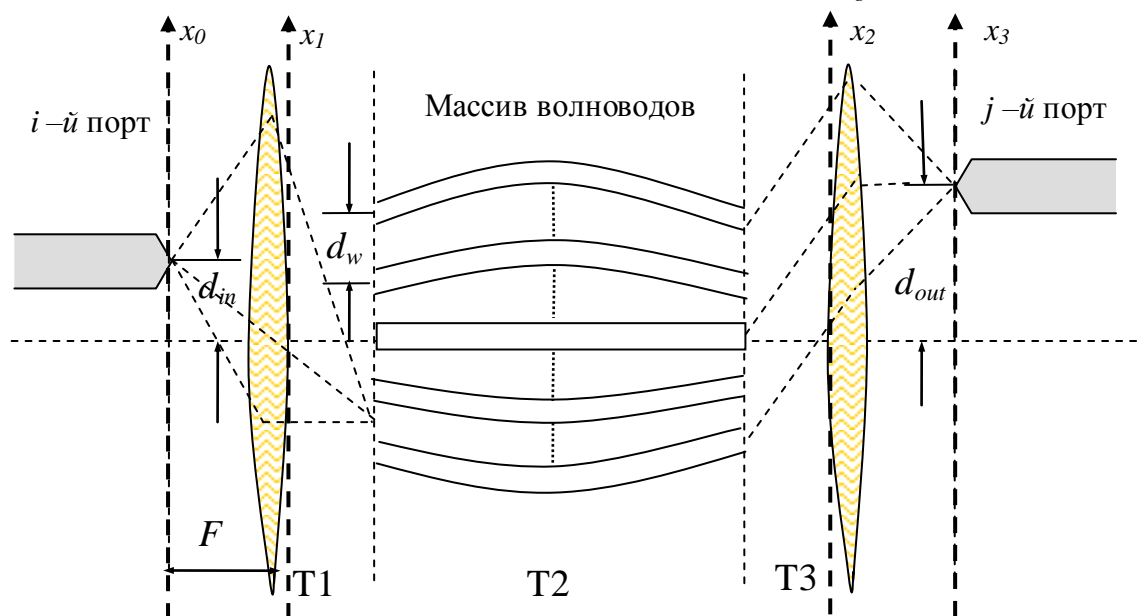


Рисунок 2.4 - Оптическая схема AWG

## 3 Расчет элементов матрицы передачи

В силу линейности рассматриваемой оптической системы AWG, преобразование входного оптического сигнала  $f_{in}$  может быть представлено в виде

последовательности операторов преобразования над ним:

$$[T(f_{in})] = T3 \otimes T2 \otimes T1(f_{in}),$$

где соответствие операторов преобразования  $T1$ ,  $T2$ ,  $T3$  физическому прохождению сигнала  $f_{in}$  через AWG, показано на рис. 2.5.

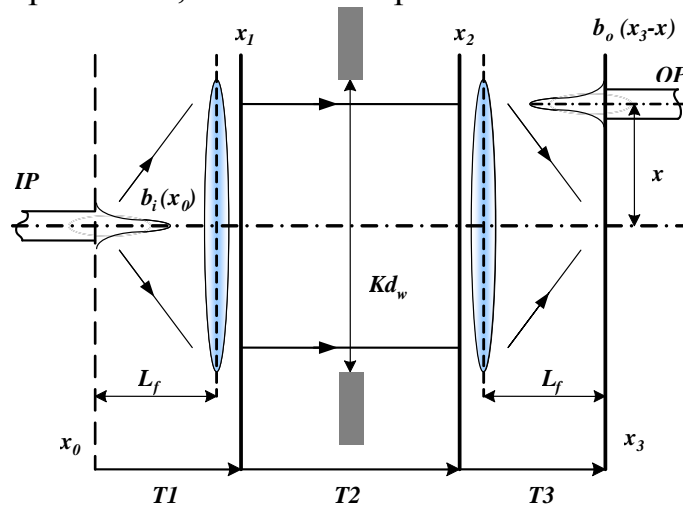


Рисунок 2.5 – Соответствие операторов преобразования физическому прохождению сигнала

Последовательно рассчитывая операторы преобразования, можно проследить прохождение сигнала через элементы устройства AWG, а также рассчитать элементы  $T_{ij}$  матрицы передачи.

Операторы преобразования представим, используя математическую Фурье модель AWG и обозначения [10,11].

### Расчет оператора T1

Оператор  $T1$  преобразует входное поле  $f_{in}$  в поле, находящееся за линзой FPR1 (плоскость  $x_1$  на рис. 1.14) и выполняет следующие действия.

#### Поле в $x_0$

Входное поле во входной плоскости  $f_{in}(x_0, \nu)$  на частоте  $\nu$  может быть написано как:

$$f_{in}(x_0, d_i, \nu) = b_i^\nu(x_0 - d_i),$$

где  $b_i^\nu(x)$  – мощность, нормализующая профиль модового поля входного волновода на частоте  $\nu$ , предполагаемый расположенным симметрично относительно источника, который зависит только от ширины и показателя преломления входного волновода, но не от его положения.

Поскольку мы будем иметь дело только с отдельным частотным возбуждением и чтобы упростить обозначение, устраним частоту  $\nu$  и зависимость полей от положения  $d_i$  и будем использовать их, когда необходимо. Запишем:

$$f_{in}(x_0) = b_i^\nu(x_0 - d_i), \quad (1.2)$$

где  $x$  – переход к новой координате ( $x = x_0 - d_i$ ).

#### Поле $x_1$

Для удобства будем рассматривать поле, которое существует перед плоскостью, (обращаемся к этому как плоскости  $x_1^-$  и к соответствующему полю  $f_i()$ ), и после плоскости (мы обращаемся к этому как плоскости  $x_1^+$  и к соответствующему полю  $f_{1d}()$ ). Это необходимо, так как поле, которое будет рассчитано в плоскости  $x_1^+$ , включает только переданное поле, транспортируемое модами AW. Такая же ситуация будет иметь место и в плоскости  $x_3$ .

Поле, излучаемое в первом FPR в области Фраунгофера (дифракция в дальней зоне) и под параксиальным приближением (лучи, идущие под небольшими углами к оси линзы) и освещающее плоскость  $x_1^-$ , может быть записано как:

$$f_1(x_1) = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} F_{in}^+(f) \Big|_{f = \frac{x_1}{\alpha}} = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} F_{in}^+\left(\frac{x_1}{\alpha}\right), \quad (1.3)$$

где  $F_{in}^+(f)$  – прямое преобразование Фурье входной функции  $f_{in}(x_0)$ , и  $\alpha$  - пространственный частотный фактор, который включает длину волны, фокусное расстояние, и записывается как:

$$\alpha = \frac{\lambda L_f}{n_s},$$

где  $L_f$  - фокусное расстояние, и  $n_s$  - показатель преломления FPR1.

#### Поле $x_1^+$

Поле, освещающее AWs, частично связано с направляемыми модами каждого из волноводов массива. Если связью между волноводами можно пренебречь, то направляемое поле, подводимое к AW, может быть выражено через сумму каждого из индивидуальных направляемых мод:

$$f_{1d}(x_1) = \sum_{r=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} a_r \cdot b_g(x_1 - r \cdot d_w),$$

где  $b_g(x)$  – мощность, нормализующая профиль модового поля любого волновода в массиве, предполагаемый расположенным симметрично относительно источника, и  $a_r$  - коэффициент воздействия на волновод  $r$ , который может быть рассчитан со следующим наложением интеграла:

$$a_r = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(x_1) \cdot b_g(x_1 - r \cdot d_w) dx_1.$$

После математических упрощений, поле в  $x_1^+$  может быть записано как:

$$f_{1d}(x_1) = \sum_{r=-\infty}^{\infty} g_1(r \cdot d_w) \cdot b_g(x_1 - r \cdot d_w) = (g_1(x_1) \cdot \delta_w(x_1)) * b_g(x_1), \quad (1.4)$$

где

$$g_1(x_1) = (f_1(x_1) * b_g(-x_1)) \cdot \Pi\left(\frac{x_1}{K \cdot d_w}\right), \quad (1.5)$$

где  $\Pi()$  - прямоугольная функция окна, определяемая:

$$\Pi\left(\frac{x_1}{K \cdot d_{w1}}\right) = \begin{cases} 1, & \text{si } |x_1| \leq \frac{K \cdot d_{w1}}{2} \\ 0, & \text{si } |x_1| > \frac{K \cdot d_{w1}}{2} \end{cases}.$$

Чтобы получить окончательное выражение для оператора  $T1$ , подставим (1.2) в (1.4), (1.5)

$$f_{1d}(x_1) = \sum_{r=-\infty}^{\infty} g_1(r \cdot d_w) \cdot b_g(x_1 - r \cdot d_w) = \left\{ (F_{in}^+(x_1) * b_g(-x_1)) \cdot \Pi\left(\frac{x_1}{K \cdot d_w}\right) \cdot \delta_\omega(x_1) \right\} * b_g(x_1), \quad (1.6)$$

Таким образом, из формулы (1.6) видно, что оператор  $T1$  преобразует входное поле  $f_{in}$  в поле  $f_{1d}(x_1)$  и учитывает при этом:

- преобразование Фурье  $F_{in}^+(f)$ , которое осуществляет линза;
- функцию осуществления выборки  $\delta_\omega(x_1)$  из-за наличия  $K$  волноводов массива;
- прямоугольную функцию окна  $\Pi()$ , которая является апертурой массива волноводов.

### Расчет оператора $T2$

Оператор  $T2$  производит преобразование поля, прошедшего через массив волноводов  $AW$  (плоскость  $x_2$ ).

#### Поле $x_2$

Пренебрегая затуханием в  $AWs$ , поле на выходе  $AWs$  – это вариант пространственно фазовой модуляции поля на входе. Если длины смежных волноводов отличаются на постоянную целую величину  $\Delta l$ , которая является кратной действующей длине волны в массиве, то есть:

$$\Delta l = \frac{m\lambda_0}{n_c} = \frac{mc}{n_c \nu_0},$$

$$\varphi(x_2, \nu) = \exp \left[ -j2 \cdot \pi \cdot m \left( \frac{\nu}{\nu_0} \right) \cdot \left( \frac{x_2}{d_w} \right) \right],$$

где  $\varphi(x_2, \nu)$  – фазовый набег в каждом волноводе,  $m$ - порядок решетки,  $n_c$  - показатель преломления в волноводах, и  $\nu_0$  - рабочая частота, тогда распространение через  $AW$  может быть смоделировано простым умножением функции:

$$f_2(x_2) = (g_1(x_2) \cdot \delta_\omega(x_2) \cdot \varphi(x_2, \nu)) * b_g(x_2), \quad (1.7)$$

В результате оператор  $T2$  осуществляет преобразование поля на выходе  $AW$  через (1.7).

