

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

С.Н. Шарангович

**ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ И
ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

Учебное методическое пособие

Томск
2022

УДК 621.372.8.029(075.8)

ББК 32.845.7я73

Ш 25

Рецензенты:

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

Коханенко А.П., д–р физ.–мат. наук, проф. каф.
квантовой электроники и оптоинформатики Томск. гос. ун–та.

Шарангович С.Н.

Ш 25 Оптические системы связи и обработки информации. Лабораторный практикум:
учеб. метод. пособие . – Томск : Томск. гос. ун–т систем упр. и радиоэлектроники, 2022 –
80 с.

Представлены методические материалы лабораторного практикума по экспериментальным исследованиям интегральных преобразований оптических сигналов и акустооптическому устройству ввода информации, расчету и моделированию EDFA оптического усилителя и мультиплексора на интерференционных фильтрах.

Предназначено для студентов технических вузов, обучающихся по направлению 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» (дисциплина «Оптические системы связи и обработки информации»).

УДК 621.372.8.029(075.8)

ББК 32.845.7я73

ISBN

© Шарангович С.Н, 2022

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

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. Структура и оборудование оптических систем связи.....	5
2. Лабораторная работа №1 Интегральные преобразования оптических сигналов.....	26
3. Лабораторная работа №2 Акустооптическое устройство ввода информации в оптическую систему.....	37
4. Лабораторная работа №3 Оптический мультиплексор на тонкопленочных фильтрах	43
5. Лабораторная работа №4 Оптический усилитель на допированном волокне	56
ПРИЛОЖЕНИЕ А Частотный план ИТУ-Т.....	65
ПРИЛОЖЕНИЕ Б РД 45.286-2002 Аппаратура волоконно-оптической системы передачи со спектральным разделением. Технические требования	68
ПРИЛОЖЕНИЕ В Параметры промышленных оптических усилителей и мультиплексоров.....	71

ВВЕДЕНИЕ

В данном учебном методическом пособии представлены методические материалы лабораторного практикума по экспериментальным исследованиям интегральных преобразований оптических сигналов и акустооптическому устройству ввода информации, расчету и моделированию EDFA оптического усилителя и мультиплексора на интерференционных фильтрах, которые дополняют материалы теоретической части [2] курса «Оптические системы связи и обработки информации».

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 интегральные преобразования оптических сигналов, акустооптическое устройство ввода информации в оптическую систему, оптический мультиплексор на тонкопленочных фильтрах, оптический усилитель на допированном волокне. В каждом разделе представлены задания и описаны методические рекомендации по выполнению лабораторных работ, 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 формы обучения технических вузов старших курсов, обучающихся по направлению 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» (дисциплина «Оптические системы связи и обработки информации»).

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 λ_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-Т, 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) λ_0 в длины волн спектра каналов λ_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:

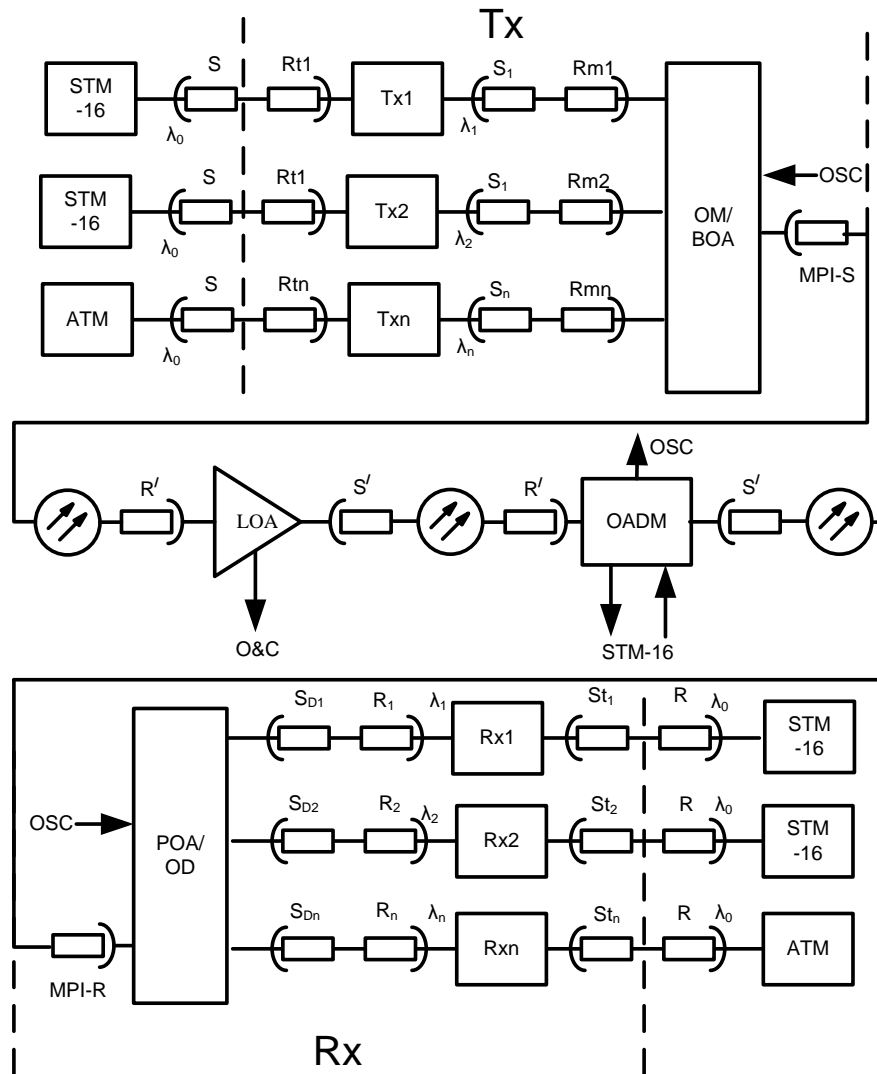
$$\Delta f_{\text{гс}} = \Delta f_{\text{кс}} + (n - 1) \cdot \Delta f_{\text{нчр}},$$

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

$\Delta f_{\text{кс}}$ - спектр канального сигнала;

$\Delta f_{\text{нчр}}$ - 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 $P_{\text{лс}}$.




 Оптические соединители

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

Здесь:

X_j и RX_j ($i = 1, 2, \dots, n$) - передающие и приемные транспонеры (приемопередатчики) каждого канала N -канальной ВОСП-WDM,

OM - оптический мультиплексор,

OA - оптический усилитель,

OD - оптический демультиплексор,

R_{Ti} - контрольные точки (интерфейсы) на входе передающих транспонеров,

S_{Ti} - контрольные точки на выходах приемных транспонеров,

S_i - контрольные точки на ОВ, на выходах оптических соединителей (ОС) передающих транспонеров, соответственно для каналов i ,

R_{Mi} - контрольные точки на ОВ непосредственно перед блоком OM/BOA, на входе ОС, соответственно для каналов i ,

MPI-S - контрольная точка (интерфейс) на ОВ сразу после блока OM/BOA 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 OA/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, демultipлексор (DM), разделяющий групповой сигнал на каналные сигналы, приемные транспондеры RX_j , преобразующие длины волн λ_i , в длину волны λ_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 50 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 соседними каналами равно 20 нм (в некоторых случаях 25 нм). Сравнительная характеристика технологий спектрального уплотнения (СУ) представлена ниже.

	CWDM Грубое СУ	DWDM Плотное СУ	HWDM, СУ высокой 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 : О – начальный , первичный (Original, 1250-1360 нм); Е – расширенный (Extended, 1360-1450 нм); S – коротковолновый (Short wavelength, 146—1530 нм); С – обычный, стандартный (Conventional, 1530-1570 нм); L – длинноволновый (Long wavelength, 1570-1625 нм).

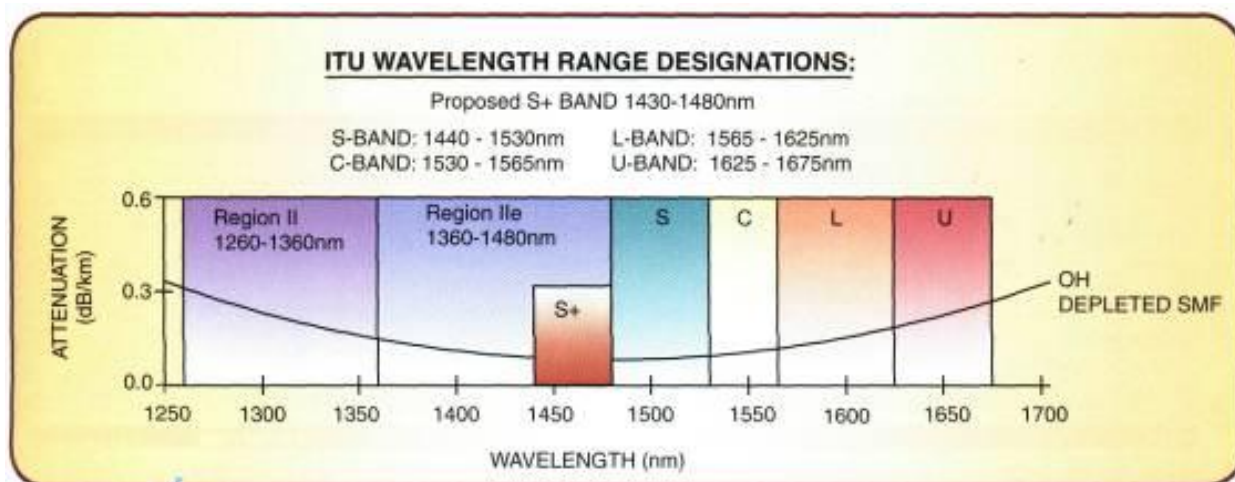


Рисунок 1.2 – Частотный план стандартизованный ITU-T.

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. Портom 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:

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

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.

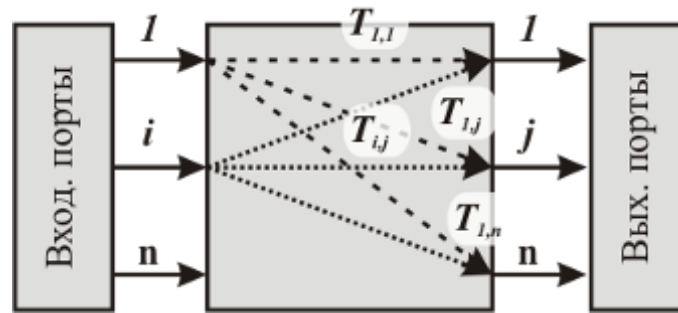


Рисунок 1.3 – Структурная схема многопортового $N \times N$ распределителя

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

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

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

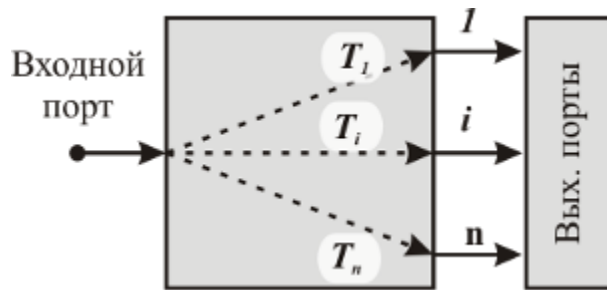


Рисунок 1.4 – Структурная схема демультимплексора

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.

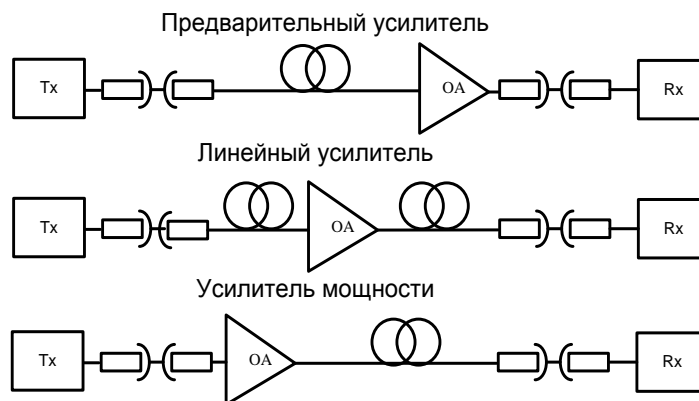


Рисунок 1.5 - Применение разных типов оптических усилителей

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 EFDA

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 Er^{3+} в кристаллической матрице кремниевого стекла. В спектре поглощения таких композитов наблюдаются пики на длинах волн $\lambda=1.48, 0.98, 0.8, 0.667, 0.532, 0.514\mu m$, 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 $\lambda_n = 1.53\mu m$, (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 $\lambda_n = 1.48, 0.98 \mu m$, 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 (~ 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.

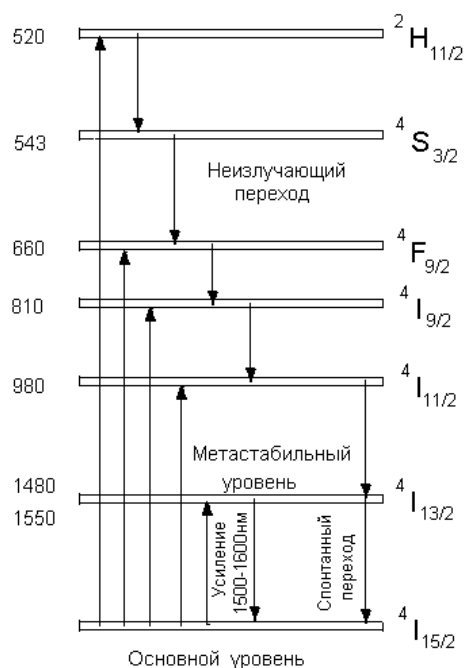


Рисунок 1.6- Диаграмма энергетических уровней для ионов Er^{3+} .

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 (λ_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	+5 дБм
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 стремится 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, поляризацией 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).