### Расчет оператора $T3$

Оператор  $T3$  преобразует поле на выходе  $AW$  в поле, находящееся за линзой  $FPR2$  (плоскость  $x_3$ ).

#### Поле $x_3$

Поле в конце  $FPR2$  может теперь быть рассчитано как:

$$f_3(x_3) = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} F_2^+(f) \Big|_{f = \frac{x_3}{\alpha}} = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} F_2^+\left(\frac{x_3}{\alpha}\right), \quad (1.8)$$

где  $F_2^+$  - прямое преобразование Фурье поля  $f_2(x_2)$ .

Проведя математические расчеты и преобразования, в конечном итоге получаем следующее выражение для расчета поля в конце FPR2:

$$f_3(x_3, d_i, \nu) = \frac{1}{d_w} \cdot B_g\left(\frac{d_i}{\alpha}\right) \cdot B_g\left(\frac{x_3}{\alpha}\right) \cdot \sum_{r=-\infty}^{\infty} f_M\left(x_3 + d_i + \frac{m\alpha}{d_w \nu_0} \nu - \frac{r\alpha}{d_w}\right), \quad (1.9)$$

где  $f_M(x_3) = b_i(-x_3) * \left(\frac{K \cdot d_w}{\alpha} \cdot \text{Sinc}\left(\frac{K \cdot d_w}{\alpha} \cdot x_3\right)\right)$ ,

все заглавные буквы функций указывают, что происходит преобразования Фурье соответствующих функций с прописными буквами.

Здесь возвращается полное обозначение  $f_3(x_3, d_i, \nu)$ , чтобы ясно выдвинуть на первый план, что (1.9) дает освещение в плоскости  $x_3$  из-за входного возбуждения, расположенного в положении  $d_i$ , на частоте  $\nu$ .

### Поле $x_3^+$

Наконец, свет, освещающий выходную плоскость FPR<sub>2</sub>, частично соединенный с направляемыми модами волновода на выходе, расположен в положении  $d_0$ . Оно может быть рассчитано через свертку светового поля и выходной мощности нормализованного профиля моды волновода, то есть:

$$f_{3d}(x_3) = f_3(x_3, d_i, \nu) * b_o(x_3 - d_o), \quad (1.10)$$

Таким образом, через выражение (1.10) рассчитывается оператор  $T_3$ , который преобразует поле на выходе AW в поле, находящееся за линзой FPR2 и учитывает при этом:

- преобразование Фурье, которое осуществляет вторая линза;
- положение входных и выходных канальных волноводов;
- частоту, на которой передается сигнал;
- расстояние между соседними волноводами в массиве.

### **Коэффициент передачи**

Последовательно подставляя (1.7) в (1.9), (1.10), получим элементы матрицы передачи  $[T_{ij}]$ :

$$T_{ij}^{\omega_k} \approx \frac{1}{d_w} \cdot B_g\left(\frac{d_i}{\alpha}\right) \cdot B_g\left(\frac{d_0}{\alpha}\right) \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \sum_{r=-\infty}^{\infty} f_M\left(x_3 + d_i + \frac{m\alpha}{d_w \nu_0} \nu - \frac{r\alpha}{d_w}\right) \right\} \cdot b_o(x_3 - d_0) dx_3, \quad (1.11)$$

После применения свойства линейности интеграла к (1.11) мы можем записать результирующее выражение для элементов матрицы передачи  $[T_{ij}]$  следующим образом:

$$T_{ij}^{\omega_k} = \frac{1}{d_w} \cdot B_g\left(\frac{d_i}{\alpha}\right) \cdot B_g\left(\frac{d_0}{\alpha}\right) \cdot \sum_{r=-\infty}^{\infty} q_M\left(d_i + d_0 + \frac{m\alpha}{d_w \nu_0} \nu - \frac{r\alpha}{d_w}\right), \quad (1.12)$$

где

$$q_M(x) = b_0(-x) * f_M(x) = (b_0(-x) * b_i(-x)) * \left( \frac{K \cdot d_w}{\alpha} \cdot \text{Sinc} \left( \frac{K \cdot d_w}{\alpha} \cdot x \right) \right), \quad (1.13)$$

### Приближение Гаусса

Теперь, для упрощения выражений, учтем, что входной пучок имеет гауссово распределение модового профиля, с радиусом модового профиля  $\omega_i$ ,  $\omega_0$ ,  $\omega_g$ . В этой ситуации выражения (1.12), (1.13) могут быть упрощены до следующих окончательных выражений:

$$T_{ij}^{\omega_k} = \sqrt{2\pi} \frac{\omega_{in}}{d_w} \exp \left\{ - \left( \frac{\pi \omega_{in}}{\alpha} \right)^2 (d_{in}^2 + d_{out}^2) \right\} \cdot \sum_{r=-\infty}^{\infty} q_M \left( d_{in} + d_{out} + \frac{m\alpha}{d_w v_0} v - \frac{r\alpha}{d_w} \right), \quad (1.14)$$

$$q_M(x) = \exp \left( - \left( \frac{x}{\sqrt{2}\omega_i} \right)^2 \right) \cdot \text{Real} \left\{ \text{erf} \left( \frac{\pi K d_w \omega_i}{\sqrt{2}\alpha} + j \frac{x}{\sqrt{2}\omega_i} \right) \right\}$$

Учтя центральное расположение входного информационного потока ( $d_{in}=0$ ), получаем:

$$T_{ij}^{\omega_k} = \sqrt{2\pi} \frac{\omega_{in}}{d_w} \exp \left\{ - \left( \frac{\pi \omega_{in}}{\alpha} d_{out} \right)^2 \right\} \cdot \sum_{r=-K/2}^{K/2} q_M \left( d_{out} + \frac{m\alpha}{d_w v_0} v - \frac{r\alpha}{d_w} \right), \quad (1.15)$$

### 2.3 Расчет основных оценочных характеристик

Прежде, чем начинать моделировать AWG мультиплексор на компьютере, необходимо знать некоторые основные конструктивные параметры устройства:

- рабочую длину волны  $\lambda_0$ ;
- расстояние между волноводами в массиве  $d_w$ ;
- число волноводов в массиве  $K$ ;
- фокусное расстояние  $L_f$ ;
- пространственно частотный фактор  $\alpha$ ;
- дифракционный порядок  $m$ ;
- разница длин волноводов  $\Delta l$ ;

Для оценки основных конструктивных параметров устройства необходимо знать:

- число каналов  $N$ ;
- канальный интервал  $\Delta \lambda$ ;
- эффективные показатели преломления сердцевины и оболочки  $n_c$  и  $n_0$  подложки, и материала линзы  $n_g$ .
- радиусы модовых полей входных, выходных и волноводов массива  $\omega_i$ ,  $\omega_0$  и  $\omega_g$  соответственно.

### Канальный интервал и число портов

Канальный интервал длины волны  $\Delta\lambda$  и число каналов длины волны  $N$  - наиболее важные параметры для проектирования AWG мультиплексора. Обычно канальный интервал длины волны  $\Delta\lambda$  выбирается согласно ITU - сетки 50 GHz, 100 GHz, или 200 GHz (См. прил. А).

### Свободный спектральный диапазон и дифракционный порядок

После получения сведений о величине канального интервала  $\Delta\lambda$  и числа каналов длин волн  $N$ , можно рассчитать свободный спектральный диапазон  $\Delta\lambda_{FSR}$ :

$$\Delta\lambda_{FSR} = N\Delta\lambda, \quad (1.16)$$

и дифракционный порядок  $m$ :

$$\begin{aligned} m &\leq n_c \lambda_0 / [n_c N \Delta\lambda] \\ m &= \text{floor} \left( \frac{\lambda_0}{\Delta\lambda_{FSR}} \right), \end{aligned} \quad (1.17)$$

### Различие длины $\Delta l$ волноводов массива

Различие длины  $\Delta l$  между соседними волноводами массива рассчитывается:

$$\Delta l = m \frac{\lambda_0}{n_c}, \quad (1.18)$$

### Фокусное расстояние $L_f$

Фокусное расстояние линзы  $L_f$  можно определить по следующей формуле:

$$L_f = \frac{D \cdot d}{\lambda_0 \cdot C}, \quad (1.19)$$

где  $C = (0,8 \dots 1,2)$  – коэффициент, учитывающий то, что сигнал имеет распределение Гаусса; (рек  $C = 1$ )

$D$  – диаметр выходного пучка (за линзой);  $D = Kd_w$

$d$  – диаметр входного пучка (перед линзой);  $d = 2\omega_i$

$\lambda$  – длина волны входного сигнала

### Число волноводов в массиве

Число волноводов массива  $K$  - не доминирующий параметр устройства AWG, потому что  $\Delta\lambda$  и  $N$  не зависят от него. Величина  $K$  выбирается из условия, чтобы свет, дифрагированный в свободную спектральную область, был собран апертурой массива. Как правило, это число должно быть больше, чем в 2-3 раза дифракционного порядка.

$$K = (2-3) \cdot m \quad (\text{рек. } K = 2.3 \cdot m), \quad (1.20)$$

### Расчет переходной помехи

Переходная помеха на канал  $j$  может быть рассчитана из следующей формуле:

$$P_j = \sum_{i=1, i \neq j}^N |T_i|^2 / |T_j|^2 \quad (1.21)$$

### 3 Рекомендации по выполнению работы

#### 3.1 Расчетное задание

Для выполнения лабораторных работ необходимо рассчитать основные конструктивные параметры демультиплексора AWG ( $\lambda_0, d_w; K, L_f; \alpha; m, \Delta l$ ). Данные параметры могут быть рассчитаны по формулам из п 2.3.

Исходные данные для выполнения работы берутся из табл.2.1 согласно определенного преподавателем варианта.