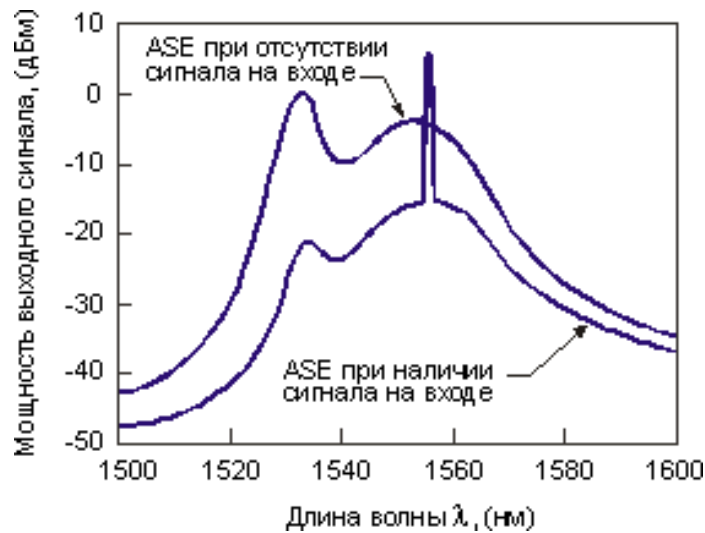


Рисунок 1.7 - Выходной спектр EDFA, снятый спектральным анализатором (ASE - спектральная плотность шума)

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 ~ 1 мкс, время жизни метастабильного состояния ~ 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, ν - частота (Гц), соответствующая длине волны в диапазоне 1.53 – 1.56 мкм, n_{sp} - коэффициент спонтанной эмиссии, η - 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 обоих полюсов посредством методов основанных на:

1. использовании EDFA усилителей с оптическими фильтрами, выравнивающими усиление;
2. двух полюсов 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 надежность сети.

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.

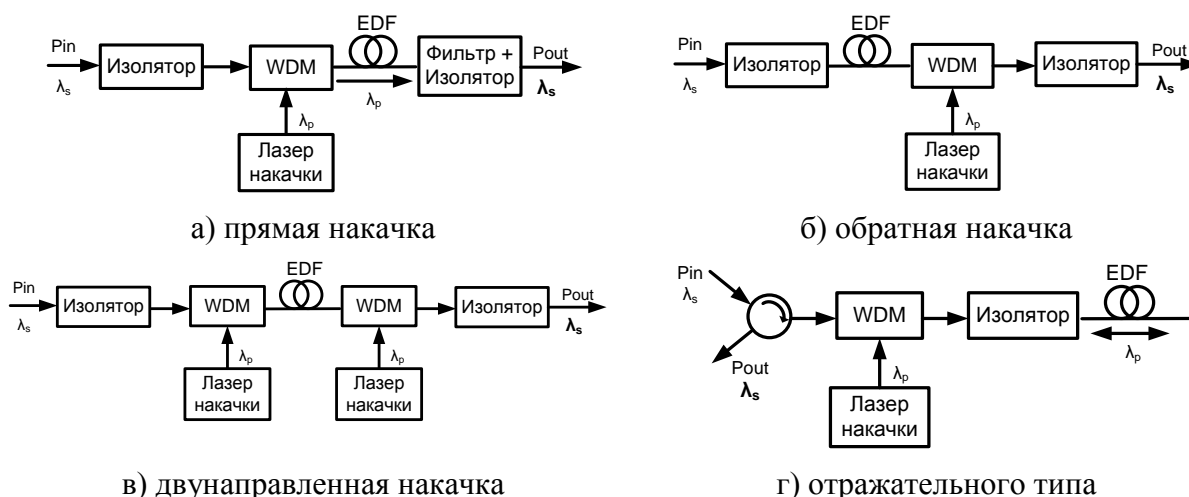


Рисунок 1.8. Основные схемы построения EDFA.

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 оптических 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 CP (рис. 1.1). Рассмотрим эти классификации подробнее:

1.3.1 Классификация MUX/DEMUX по функции

Оптический мультиплексор/демультиплексор в ВОСП с CP 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 передачи. На принимающей стороне **ОТМ** демультиплексирует сигнал **WDM** и отправляет сигналы к соответствующему оборудованию.

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

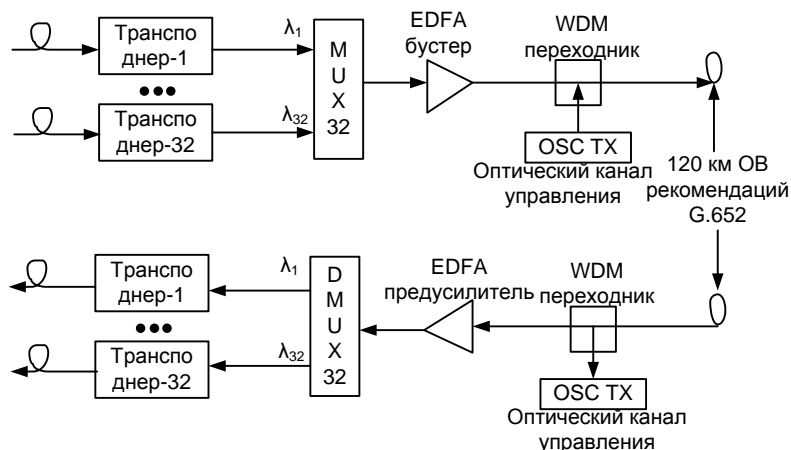


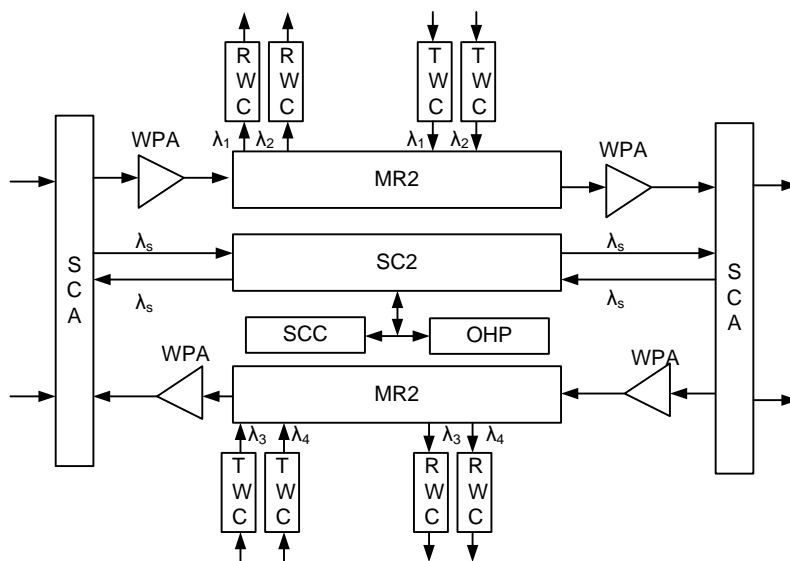
Рис. 1.9 - Структура OTM OptiX BWS 320G

Оборудование включает в себя следующие функциональные блоки: блок преобразования оптической длины волны, блок оптического мультиплексирования, блок оптического усиления, блок оптического демультиплексирования, 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 мощностей для вновь добавленных каналов и других каналов в линии, с целью обеспечить уравнивание мощностей 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: λ_1 и $\lambda_2 \dots \lambda_n$, выделяя несущую λ_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]