Таблица 2.1 – Исходные данные для выполнения работы

Параметры	Вариант				
	1	2	3	4	5
Диапазон:	192,1 ТГц – 194,6 ТГц	194,1 ТГц – 196,1 ТГц	192,5 ТГц – 196,1 ТГц	192,1 ТГц – 196,1 ТГц	192,9 ТГц – 195,9 ТГц
Кан. интервал ГГц:	100	200	100	200	100
Параметры	Вариант				
	6	7	8	9	10
Диапазон:	193,7 ТГц – 195,3 ТГц	192,2 ТГц – 195,4 ТГц	192,5 ТГц – 195,7 ТГц	193,6 ТГц – 195,7 ТГц	193,5 ТГц – 192,7 ТГц
Кан. интервал (ГГц):	50	100	100	50	100
Параметры	Вариант				
	11	12	13	14	15
Диапазон:	195,2 ТГц – 196,9 ТГц	194,5 ТГц – 196,5 ТГц	194,7 ТГц – 196,3 ТГц	195,2 ТГц – 196,8 ТГц	193,1 ТГц – 196,7 ТГц
Кан. интервал (ГГц):	100	100	100	200	100

Внешние параметры:  $\omega_i = \omega_g = \omega_0 = 7.16$  мкм.

Материальные параметры:  $n_c = 1.454, n_0 = 1.451, n_s = 1.453$ .

Далее необходимо ввести данные параметры в соответствующие поля программного обеспечения.

#### 3.2 Экспериментальное задание

##### 1 Исследовать одиночный канал

1.1 Выбрать произвольный канал (например центральный канал 0), в соответствии с описанием ПО.



- 1.2 Определить неоднородность вносимых потерь одного канала.
- 1.3 Найти полосу пропускания одного канала на уровне -3 и -20дБ.
- 1.4 Исследовать зависимость вносимых потерь от длины волны канала.

**2. На одной из частот оптического диапазона исследовать влияние конструктивных параметров ( $K$ ,  $d_w$ ,  $L_f$ ,  $m$ ) на:**

- коэффициент передачи;
- положение выходного порта  $d_0$ ;
- полосу пропускания на уровне -20 дБ.

- 2.1 Исследовать влияние  $K$  на вышеизложенные параметры.
- 2.2 Исследовать влияние  $d_w$  на вышеизложенные параметры.
- 2.3 Исследовать влияние  $L_f$  на вышеизложенные параметры.
- 2.4 Исследовать влияние  $m$  на вышеизложенные параметры.

**3. Исследовать совокупность каналов**

- 3.1 Привести суммарное поле на выходе, определить положение выходных портов.
- 3.2 Исследовать зависимость переходных помех от номера каналов.

**4. Содержание отчета**

Отчет о проделанной работе должен содержать следующие разделы:

- 1 Цель работы;
- 2 Краткая теория;
- 3 Результаты работы – графики зависимостей с краткими пояснениями;
- 4 Таблица и график переходных помех;
- 5 Выводы по проделанной работе.

**5. Контрольные вопросы**

1. Какие межканальные интервалы соответствуют DWDM стандарту?
2. Какие виды оптических демультиплексоров вы знаете?
3. Какие основные параметры демультиплексоров и требования к ним вы знаете?
4. Какие основные параметры разработанных AWG мультиплексоров вам известны?
5. Назовите основные структурные схемы демультиплексора AWG и их отличия?
6. Поясните принцип работы демультиплексора AWG?
7. На чем основана математическая модель AWG мультиплексора?
8. Какое влияние оказывают на выходной сигнал основные конструктивные параметры AWG?
9. Какие достоинства и недостатки AWG по сравнению с другими видами оптических мультиплексоров?

## Приложение Б

### Описание программного обеспечения [14]

#### Компьютерная лабораторная работа «Исследование оптического мультиплексора на основе массива планарных волноводов»

Руководство пользователя  
(Редакция от 16.10.2006)

#### 1. Общее описание

##### 1.1 Функциональное назначение системы, область применения и ограничения

Работа предназначена для проведения лабораторной работы у студентов пятого курса специальности 201410 по курсу «Мультиплексорное оборудование оптических цифровых систем связи».

Компьютерная лабораторная работа «Компьютерное исследование оптического мультиплексора на основе массива планарных волноводов» предназначена для расчета и оптимизации характеристик оптического мультиплексора на основе массива планарных волноводов (AWG) в учебных целях. Данная разработка может быть использована при обучении студентов технических вузов по направлениям «Оптика и телекоммуникации», как в качестве лабораторной работы, так и инструмента для расчета и оптимизации AWG мультиплексоров при курсовом проектировании волоконно-оптических систем передачи со спектральным разделением (ВОСП-СП), использующих AWG мультиплексоры в качестве одного из основных элементов.

Программное обеспечение представляет собой пакет программ генерации форм для задания параметров AWG, отображения результатов расчета, вывода методического пособия и описания программного обеспечения с гипертекстовой навигацией. Пакет включает 15 вариантов заданий для проведения лабораторных работ, а также прикладные программы по проведению необходимых вычислений, предусматривающих численный расчет интегральных преобразований, описывающих волновые процессы (дифракцию и интерференцию) на AWG мультиплексоре. В основу расчетов положена улучшенная математическая модель Фурье для расчета на AWG мультиплексоре [2]. Одним из ограничений модели является отсутствие учета неодинаковости профилей входных, выходных волноводов в массиве модовых полей. В работе [3] и в методическом пособии [4] приведена математическая модель, положенная в основу программного обеспечения. Описание программного обеспечения и результаты тестирования компьютерной лабораторной работы представлены ниже в [4].

1) Андре Жирар. Руководство по технологии и тестированию систем WDM. – М.: EXFO, 2001. / Пер. с англ. под ред. А. М. Бродниковского, Р. Р. Убайдуллаева, А. В. Шмалько.

2) Molina-Fernández, Wangüemert-Pérez J.G. Improved AWG Fourier optics model// Opt. Express.-2004.-Vol.12.-P. 4804-4821.

3) Лялюк А.П., Шарангович С.Н. Анализ оптического мультиплексора на основе массива планарных волноводов (AWG)// Сб. науч. трудов Всероссийской науч.-технич. конф. «Научная сессия ТУСУР-2005». Часть 3. –Томск: Томск. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2005. – С.323-326.

4) Лялюк А.П., Шарангович С.Н. Компьютерное исследование оптического мультиплексора на основе массива планарных волноводов (AWG)// Рук-во к лаб. раб-м по курсу “Мультиплексорное оборудование оптических цифровых систем связи». -Томск, ТУСУР . -2005. -39 с.

Оболочка моделирования построена по модальному принципу и предусматривает последовательное разворачивание справочных, расчетных и графических окон. При этом предусмотрена регистрация студента и преподавателя для заполнения форм отчета, генерируемого по окончании работы в MS Word. Также можно выбрать вариант и номер стартового пункта работы. Всего работа содержит 15 вариантов заданий по 7 пунктов. Для осуществления допуска предусмотрен автоматический тестовый контроль, выполняемый в отдельном окне.

В соответствии с выполняемым пунктом задания, текст которого загружается при выборе варианта и номера пункта автоматически, исполнителю необходимо ввести исходные параметры:

11) информационных сигналов:  
– число оптических каналов (1-150);  
– частота центрального канала (длина волны 1400нм - 1600нм);  
– канальный интервал между соседними каналами, предусмотрено использование разных межканальных интервалов, установка длин волн для каждого канала самостоятельно, использование стандартизованных WDM частотных планов с шагом 1000 ГГц – 50 ГГц;

12) кристаллической подложки AWG: показатели преломления сердцевины волноводов, оболочки волноводов, линзы;

13) характерных геометрических размеров элементов AWG: поперечное расстояние между соседними волноводами , , радиусы входного модового поля и поля в волноводах, положение входного волновода;

14) массива волноводов и линзовых систем: разница длин между двумя соседними волноводами в массиве, число волноводов в массиве, фокусные расстояния входной и выходной линз.

Для заданных параметров производится расчет следующих характеристик AWG мультиплексора, выводимых в графической форме:

10) коэффициент передачи и вносимое затухание между любой парой входных – выходных портов мультиплексора;

11) распределение выходного поля при заданном расположении входного порта;

- 12) частотная зависимость выходного поля в любой точке выхода;
- 13) ширина полосы пропускания для любого канала;
- 14) переходные помехи между каналами.

В ходе расчета возможно схематичное геометрическое изображение устройства AWG и построение цветовой картины распределения поля в любой точке между входными и выходными портами.

Также в сводной таблице приведены параметры для каждого выходного порта: центральная частота волны, коэффициент передачи и геометрическое положение.

Пакет программ также позволяет осуществить оптимизацию внутренних параметров AWG, таких как количество волноводов в мультиплексоре, фокусное расстояние линз для заданных параметров разнесения каналов и уровней перекрестных помех.

По результатам расчета заполняются таблицы с информацией, требуемой в задании к выполняемому пункту. После выполнения пункта программа строит необходимые графики в отдельном окне, где также есть возможность для записи выводов по проделанному пункту и перехода к выполнению следующего пункта.

При возвращении к выполнению пункта, который был уже сделан, данные в таблицах с информацией, требуемой в задании к этому пункту, и выводы по нему сохраняются в последней редакции исполнителя. В конце работы генерируется отчет со всей необходимой информацией о выполнении работы

Программное обеспечение предназначено для студентов технических вузов по направлениям «Оптика и телекоммуникации» при проведении лабораторных работ по данным направлениям, аспирантов и инженерных работников, занимающихся исследованием оптических мультиплексоров.

Программное обеспечение выполнено в среде разработки DELPHI 7.0. Программа может быть использована как одним пользователем для самостоятельного изучения, так и для использования в учебной аудитории при множественном одновременном доступе.


## **1.2 Краткое описание системы и ее технические характеристики**

Компьютерная лабораторная работа, далее программа, представляет собой компьютерную программу, которая состоит из методического пособия (краткая теория с заданием на работу) и оболочки моделирования. Программа может функционировать под управлением операционных систем Windows 98, 2000, XP, Vista. Для нормального функционирования программы компьютер должен быть оснащен не менее чем 256 Мбайтами оперативной памяти и не менее чем 100 Мбайтами свободного места на жестком диске. Сама программа занимает около 20 Мбайт дисковой памяти. Установки программа не требует.

## **1.3 Запуск программы и выход из программы**

Запуск программы осуществляется запуском файла AWG.exe, данный файл расположен в папке AWG. Запуск возможен также выбором пункта «За-

пуск» в пункте «AWG» меню программы. После запуска на экране компьютера появляется главное окно «AWG», содержащее все пункты лабораторной работы.

Выход из программы осуществляется нажатием кнопки  в верхнем правом углу окна «Главное».

## 2 Работа с программой

В дальнейшем предполагается, что пользователь имеет определенные навыки работы в операционной системе Windows 95 или Windows 98.