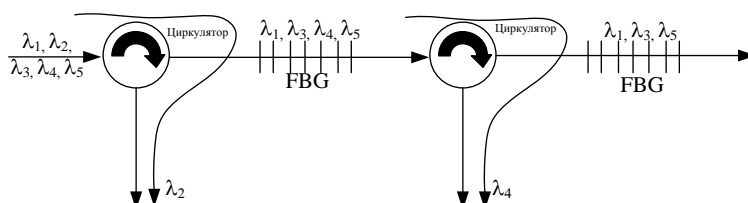


Рис. 1.11 -Схема демультиплексора WDM на основе решеток Брэгга

Здесь отражение волны определенной длины происходит от дифракционной решетки Брэгга соответствующего периода, сформированной в одномодовом 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]

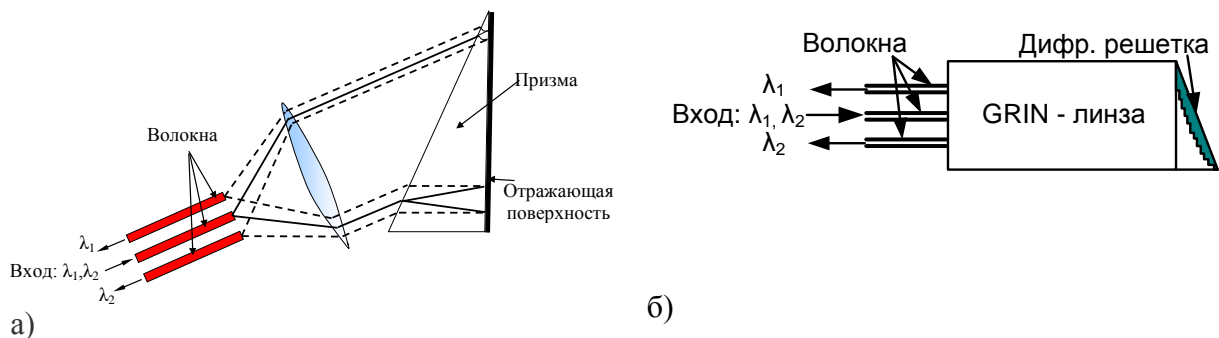


Рисунок 1.12 Схема демультиплексора WDM (а) – на отражательной призме, (б) – на отражательной плоской решетке

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);

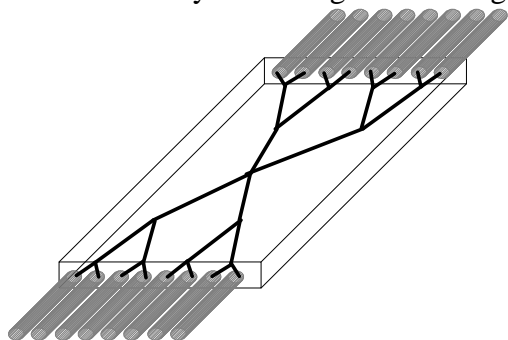


Рисунок 1.13 – Многопортовый разветвитель типа «звезда»

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 мульти-

плексорам/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]

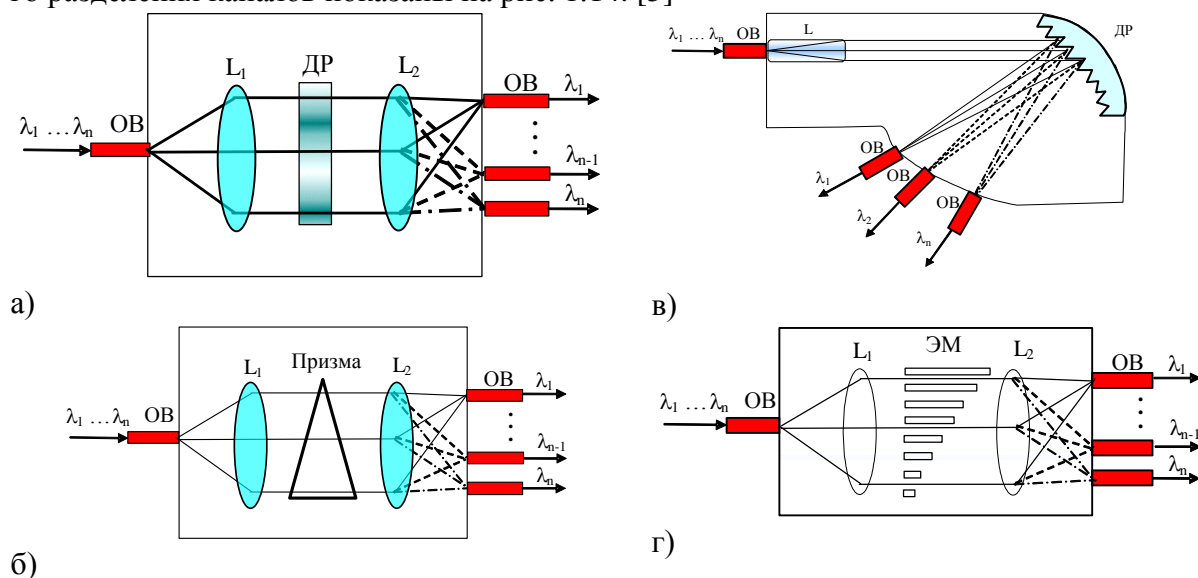


Рисунок 1.14 - Схемы планарных интегрально-оптических волноводных структур (на основе а - призмы, б - дифракционной решетки проводящего типа, в - отражательной дифракционной решетки, г - эшелона Майкельсона)

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).

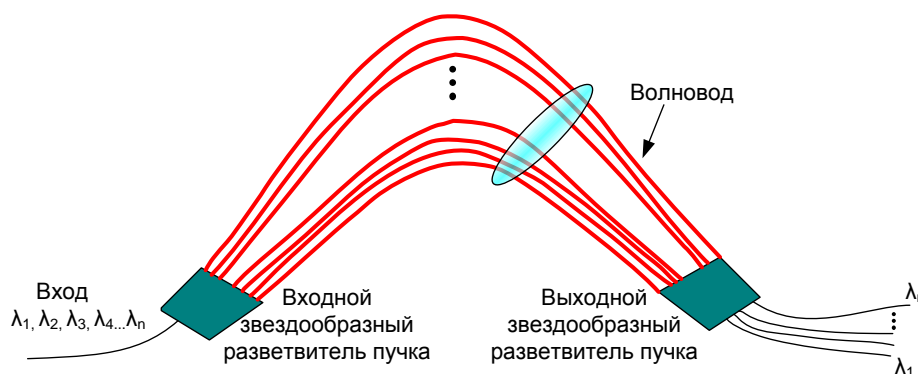


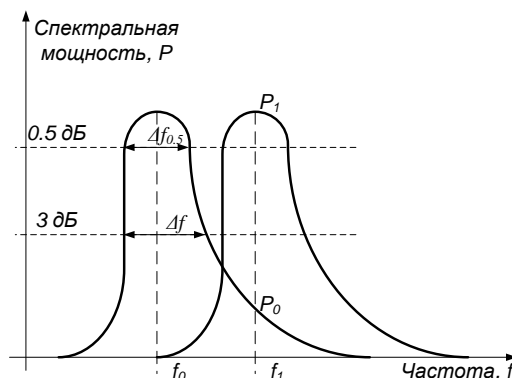
Рис. 1.15 - Структура AWG демультиплексора

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 интегрально-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 мультиплексоров

(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.

4. **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.

5. **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.

6. **Канальный интервал** (Δf_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.

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

8. **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 λ	угловая	деформационная	температурная	температурная
Потери	неоднородные	Низкие, неоднородные	Очень низкие	Очень низкие
Переходная погрешность от соседнего канала, дБ	-25 ~ -35	-30 ~ -35	-25 ~ -35	-25 ~ -35
Переходная погрешность от всех каналов, дБ	Очень низкая	Очень низкая	-25 ~ -35	a < -32
PDL, дБ	0.25	превосходные	0.5	0.5
Конструкторско-формальные	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. Скляр. – 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. Скляр 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 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 отраслевой регистрации разработки в «Отраслевом фонде алгоритмов и программ» от 20.12.2005. Москва.).
15. Кузнецов В.В., Шарангович С.Н. Компьютерная лабораторная работа «Исследование оптических демультиплексоров 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 с.

2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1 ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ.....	31
2. Расчетная часть	31
3. Экспериментальная часть	34
4. Содержание отчета.....	39
5 Контрольные вопросы	39
6. Рекомендуемая литература.....	40

1. Введение

Цель работы: изучение принципов интегрального преобразования оптических сигналов, прошедших через амплитудный и фазовый транспаранты. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными.

2. Расчетная часть

Функция пропускания фазового транспаранта, осуществляющего сдвиг по фазе на π рад, задается как:

$$E(x) = e^{i\varphi(x)},$$

где $\varphi(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } x > 0 \\ \pi, & \text{если } x < 0 \end{cases}$ – функция сдвига по фазе.

На рисунке 2.1 приведена математическая модель функции пропускания фазового транспаранта со сдвигом на π рад.

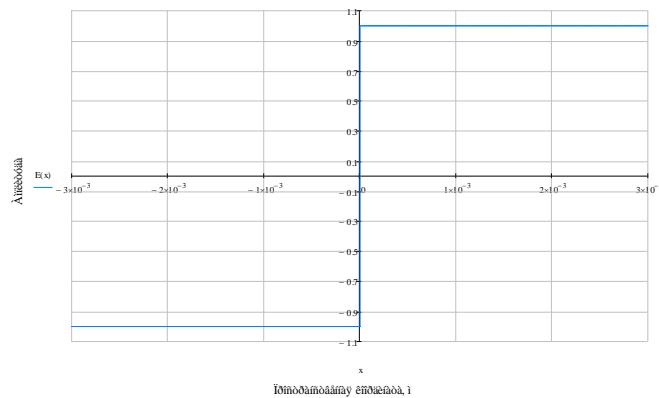


Рисунок 2.1 – Математическая модель функции пропускания фазового транспаранта со сдвигом на π рад

Сигнал на входе и выходе транспаранта представлен на рисунках 2.2-2.3.

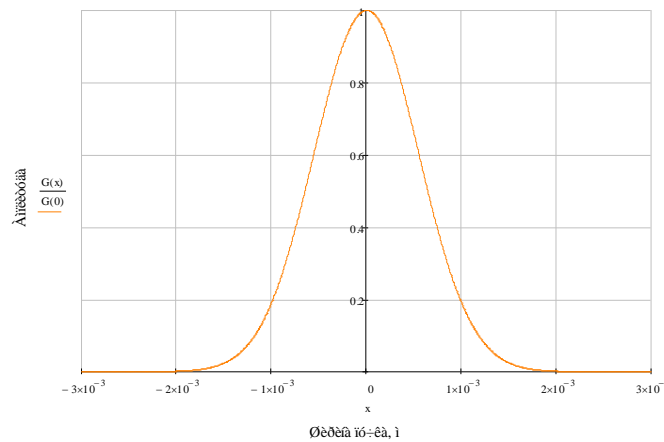


Рисунок 2.2 – Сигнал на входе транспаранта

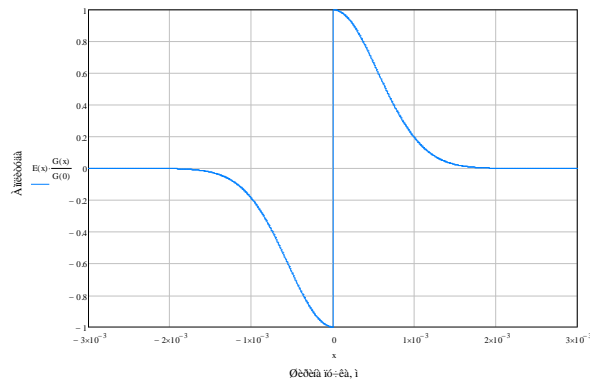


Рисунок 2.3 – Сигнал на выходе транспаранта

Сигнал на выходе транспаранта подвергается преобразованию Фурье и имеет следующий вид:

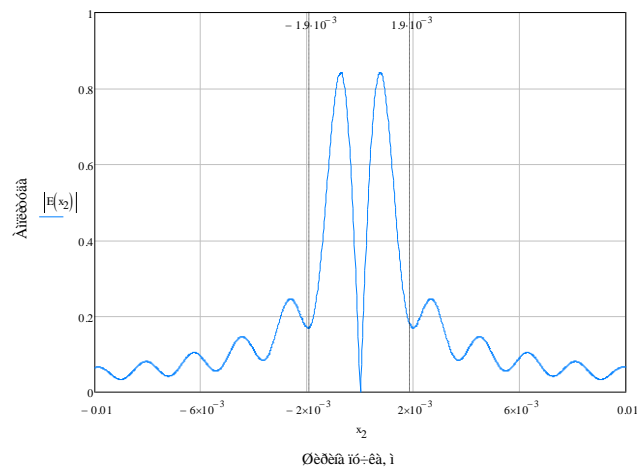


Рисунок 2.4 – Сигнал на выходе транспаранта после преобразования Фурье

Функция пропускания оптического транспаранта с периодом $\Lambda = 16$ мкм, задается как:

$$E(x) = \sum_n^N T(x + n\Lambda),$$

где $T(x)$ – функция пропускания транспаранта:

$$T(x) = E_0(x) \cdot \begin{cases} 1, & \text{если } -0,125 \Lambda < x \leq 0,125 \Lambda \\ 0, & \text{в остальных случаях} \end{cases}$$

$\Lambda = 16$ мкм – период решетки транспаранта;

$E_0(x) = e^{-\frac{x^2}{r^2}}$ – сигнал на входе транспаранта;

$r = 1$ мм – диаметр пучка.

На рисунке 2.5 приведен график функции пропускания амплитудного транспаранта с периодом $T = 16$ мкм.