При работе с программой для перемещения между полями ввода, и нажатий на кнопки удобней всего использовать манипулятор "мышь".

Некоторые окна программы являются модальными, это означает, что пункты главного меню и другие окна будут недоступны, пока не будет закрыто текущее активное окно. Для закрытия окон используйте кнопку **Заккрыть**.

### 2.1 Главное окно

При запуске программы AWG автоматически отображается главное окно. Интерфейс окна приведен на рисунке 2.1.

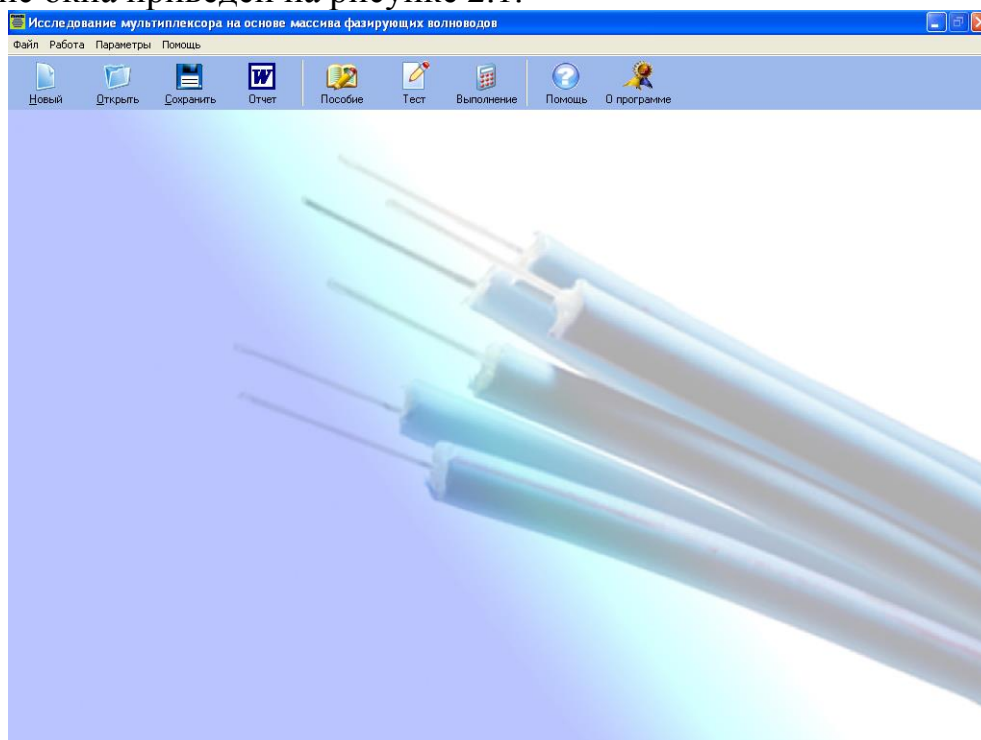


Рисунок 2.1 – Главное окно

На рис. 2.2 приведен вид верхней части окна, которая на протяжении всей работы находится в верхней части, вне зависимости от того в каком окне происходит выполнение работы.

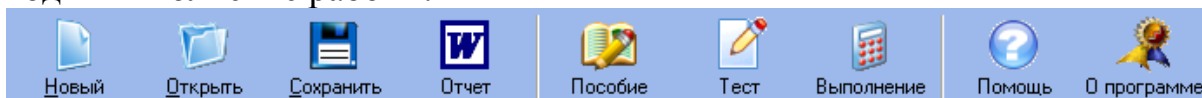
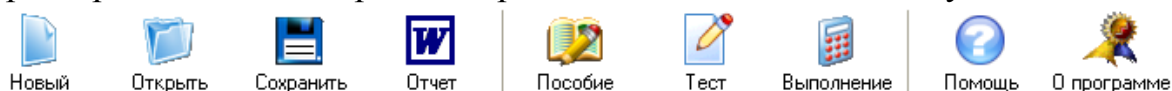


Рисунок 2.2 – Меню и управляющие кнопки

Данное окно является исходным местом старта любого пункта лабораторной работы. Рассмотрим содержимое главного меню по пунктам:



1 «**Новый**» вызывает заполнение всех параметров расчета параметрами по умолчанию.

2 «**Открыть**» вызывает диалог открытия сохраненных параметров пользователя.

3 «**Сохранить**» вызывает диалог сохранения параметров пользователя.

4 «**Отчет**» генерирует отчет по проделанной работе в MS Word.

5 «**Пособие**» вызывает методическое пособие по лабораторной работе.

6 «**Тест**» вызывает тестовое окно, где пользователь имеет возможность проверить свои знания.

7 «**Выполнение**» вызывает пункты программы, выполнение которых предусмотрено заданием.

8 «**Помощь**» генерирует помощь по пользованию программой.

9 «**О программе**» вызывает окно с разработчиками программного обеспечения.

## 2.2 Работа с окном «Новый»

Данное окно предназначено для заполнения вкладки параметров параметрами по умолчанию. По умолчанию выбирается 16 канальный MUX чо 100 ГГц диапазоном.

## 2.3 Работа с окном «Открыть»

После нажатия кнопки «**Открыть**» открываются пользовательские параметры. Параметры находятся в файлах с расширением «*ini*».

## 2.4 Работа с окном «Сохранить»

Сохраняет пользовательские параметры в *ini* файл.

## 2.5 Работа с окном «Отчет»

Окно предназначено для генерирования отчета в текстовом процессоре Word. **Следует помнить**, что генерация отчета происходит после выполнения основной части лабораторной работы.

## 2.6 Работа с окном «Пособие»

Данная кнопка вызывает методическое пособие по выполнению лабораторной работы в электронном виде.

## 2.7 Работа с окном «Тест»

Данная кнопка вызывает тестирование по пройденному материалу (Рис. 2.3).

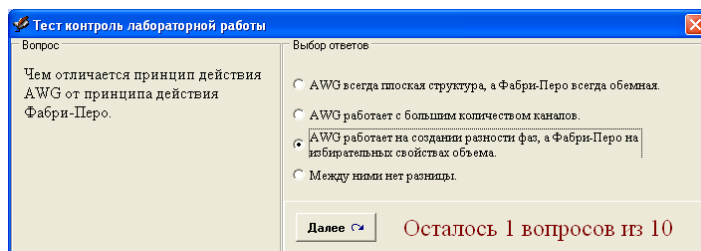
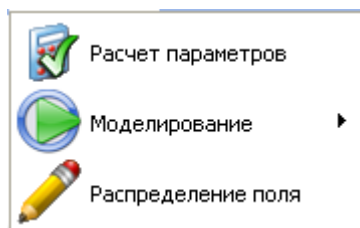


Рисунок 2.3 Вид окна «Тестирование»

После выбора правильного ответа на каждый из десяти предложенных вопросов необходимо нажать кнопку «Далее». После прохождения тестирования выдается результат с рекомендацией.

## 2.8 Работа с окном «Выполнение»



Присутствуют следующие пункты:

**«Расчет параметров»,  
«Моделирование»,  
«Распределение поля»;**

Рассмотрим их назначение

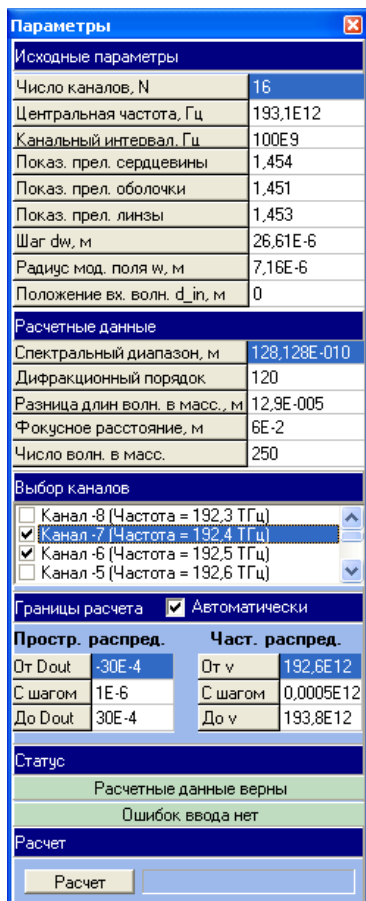
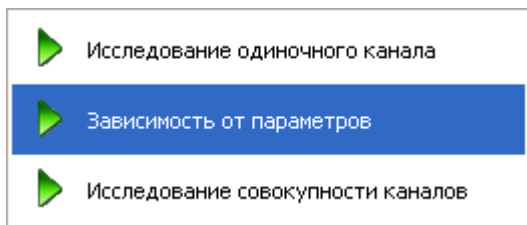


Рисунок 2.4

«Расчет параметров» вызывает окно расчета параметров: (Рис.2.4)

Здесь, «Исходные параметры» предназначены для ввода исходных параметров., «Расчетные параметры» предназначены для ввода требуемых по расчету параметров. Если при вводе параметров допущена ошибка ввода, либо параметры рассчитаны неверно, то загораются красным соответствующие панели в «статус». В «выбор каналов» производится выбор каналов, подлежащих расчету. В «Границы расчета» выставляются границы расчета в пространственной и временной областях. При постановке галочки «Автоматически» эти параметры вычисляются автоматически. Для расчета любого пункта необходимо нажать кнопку «Расчет» при включенном окне этого пункта.

«Моделирование» предназначено для моделирования основных характеристик AWG мультиплексора.



Это такие пункты:

«Исследование одиночного канала»,  
 «Зависимость от параметров»,  
 «Исследование совокупности каналов».

Рассмотрим их:

«Исследование одиночного канала»

Предназначено для исследования одиночного канала, его полосы пропускания, положения выходного порта, коэффициента передачи и вносимых потерь. Вид окна показан на рисунке 2.5.