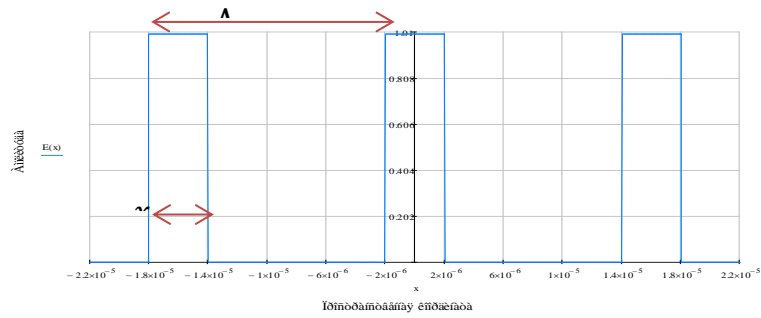


Рисунок 2.5 – График функции пропускания амплитудного транспаранта с периодом $\Lambda = 16$ мкм

На рисунке 2.6 приведен график оптического сигнала на выходе транспаранта до преобразования Фурье.

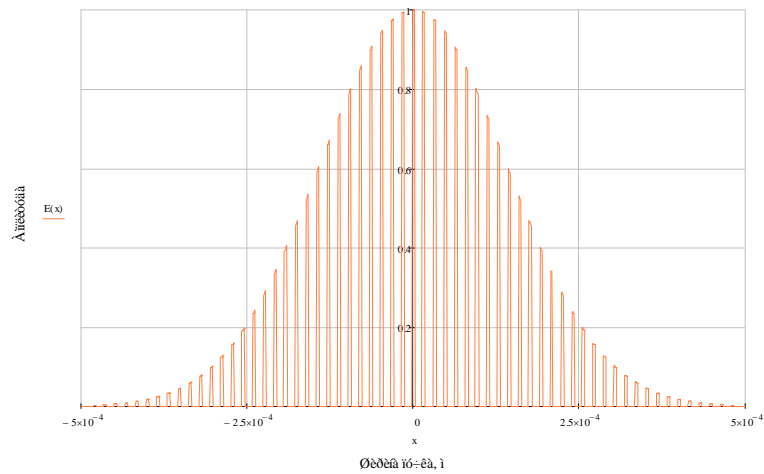


Рисунок 2.6 – Сигнал на выходе транспаранта до преобразования Фурье

На рисунке 2.7 представлен результат моделирования дифракционной картины после преобразования Фурье.

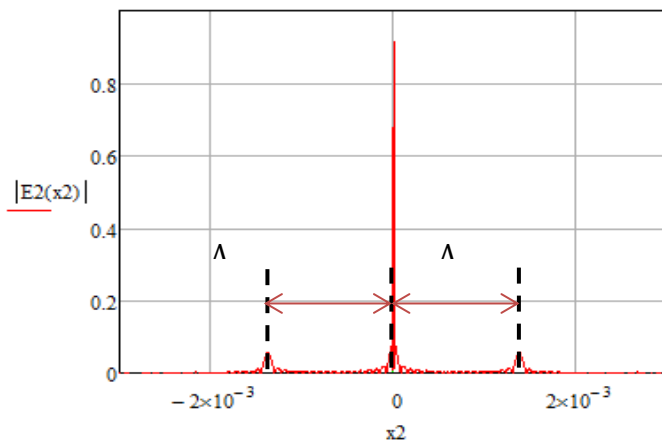


Рисунок 2.7 – Результат моделирования дифракционной картины после преобразование Фурье

3 Экспериментальная часть

Схема экспериментальной установки, преобразующей оптический сигнал в сдвинутый по фазе на π рад, изображена на рисунке 3.1.

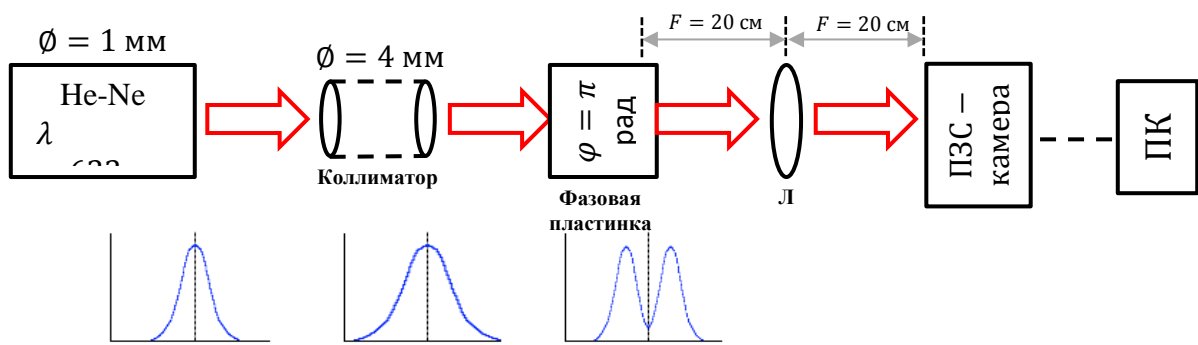


Рисунок 3.1 – Экспериментальная установка, преобразующая оптический сигнал в сдвинутый по фазе на π рад

Источником излучения послужил He-Ne лазер с длиной волны $\lambda = 633$ нм. Диаметр выходного пучка $\Phi = 1$ мм. Далее излучение проходит через коллиматор, увеличивающий диаметр пучка до $\Phi = 4$ мм. После коллиматора пучок падает на пластинку, после которой происходит сдвиг по фазе $\varphi = \pi$ рад. Линза с фокусным расстоянием $F = 200$ мм фокусирует изображение на выходе пластинки, которое фиксируется анализатором лазерных пучков (АЛП). Окончательная информация регистрируется при помощи ПК в программе BeamStar (рисунок 3.2).

Результаты эксперимента показаны на рисунках 3.2-3.6.

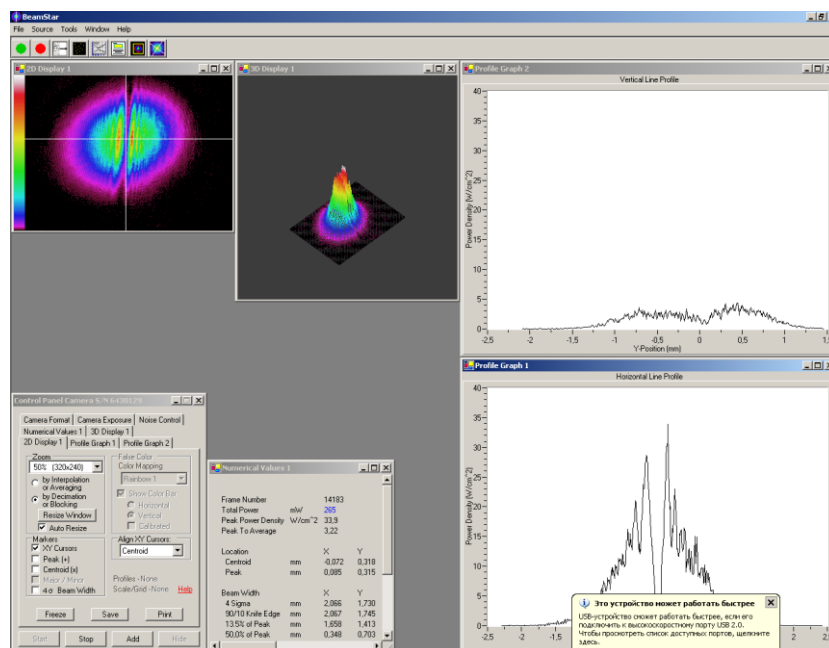


Рисунок 3.2 – Общий интерфейс программы BeamStar

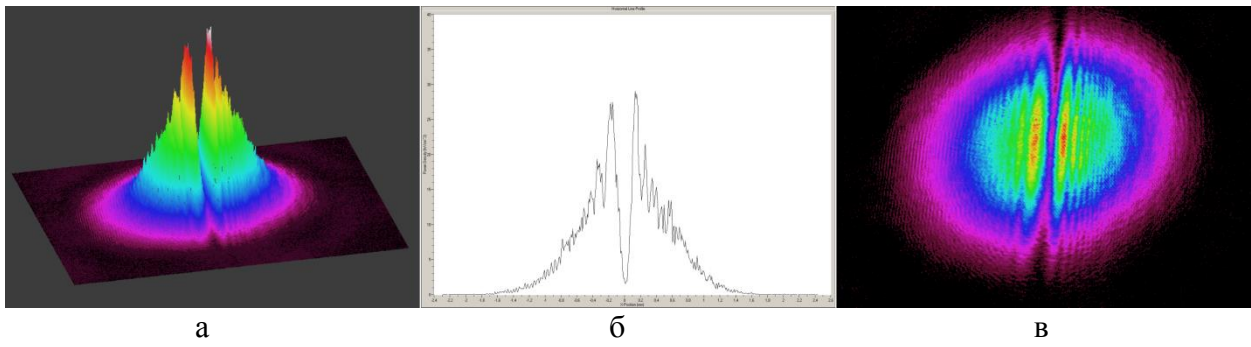


Рисунок 3.3 – Фазированный пучок со сдвигом $\varphi = \pi$ рад: а – в трехмерном виде; б – поперечное сечение пучка вдоль оси X; в – в двумерном виде

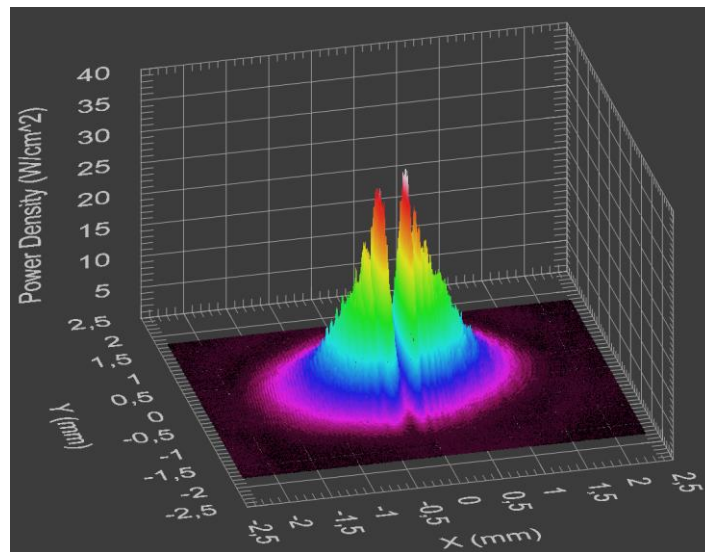


Рисунок 3.4 – Фазированный пучок в трехмерной системе координат

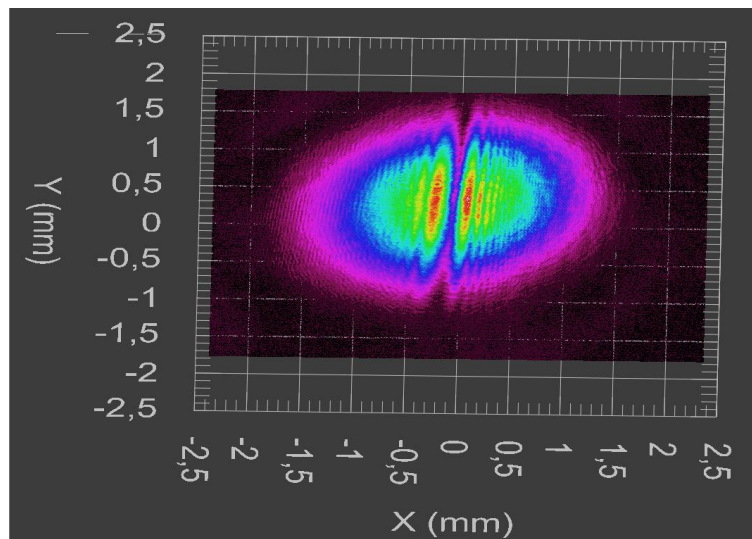


Рисунок 3.5 – Фазированный пучок в двумерной системе координат

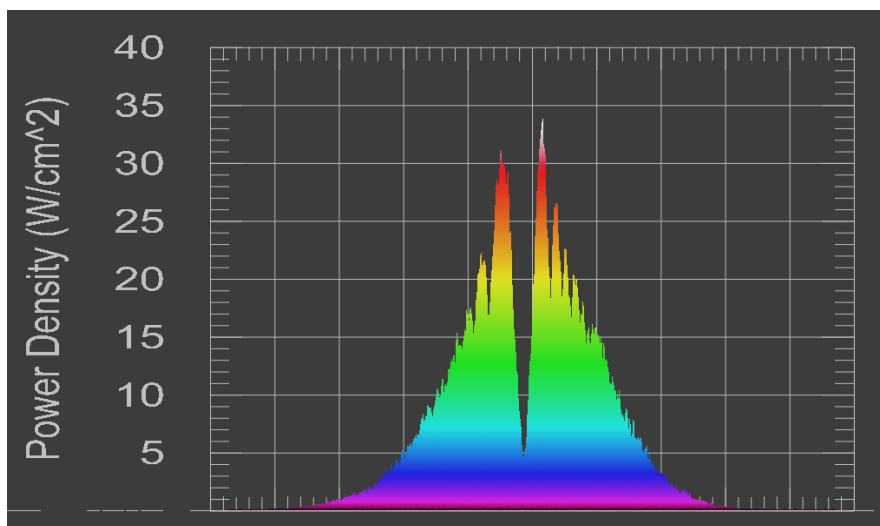


Рисунок 3.6 – Профиль распределения интенсивности фазированного пучка

На рисунках 3.4-3.6 представлены численные результаты параметров фазированного пучка. Для сравнения теоретических расчетов и экспериментальных данных все результаты приведем в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты моделирования и экспериментальной части

Параметры	Моделирование	Эксперимент
Диаметр пучка d , мм	3,8	3,6
Интенсивность левой части пучка $I_{л}$, норм. зн.	1	0,912
Интенсивность правой части пучка $I_{п}$, норм. зн.	1	1
Интенсивность в центре пучка $I_{ц}$, норм. зн.	0,01	0,145

Сравнив теоретические и экспериментальные данные, можно сделать вывод, что полученные результаты схожи.

Таким образом, экспериментальная часть подтверждает теоретическое моделирование.

Схема экспериментальной установки, преобразующей оптический сигнал в дифрагированный пучок, изображена на рисунке 3.7.