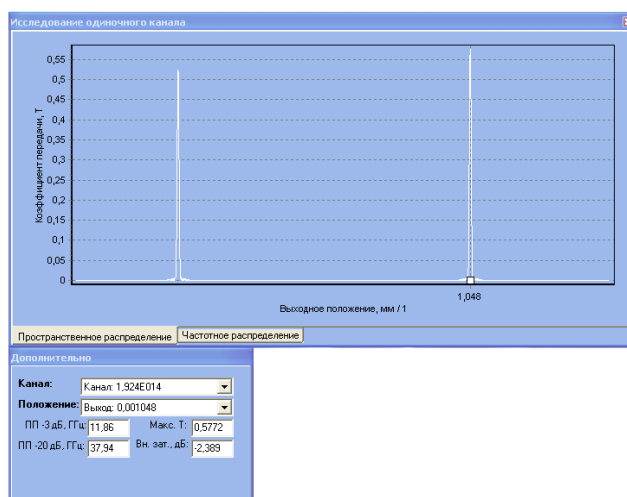


Рисунок 2.5 Вид окна «Исследование одиночного канала»

После расчета, в соответствии с панелью «**Параметры**» выбор канала осуществляется с помощью выпадающего списка «**Канал**». При этом параметры этого канала отображаются в текстовых полях. Переключение между пространственным и частотным распределением осуществляется вкладками «**Пространственное распределение**» и «**Частотное распределение**». Двойным щелчком по графику либо нажатием соответствующей кнопки в меню «**Параметры**» осуществляется переключение к виду в дБ. Нажатием кнопки «**Параметры/Показывать метки максимумов**» включаются/отключаются метки максимумов.

### «Зависимость от параметров»

Предназначено для влияния конструктивных параметров на одиночный канал, его полосы пропускания, положения выходного порта, коэффициента передачи и вносимых потерь. Вид окна показан на рисунке 2.6.

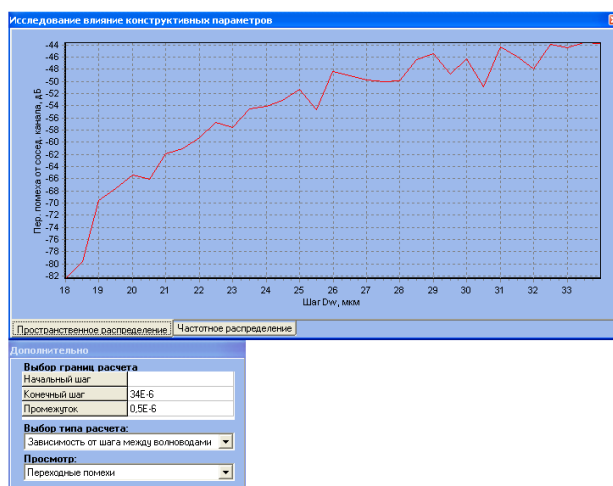


Рисунок 2.6 Вид окна «Исследование зависимости от параметров»

Для расчета необходимо выбрать тип расчета в списке «**Тип расчета**». После расчета, в соответствии с панелью «**Параметры**», различные зависимости выбираются путем выбора в поле «**Просмотр**». Переключение между пространственными и частотными зависимостями осуществляется вкладками «**Пространственное распределение**» и «**Частотное распределение**». Если на

графиках видна угловатость, как показано на рисунке 2.6, либо странное поведение кривых необходимо уменьшить шаг расчета в параметрах.

### «Исследование совокупности каналов»

Предназначено для исследования совокупности каналов. Окно изображено на рис. 2.7.

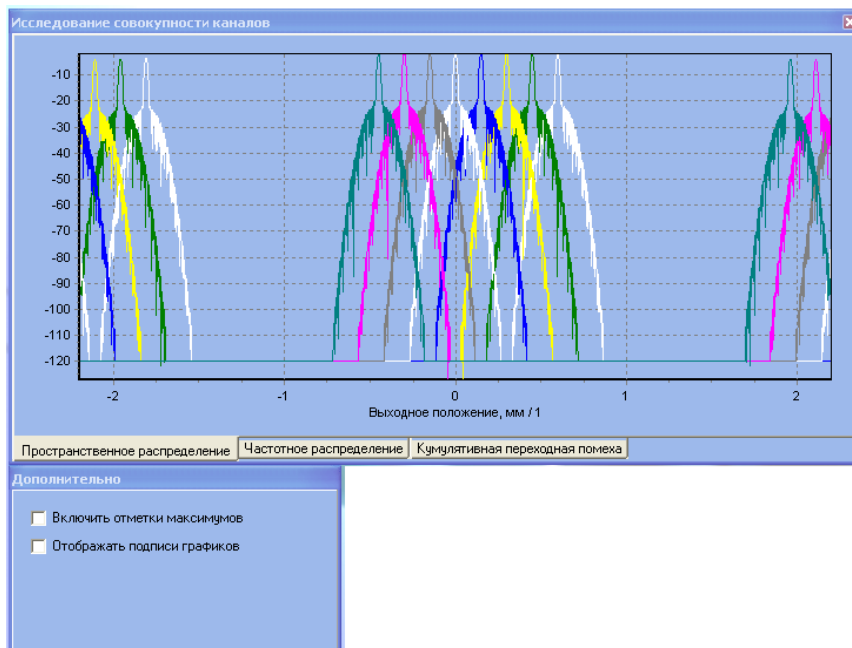


Рисунок 2.7 Вид окна «Исследование совокупности каналов»

После расчета переключение между пространственным, частотным распределениями и кумулятивной помехой осуществляется выбором соответствующих вкладок.

### «Распределение поля»

Предназначено для получения детального распределения поля в плоскости мультиплекса. После выбора ширины, высоты и масштаба в соответствующих полях и нажатия кнопки «Расчет картинка появляется на экране». Окно изображено на рис. 2.8.

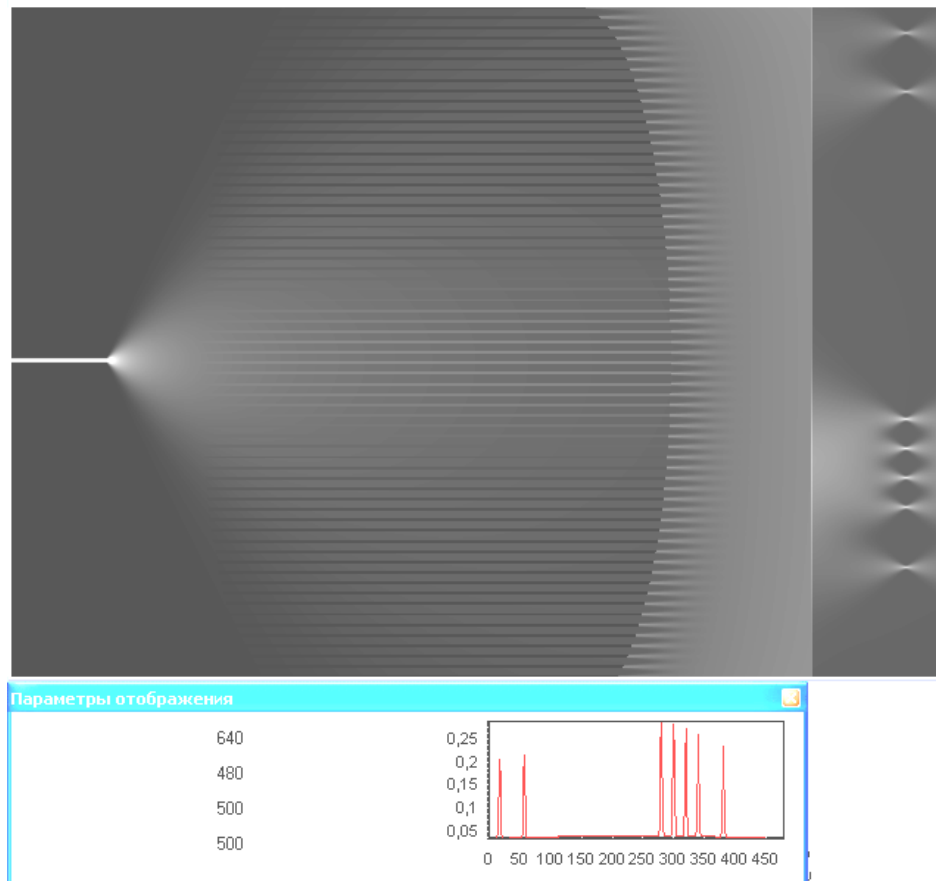


Рисунок 2.8 Вид окна «Распределение поля»

## 2.9 Работа с окном «Помощь»

Окно предназначено для генерации руководства пользователя по пользованию программой

## 2.10 Работа с окном «О программе»

Окно предназначено для получения информации о разработчиках программы.

## 2.11. Работа с окном «Параметры»

Предназначено для отображения и выбора следующих параметров.

**«В децибелах»** - включает/выключает отображение графиков в децибелах.

**«Автоматический расчет границ»** - включает/выключает автоматический расчет границ.

**«Показывать метки максимумов»** - включает/выключает отображение меток максимумов.

## Список литературы

1. Заславский К.Е. Волоконно-оптические системы передачи со спектральным уплотнением: Учебное пособие для вузов. - Новосибирск: СибГУТИ, 2005. – 136 с.
2. Шарангович, С. Н. Мультиплексорное и усилительное оборудование многоволновых оптических систем связи: Учебное пособие [Электронный ресурс] / С. Н. Шарангович. — Томск: ТУСУР, 2022. — 155 с. — Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/10054> (дата обращения 18.09.2022).
3. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи (4-е, дополненное издание)- М. : Эко-Тренд. 2007. -512 с..
4. Фокин В.Г. Оптические системы передачи и транспортные сети. Учебное пособие .- М.: Эко-Трендз, 2008. -288 с.
5. Скляр О К. Волоконно-оптические сети и системы связи. Учебное пособие.- С-Пб : Лань, 2010. – 272 с.
6. Наний О.Е. Основы технологии спектрального мультиплексирования каналов передачи// Lightwave Russian Edition. – 2004. - № 12. – с. 47-52.
7. Слепов Н. Н. Оптические мультиплексоры и демуплексоры систем WDM // Электроника, Наука, Технология, Бизнес, 6.2006
8. Иванов А.Б. ВОЛОКОННАЯ ОПТИКА: компоненты, системы передач, измерения. — М.: Компания САЙРУС СИСТЕМС, 1999. — 672 с.
9. Берикашвили В.Ш, Засовин З.А, Соколов А.В. Базовые элементы высокоскоростных волоконно-оптических систем связи со спектральным уплотнением каналов// Радиотехника – 2004. - № 12. – с. 31 – 38.
10. Pascual Munoz, Daniel Pastor, Jose Capmany. The cross waveguide grating: proposal, theory and applications// Opt. Express.-2005.-Vol.13., № 8 – P. 2961-2968.
11. Molina-Fernández, Wangüemert-Pérez J.G. Improved AWG Fourier optics model// Opt. Express.-2004.-Vol.12.–P. 4804-4821.
12. Apollo Photonics. APSS Apollo Application Note on Array Waveguide Grating (AWG) Design, simulation and layout APN – APSS – AWG.// — Режим доступа: [www.apollophotonics.com](http://www.apollophotonics.com). (дата обращения 18.09.2022).
13. РД 45.286-2002. Руководящий документ отрасли аппаратура волоконно-оптической системы передачи со спектральным разделением. Технические требования.
14. Лялюк А.П., Миргород В.Г., Шарангович С.Н. Свидетельство №5495 об отраслевой регистрации разработки «Компьютерная лабораторная работа «Исследование оптического мультиплексора на основе массива планарных волноводов» в «Отраслевом фонде алгоритмов и программ» от 20.12.2005. Москва. - М.: ВНИИЦ, 2005. - № 50200501791.

## Приложение А

### Частотный план ITU-T

Таблица 1 Частотный план WDM по рекомендации МСЭ-Т G.692

Частота, ТГц	Интервал, ГГц						Длина волны, нм
	100	200	400	500	600	1000	
196,1	●	●	●		●		1528,77
196,0	●						1529,55
195,9	●	●					1530,33
195,8	●			●			1531,12
195,7	●	●	●				1531,90
195,6	●						1532,68
195,5	●	●			●	●	1533,47
195,4	●						1534,25
195,3	●	●	●	●			1535,04
195,2	●						1535,82
195,1	●	●					1536,61
195,0	●						1537,40
194,9	●	●	●		●		1538,19
194,8	●			●			1538,98
194,7	●	●					1539,77
194,6	●						1540,56
194,5	●	●	●			●	1541,35
194,4	●						1542,14
194,3	●	●		●	●		1542,94
194,2	●						1543,73
194,1	●	●	●				1544,53
194,0	●						1545,32
193,9	●	●		●			1546,12
193,8	●						1546,92
193,7	●	●	●		●		1547,72
193,6	●						1548,51
193,5	●	●				●	1549,32
193,4	●			●			1550,12
193,3	●	●	●				1550,92
193,2	●						1551,72
193,1	●	●			●		1552,52
193,0	●			●			1553,33
192,9	●	●	●				1554,13
192,8	●						1554,94
192,7	●	●					1555,75

192,6	●						1556,55
192,5	●	●	●	●	●	●	1557,36
194,4	●						1558,17
192,3	●	●					1558,98
192,2	●						1559,79
192,1	●	●	●	●			1560,61

**Таблица 2 Частотный план DWDM по рекомендации МСЭ-Т G.694.1**

Номинальная центральная частота, ТГц Частотный интервал между каналами, ГГц				Номинальное значение длины волны, нм
12,5 (1)	25 (2)	50 (3)	100 (4)	
195.9375	–	–	–	1530.04
195.9250	195.925	–	–	1530.14
195.9125	–	–	–	1530.24
195.9000	195.900	195.90	195.9	1530.33
195.8875	–	–	–	1530.43
195.8750	195.875	–	–	1530.53
195.8625	–	–	–	1530.63
195.8500	195.850	195.85	–	1530.72
195.8375	–	–	–	1530.82
195.8250	195.825	–	–	1530.92
195.8125	–	–	–	1531.02
195.8000	195.800	195.80	195.8	1531.12
195.7875	–	–	–	1531.21
195.7750	195.775	–	–	1531.31
195.7625	–	–	–	1531.41
195.7500	195.750	195.75	–	1531.51
195.7375	–	–	–	1531.60
195.7250	195.725	–	–	1531.70
195.7125	–	–	–	1531.80
195.7000	195.700	195.70	195.7	1531.90
195.6875	–	–	–	1532.00
195.6750	195.675	–	–	1532.09
195.6625	–	–	–	1532.19

Номинальная центральная частота, ТГц Частотный интервал между каналами, ГГц				Номинальное значение длины волны, нм
12,5 (1)	25 (2)	50 (3)	100 (4)	
□	□	□	□	□
193.1375	–	–	–	1552.22
193.1250	193.125	–	–	1552.32
193.1125	–	–	–	1552.42
193.1000	193.100	193.10	193.1	1552.52
193.0875	–	–	–	1552.62
193.0750	193.075	–	–	1552.73
193.0625	–	–	–	1552.83
193.0500	193.050	193.05	–	1552.93
193.0375	–	–	–	1553.03
193.0250	193.025	–	–	1553.13
193.0125	–	–	–	1553.23
193.0000	193.000	193.00	193.0	1553.33
192.9875	–	–	–	1553.43
192.9750	192.975	–	–	1553.53
192.9625	–	–	–	1553.63
□	□	□	□	□
184.7750	184.775	–	–	1622.47
184.7625	–	–	–	1622.58
184.7500	184.750	184.75	–	1622.69

**Таблица 3 Частотный план CWDM по рекомендации МСЭ-Т G.694.2**

Номинальное значение длины волны, нм Интервал между каналами 20 нм	Номинальная центральная частота, ТГц
1270	236.057
1290	232.397
1310	228.849
1330	225.407
1350	222.068
1370	218.826
1390	215.678
1410	212.618
1430	209.645
1450	206.753
1470	203.940
1490	201.202
1510	198.538
1530	195.942
1550	193.414
1570	190.950
1590	188.548
1610	186.206



## Приложение Б

### РД 45.286-2002 Аппаратура волоконно-оптической системы передачи со спектральным разделением. Технические требования

**Таблица 1** Параметры оптических усилителей передачи (Усилитель мощности)

Наименование параметров ОУПд		Значение параметров
Уровень входной суммарной мощности	минимальный, дБм	-17,5
	максимальный, дБм	+16,0
Уровень выходной суммарной мощности	минимальный, дБм	+3,5
	максимальный, дБм	+27,0
Коэффициент усиления	минимальный, дБм	14,0
	максимальный, дБм	28,0
Неравномерность коэффициента усиления в заданном диапазоне рабочих длин волн не более, дБ		2,0
Шум фактор в заданном диапазоне рабочих длин волн (при минимальном уровне суммарной входной мощности), не более, дБ		7,0
Коэффициент отражения от входа, не менее, дБ		-30
Затухание отражения на выходе, не более, дБ		30,0

**Таблица 2** Параметры оптических промежуточных усилителей (Линейный усилитель)

Наименование параметров ОПУ		Значение параметров
Уровень входной суммарной мощности	минимальный, дБм	-36,0
	максимальный, дБм	+10,0
Уровень выходной суммарной мощности	минимальный, дБм	+3,5
	максимальный, дБм	+27,0
Коэффициент усиления	минимальный, дБм	15,0
	максимальный, дБм	41,0
Неравномерность коэффициента усиления в заданном диапазоне рабочих длин волн не более, дБ		2,0
Шум фактор в заданном диапазоне рабочих длин волн (при минимальном уровне суммарной входной мощности), не более, дБ		7,0

Коэффициент отражения от входа, не менее, дБ	-30
Затухание отражения на выходе, не более, дБ	30,0

**Таблица 3 Параметры оптических усилителей приема (Предусилитель)**

Наименование параметров ОУПр		Значение параметров
Уровень входной суммарной мощности	минимальный, дБм	-36,0
	максимальный, дБм	+1,0
Уровень выходной суммарной мощности	минимальный, дБм	-10,0
	максимальный, дБм	+17,0
Коэффициент усиления	минимальный, дБм	10,0
	максимальный, дБм	33,0
Неравномерность коэффициента усиления в заданном диапазоне рабочих длин волн не более, дБ		3,0
Шум фактор в заданном диапазоне рабочих длин волн (при минимальном уровне суммарной входной мощности), не более, дБ		6,0
Коэффициент отражения от входа, не менее, дБ		-30
Затухание отражения на выходе, не более, дБ		30,0

**Таблица 4 Параметры оптических терминальных мультиплексоров**

Количество оптических каналов	8	16		40		80		160	
Расстояние между оптическими каналами, ГГц	200	200	100	100	50	50	100	100	50
Наименование параметров	Значение параметров								
1 Отклонение центральной частоты оптического канала, не более, ГГц	±5			±3		±5		±3	
2 Вносимое затухание, не более, дБ	6	7,5		12		14		16	
3 Ширина полосы оптического канала на уровне: -3 дБ, не менее, ГГц -20 дБ, не менее, ГГц	50 80			25 40		50 80		25 40	
4 ЛР №1 потери, не более, дБ	0,5								
5 Переходная помеха от смежного оптического	-30								

канала, не более, дБ	
6 Кумулятивная переходная помеха при максимальном числе действующих оптических каналов, не более, дБ	-25
7 Коэффициент отражения на входе и выходе, не более, дБ	-30

**Таблица 5 Параметры двухканальных широкополосных оптических мультиплексоров/демультиплексоров**

Наименование параметров	Значение параметров
Вносимое затухание, не более, дБ	0,7
Вносимое затухание, не более, дБ	25,0
Коэффициент отражения от входа, не менее, дБ	-40,0
Затухание отражения на выходе, не более, дБ	40,0

**Таблица 6 Параметры оптических мультиплексоров ввода/вывода (ОМВВ)**

Наименование параметров		Значение параметров				
Количество оптических каналов		8	16		40	
Количество ответвляемых/вводимых оптических каналов, не более		4	8		16	
Расстояние между оптическими каналами, ГГц		200	200	100	100	50
Отклонение центральной частоты оптического канала, не более, ГГц		+/-5,0				+/-3,0
Вносимое затухание	для ответвляемых/вводимых оптических каналов, не более, дБ'	6,0	7,5		8,0	
	для ответвляемых/вводимых оптических каналов, не более, дБ;	12,0	15,0		16,0	
Ширина полосы	-3 дБ, не менее, ГГц	50,0			25,0	
	-20 дБ, не менее, ГГц	80,0			40,0	
Подполяризационно-зависимые потери, не более, дБ		0,5				
Переходная помеха от смежного оптического канала, не более, дБ		-30,0				
Кумулятивная переходная помеха при максимальном числе действующих оптических каналов, не более, дБ		-27,0				
Коэффициент отражения от входа, не менее, дБ		-30				
Затухание отражения на выходе, не более, дБ		30,0				

## Приложение В

### Параметры промышленных оптических усилителей и мультиплексоров

Наиболее широко на российском рынке представлено оборудование WDM следующих компаний: Alcatel, Lucent Technologies, Nortel Networks, Siemens, Huawei Technologies, NEC, ECI Telecom [1-7].

Компания **Alcatel** представляет на рынке семейство продуктов OPTINEX для операторов связи. Ряд продуктов DWDM оптимизирован для сетей городского масштаба. В семейство OPTINEX входят три модели оборудования DWDM. Alcatel 1686 WM-система с поддержкой 16 или 32 оптических каналов. Каждый из них способен работать на скоростях от 100 Мбит/с до 10 Гбит/с. Разновидность данной модели категории metro — Alcatel 1686 WM Metro и Alcatel 1696 Metro Span — оптимизирована для городских сетей. Для высокопроизводительных магистральных сетей подойдет модель Alcatel 1640 WM, обеспечивающая мультиплексирование до 80 оптических каналов.

Компания **Lucent Technologies** выпускает целую гамму оборудования синхронной передачи и оптического уплотнения, объединенных общим названием WaveStar. Оборудование DWDM компании Lucent Technologies включает в себя семейство WaveStar OLS и мультисервисную платформу Metropolis MSX. Наиболее простая система DWDM — WaveStar OLS 80G с поддержкой до 16 оптических каналов в диапазоне 1550 нм. Данная система в модификации WaveStar OLS 400G расширяется до 80 оптических каналов, а в модификации WaveStar OLS 1.6T — до 160 каналов. Каждый из формируемых каналов может передавать информацию со скоростью 10 Гбит/с (STM-64), что соответствует пропускной способности по одному оптическому волокну 1,6 Тбит/с.

Компания **Nortel Networks** выпускает оборудования DWDM серии OPTera Long Haul 1600, обеспечивающее высокую пропускную способность, и OPTera Metro 5000, предназначенное для создания скоростных сетей масштаба города.

Компания **Siemens** выпускает целое семейство мультиплексоров под названием TransXpress. В области DWDM предлагается широкий выбор оборудования для магистральных, региональных и городских сетей. Например, модель MTS2, созданная для магистральных сетей большой емкости и большой пропускной способности, способна передать до 640 каналов по 2,5 Гбит/с на расстояние свыше 1000 км.

Компания **Huawei Technologies** для применения на магистральных сетях разработало семейство OptiX, куда входит оборудование DWDM на 16/32 канала.

Компания **NEC** совместно с подмосковным заводом научного приборостроения РАН разработало систему SpectralWave 40/80, предназначенную для реализации магистрального узла, способного обеспечить гибкую и поэтапную организацию системы DWDM. Система SpectralWave 40/80 обладает пропускной способностью до 400 Гбит/с.

Компания **ECI Telecom** выпустила серию универсальных мультиплексоров XDM, в котором на одной платформе интегрированы функции мультиплек-

сирования DWDM, кросс-коммутации, маршрутизатора IP, коммутатора АТМ и мультиплексов SDH.

## 1. Оборудование «Пуск»

Оборудование DWDM «Пуск» предназначено для организации в одном оптическом волокне типа G.652, G.654 и G.655 до 160 оптических каналов в диапазоне длин волн 1530–1605 нм с возможностью передачи в каждом оптическом канале цифровых сигналов со скоростью от 0,1 до 2,5 Гбит/с (10 Гбит/с), пропускная способность — до 400 Гбит/с в одном оптическом волокне. В оборудовании предусмотрена возможность автоматического тестирования отдельных элементов и узлов для определения функционирования аппаратуры без перерыва связи. Оборудование контролируется и управляется с помощью встроенных микроконтроллеров и специализированного программного обеспечения версии ИП-1.5. Аппаратно-программный комплекс имеет стыки с рабочей станцией и местным терминалом системы технического обслуживания. Возможна реализация участков большой протяженности (до 1500 км) без регенерации цифровых сигналов. Оборудование «Пуск» позволяет осуществлять гибкое конфигурирование оптических сетей, включая сети Ethernet, IP, АТМ, кабельного телевидения. Для контроля и управления, а также для организации служебной связи, используется выделенный оптический канал. Оборудование «Пуск» предназначено для применения на различных участках Взаимоувязанной сети связи России: магистральная первичная сеть, внутризональные первичные сети, местные первичные сети, оптические сети доступа.



Оборудование «Пуск» предназначено для организации в одном оптическом волокне типа G.652, G.654 и G.655 до 160 оптических каналов в диапазоне длин волн 1530–1605 нм с возможностью передачи в каждом оптическом канале цифровых сигналов со скоростью от 0,1 до 2,5 Гбит/с (10 Гбит/с), пропускная способность — до 400 Гбит/с в одном оптическом волокне. В оборудовании предусмотрена возможность автоматического тестирования отдельных элементов и узлов для определения функционирования аппаратуры без перерыва связи. Оборудование контролируется и управляется с помощью встроенных микроконтроллеров и специализированного программного обеспечения версии ИП-1.5. Аппаратно-программный комплекс имеет стыки с рабочей станцией и местным терминалом системы технического обслуживания. Возможна реализация участков большой протяженности (до 1500 км) без регенерации цифровых сигналов. Оборудование «Пуск» позволяет осуществлять гибкое конфигурирование оптических сетей, включая сети Ethernet, IP, АТМ, кабельного телевидения. Для контроля и управления, а также для организации служебной связи, используется выделенный оптический канал.

Оборудование «Пуск» предназначено для применения на различных участках Взаимоувязанной сети связи России: магистральная первичная сеть, внутризональные первичные сети, местные первичные сети, оптические сети доступа.

В табл. 6–8 приведены параметры оптических терминальных демультиплексов, мультиплексов ввода/вывода и линейных усилителей оборудования DWDM «Пуск».

Таблица 6

Параметры оптических терминальных демультиплексов

Наименование параметров	Значение параметров									
Количество оптических каналов	8	16		40		80		160		
Расстояние между оптическими каналами, ГГц	200	200	100	100	50	50	100	100	50	
Отклонение центральной	± 5,0				± 3,0		± 5,0		± 3,0	

частоты оптического канала, не более, ГГц					
Вносимое затухание, не более, дБ		6,0	7,5	12,0	14,0 16,0
Ширина полосы оптического канала на уровне	-3 дБ, не менее, ГГц	50,0	25,0	50,0	25,0
	-20 дБ, не менее, ГГц	80,0	40,0	80,0	40,0
Поляризационно-зависимые потери, не более, дБ		0,5			
Переходная помеха от смежного оптического канала, не более, дБ		-30,0			
Кумулятивная переходная помеха при максимальном числе действующих оптических каналов, не более, дБ		-25,0			
Коэффициент отражения от входа, не менее, дБ		-30			
Затухание отражения на выходе, не более, дБ		30,0			

Таблица 7

Параметры оптических мультиплексоров ввода/вывода (ОМВВ)

Наименование параметров		Значение параметров				
Количество оптических каналов		8	16	40		
Количество ответвляемых/вводимых оптических каналов, не более		4	8	16		
Расстояние между оптическими каналами, ГГц		200	200	100	100	50
Отклонение центральной частоты оптического канала, не более, ГГц		± 5,0				± 3,0
Вносимое затухание	для ответвляемых /вводимых оптических каналов, не более, дБ	6,0	7,5	8,0		
Ширина полосы оптического канала на уровне	-3 дБ, не менее, ГГц	50,0		25,0		
	-20 дБ, не менее, ГГц	80,0		40,0		
Поляризационно-зависимые потери, не более, дБ		0,5				

Переходная помеха от смежного оптического канала, не более, дБ	– 30,0
Кумулятивная переходная помеха при максимальном числе действующих оптических каналов, не более, дБ	– 27,0
Коэффициент отражения от входа, не менее, дБ	– 30

## 2 Оборудование OptiX BWS 320G

Оптическая система передачи OptiX BWS 320G на основе технологии DWDM, разработанная Huawei Technologies Company., Ltd., является новым поколением систем оптической передачи DWDM с высоким объемом передачи на



длинные расстояния. Являясь представителем серии оборудования OptiX, OptiX BWS 320G обладает гибкой конфигурацией, совместимостью. Система BWS 320G способна мультиплексировать 32 длины волны в одном оптоволокне, например, передавать 32 несущие с различными длинами волн которые в свою очередь передают сигнал STM-16 с общей

пускной способностью до 80 Гбит/с. В настоящий момент оборудование способно мультиплексировать до 32 оптических каналов 10 Гбит/с (STM-64), с общей скоростью передачи 320 Гбит/с. В системе BWS 320G применяется односторонняя передача по одному оптическому волокну с возможностью осуществления передачи в обе стороны с использованием надежной технологии мультиплексирования /демультиплексирования длины волны, технологии оптического усиления на волокне, легированном эрбием, технологии стабилизации длины волны, технологии компенсации дисперсии, технологии объединенной системы сетевого управления и технологии независимого канала управления и т.д. Это оборудование может быть построено по различным топологиям, таких как «точка — точка», «цепь», «кольцо», и может применяться для передачи информации как по магистральным каналам, так и в локально-вычислительных сетях (LAN).

В табл.8,9 приведены параметры оптического демультиплексора и линейного усилителя оборудования OptiX BWS 320G.

Таблица 8

Параметры оптического демультиплексора

Название параметра	32-канальный демультиплексор	
	32-канальный демультиплексор	16-канальный демультиплексор
Разнесение каналов, ГГц	100	100
Вносимые потери, дБ	< 10	< 7
Коэффициент отражения, дБ	< -40	< -40
Поляризационные потери, дБ	< 0,5	< 0,5
Максимальная разница входных потерь канала, дБ	< 3	< 3
-1дБ полоса пропускания, нм	> 0,2	> 0,2
-20 дБ полоса пропускания, нм	< 1,4	< 1,4
Тип	AWG	Тонкопленочный

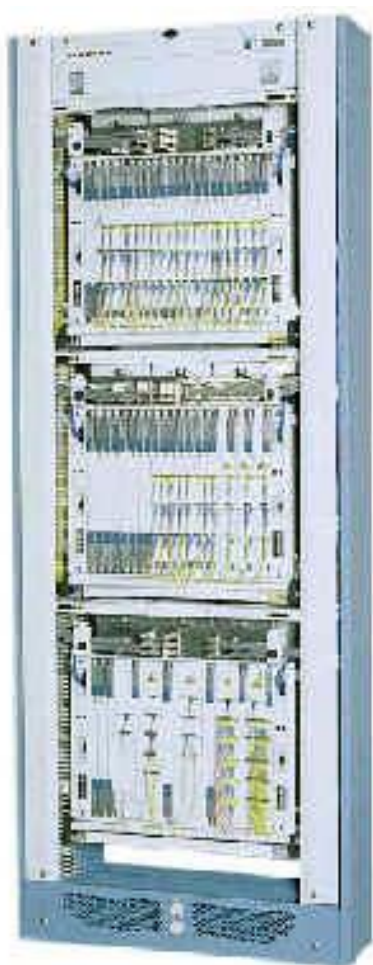
Таблица 9

Параметры линейного усилителя оптической мощности

Название параметра	32-канальная система		
	8x22 дБ	5x30 дБ	3x33 дБ
Область усиления, нм	1535–1561	1535–1561	1535–1561
Коэффициент шума (NF), дБ	< 5,5	< 5,5	< 5,5
Входная отражательная способность, дБ	< -30	< -30	< -30
Максимальная мощность на выходе, дБм	20	20	20
Время реакции системы усиления при вводе/выводе каналов, мс	< 10	< 10	< 10
Коэффициент усиления, дБ	22 ~ 25	29 ~ 32	32 ~ 35
Неравномерность АЧХ, дБ	< 2	< 2	< 2
Величина поляризационной дисперсии, пс	–	–	–
Поляризационные потери, дБ	< 0,5	< 0,5	< 0,5



### 3 Оборудование Spectral Wave 40/80 DWDM System (NEC)



Система SpectralWave 40/80 разработана для реализации магистрального узла, способного обеспечить гибкую и поэтапную организацию системы DWDM. Система SpectralWave 40/80 обладает пропускной способностью до 800 Гбит/с. Она поддерживает до 40 длин волн в полосе *C* и обеспечивает открытый интерфейс в любой комбинации сигналов STM-64, STM-16, STM-4, STM-1 и 100 Мбит/с ~ 1,25 Гбит/с. Миграция от 40 до 80 длин волн может легко осуществляться в работающей системе объединением полос *C* и *L*. Эти особенности позволяют организовывать мультисервисные широкополосные сети для предоставления широкого спектра растущих потребностей, таких как более скоростная передача голоса, данных, видео- и других видов информации одновременно. Система SpectralWave 40/80 контролируется системой управления INC-100MS производства NEC, которая является интегрированной системой управления для оборудования WDM и SDH фирмы NEC.

Таблица 10

Параметры оптического демультиплексора

Название параметра	40-канальный мультиплексор	40-канальный демультиплексор
Разнесение каналов, ГГц	100	100
Вносимые потери, дБ	14+/-0,5	7+/-0,5
Диапазон длин волн, нм	1530.33 - 1562.23	1530.33 - 1562.23
Тип	AWG	AWG

Таблица 11

Параметры линейного усилителя оптической мощности

Название параметра	80-канальная система		
	30/33 дБ для кабеля SMF	22/25 дБ для кабеля NZDSF	30/33 дБ для кабеля NZDSF
Область усиления, нм	1530-1562.5	1530-1562.5	1530-1562.5
Коэффициент шума (NF), дБ	< 7.0 (30 дБ) < 6.3 (33 дБ)	< 8.5 (22 дБ) < 7.5 (25 дБ)	< 7
Максимальная мощность на выходе, дБм	21	17	19

Коэффициент усиления, дБ	28	27	30
Неравномерность АЧХ, дБ	< 2	< 2	< 2
Величина поляризационной дисперсии, пс	–	–	–
Поляризационные потери, дБ	< 0,5	< 0,5	< 0,5

#### 4 Оборудование Alcatel 1640WM (Alcatel)

Мультиплексор с разделением по длинам волн Alcatel 1640WM (WM — Wavelength Multiplexer) представляет собой масштабируемое гибкое решение WDM для создания оптических сетей сверхбольшой пропускной способности и протяженности с организацией до 80, а в перспективе — до 240 оптических каналов. Данная система разработана для удовлетворения растущих потребностей в большем и более гибком диапазоне и является идеальным средством для создания оптических терминальных мультиплексоров, являющихся частью сетей с топологией «точка — точка» и оптических мультиплексоров ввода/вывода (OADM), предназначенных для использования в сетях с топологией «много точек — много точек»..



Таблица 12

Параметры линейного усилителя оптической мощности

Название параметра	80-канальная система		
	14 дБ	17 дБ	20 дБ
Область усиления, нм	1530-1562	1530-1562	1530-1562
Коэффициент шума (NF), дБ	5	5	5
Максимальная мощность на выходе, дБм	14	17	20
Коэффициент усиления, дБ	28	28	38
Неравномерность АЧХ, дБ	< 1	< 1	< 1
Величина поляризационной дисперсии, пс	–	–	–
Поляризационные потери, дБ	< 0,5	< 0,5	< 0,5

## 5 Сравнительные характеристики оборудования

В табл. 13 представлена сравнительная характеристика оптических мультиплексоров ввода/вывода рассмотренных выше WDM-систем.

Таблица 13

Характеристики мультиплексоров ввода/вывода

Фирма	Optix BWS 320G (Huawei)	Spectral Wave 40/80 DWDM System (NEC)	1640 WM (Alcatel)	Accelink tec.(AWG DWDM Module)	«Пуск» (НТО «Ирээ-Полюс»)
Разнесение каналов, ГГц	100	–	50	100	50
Вносимые потери, дБ	< 10	14	–	5,5	8
Коэффициент отражения, дБ	< –40	–	–	– 45	– 30
Поляризационные потери, дБ	< 0,5	–	–	0,5	0,5
Максимальная разница входных уровней, дБ	< 3	–	–	1	–
–1дБ полоса пропускания, нм	> 0,2	–	–	> 0,4	> 0,2
–20 дБ полоса пропускания, нм	< 1,4	–	–	< 1,2	< 0,32
Число каналов	16/32	16	16	40	40
Тип мультиплексора	тонко- пленоч- ный	AWG	тонко- пленоч- ный	AWG	тонко- пленоч- ный

В табл. 14 дана сравнительная характеристика терминальных оптических мультиплексоров.

Таблица 14

Характеристики терминальных мультиплексоров

Фирма	Optix BWS 320G (Huawei)	Spectral Wave 40/80 DWDM System (NEC)	«Пуск» (НТО «Ирээ-Полюс»)
Вносимые потери, дБ	< 17	14	12
Коэффициент отражения, дБ	< – 40	–	–30
Поляризационные потери, дБ	<0.5	-	0,5
Максимальная разница входных уровней, дБ	<3	-	-

Область прозрачности, нм	1530-1570	1530 - 1562	-
Число каналов	32	16	40
Тип мультиплексора	AWG	AWG	

В табл. 15 представлена сравнительная характеристика оптических линейных усилителей рассмотренных выше WDM-систем передачи.

Таблица 15

Характеристики оптических линейных усилителей

Фирма	Optix BWS 320G (Huawei Company)	SpectralWave 40/80 DWDM System (NEC)	1640 WM (Alcatel)	«Пуск» (НТО «Ирэ-Полус»)
Число каналов	32	40	80	–
Диапазон мощности на входе, дБм	–30 ÷ –13	–22,5 ÷ 2,5	–	–36 ÷ +10
Коэффициент шума (NF), дБ	< 5,5	6–7	5	7
Максимальная мощность на выходе, дБм	20	8–21	28	3,5–27
Коэффициент усиления, дБ	32–35	30–33	20	15–30
Неравномерность АЧХ, дБ	< 2	< 2	< 1	2
Поляризационные потери, дБ	< 0,5	–	–	–

### Литература

1. Alcatel-Lucent 1696 Metrospan (Metro WDM) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www1.alcatel-lucent.com>. (дата обращения 18.09.2022).
2. WaveStar® OLS 1.6T, Lucent's core DWDM system [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.alcatel-lucent.com/wps/portal/products>. (дата обращения 18.09.2022).
3. Nortel's Wavelength Division Multiplexer (WDM) Portfolio [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://products.nortel.com> . (дата обращения 18.09.2022).
4. Оборудование оптической передачи OptiX [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.huawei.ru/products/catalog/optix> (дата обращения 18.09.2022).
5. SpectralWave 40/80. Overview [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.nec.co.uk/Spectral\\_Wave\\_4080.aspx](http://www.nec.co.uk/Spectral_Wave_4080.aspx) (дата обращения 18.09.2022).
6. ECI Telecom Technologies [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.eci-telecom.com> . (дата обращения 18.09.2022).

## Список основных сокращений и обозначений

AWG	— массив фазирующих волноводов
DRA	— распределенный рамановский усилитель
DWDM	— уплотненное спектральное мультиплексирование
EDFA	— усилитель на волокне, легированном эрбием
EDTFA	— усилитель на теллуритовом волокне, легированном эрбием
FP	— резонатор Фабри — Перо
LOA	— линейный оптический усилитель
LRA	— дискретный рамановский усилитель
MZI	— интерферометр Маха-Цендера
OADM	— оптический мультиплексор ввода/вывода
OD	— оптический демультиплексор
OM	— оптический мультиплексор
OTM	— оптический терминальный мультиплексор
OP	— оптический тракт
WDM	— спектральное мультиплексирование
ВОСП	— волоконно-оптическая система передачи

$L$	— толщина периодической структуры
$\Lambda$	— период следования слоев
$\theta$	— наклон фильтров
$\lambda$	— длина волны
$\epsilon$	— диэлектрическая проницаемость
$k$	— волновой вектор
$K(\lambda)$	— постоянная связи мод
$\Delta\beta(\lambda)$	— фазовое рассогласование
$I_{\max}$	— максимальное отражение от тонкопленочного фильтра
$\Delta n$	— разность показателей преломления
$P_{\max}$	— максимальная переходная помеха
$I(\lambda)$	— аппаратная функция фильтра Фабри-Перо
$\Delta\lambda_{FSR}$	— свободный спектральный диапазон демультиплексора
$L_i$	— длина резонатора
$T_f$	— период аппаратной функции
$R$	— коэффициент отражения
$\Delta\lambda_k$	— канальный интервал демультиплексора
$\eta_{\partial \max}$	— максимально достижимая дифракционная эффективность
$T_i$	— входные/выходные порты мультиплексора
$f_{in}$	— входной сигнал
$f_j^{out}$	— выходной сигнал
$[T_{ij}]$	— матрица передачи

Учебное издание

Шарангович Сергей Николаевич

**«МУЛЬТИПЛЕКСОРНОЕ И УСИЛИТЕЛЬНОЕ  
ОБОРУДОВАНИЕ МНОГОВОЛНОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ  
СИСТЕМ СВЯЗИ»**

**КОМПЬЮТЕРНЫЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

Учебно-методическое пособие по лабораторным занятиям  
по дисциплине «Мультиплексорное и усилительное оборудование многовол-  
новых оптических систем связи»

Формат 60x84 1/16. Усл. печ. л.-----.

Тираж --- экз. Заказ-----.

Отпечатано в Томском государственном университете  
систем управления и радиоэлектроники.  
634050, Томск, пр. Ленина, 40. Тел. (3822) 533018.