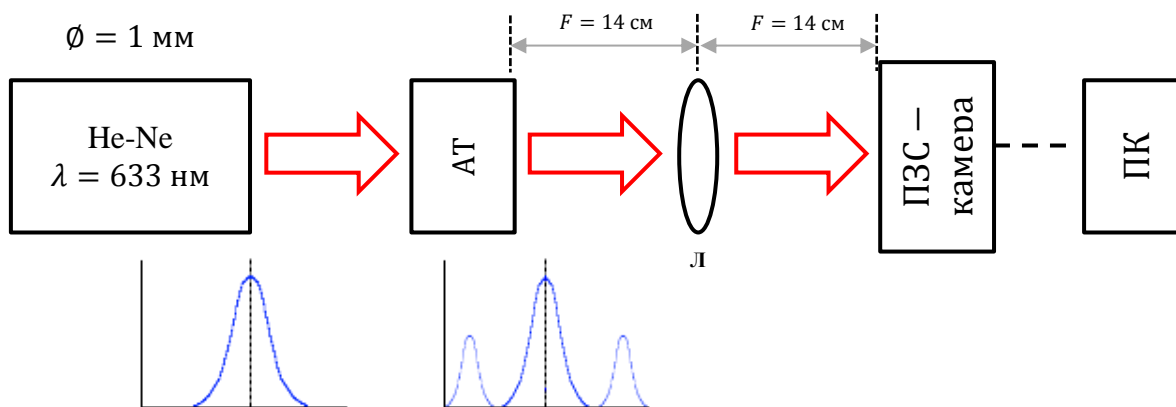


Рисунок 3.7 – Схема экспериментальной установки с амплитудным транспарантом с $\Lambda = 16$ мкм

Источником излучения послужил He-Ne лазер с длиной волны $\lambda = 633$ нм. Диаметр выходного пучка $\Phi = 1$ мм. Далее излучение падает на АТ, на выходе которого наблюдается дифракционная картина (рисунок 3.9). Линза с фокусным расстоянием $F = 140$ мм фокусирует изображение на выходе АТ, которое фиксируется анализатором лазерных пучков (АЛП). Окончательная информация регистрируется при помощи ПК в программе BeamStar (рисунок 3.8).

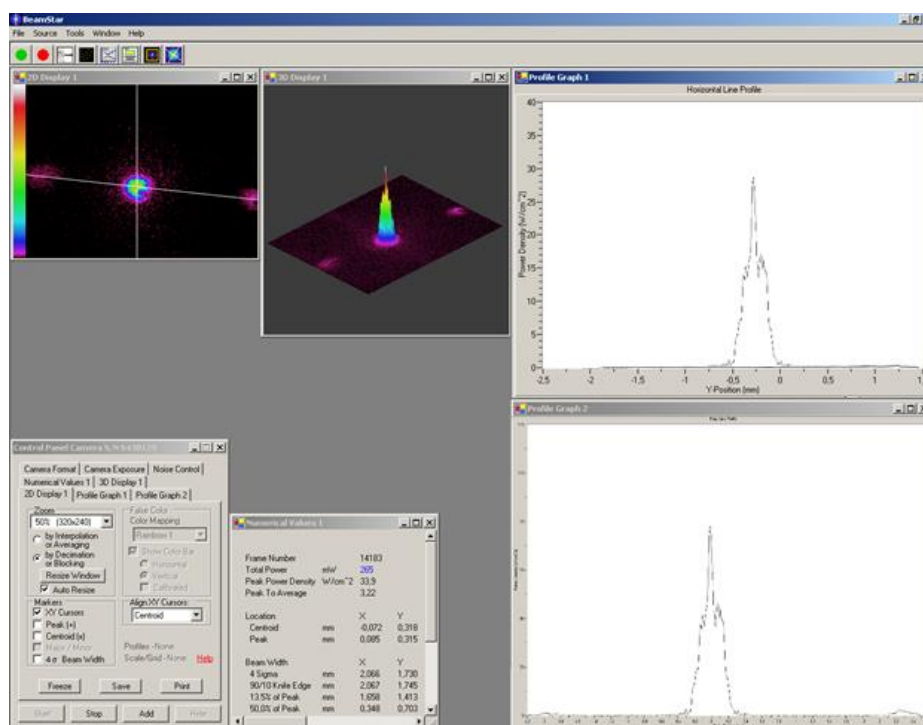


Рисунок 3.8 – Фиксация результатов в программе BeamStar

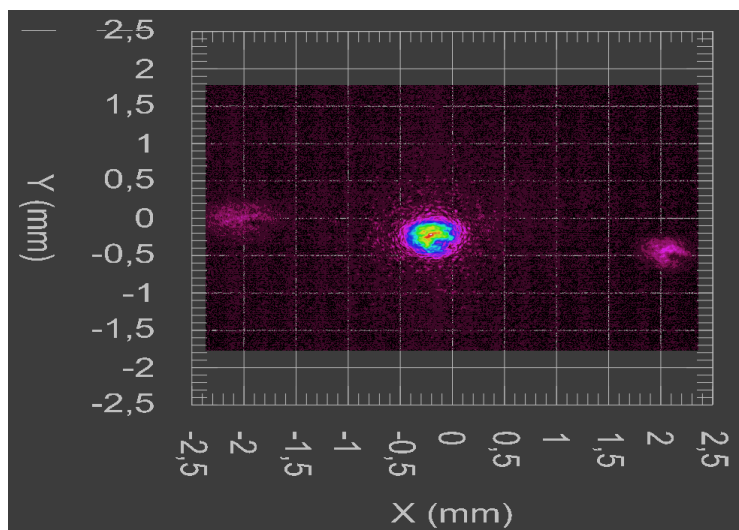


Рисунок 3.9 – Дифракция прошедшего через транспарант оптического сигнала

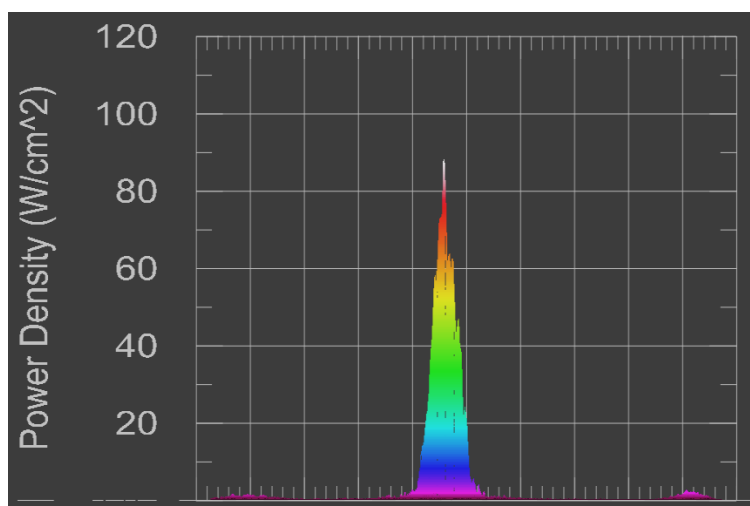


Рисунок 3.10 – Профиль распределения интенсивности дифрагированного пучка

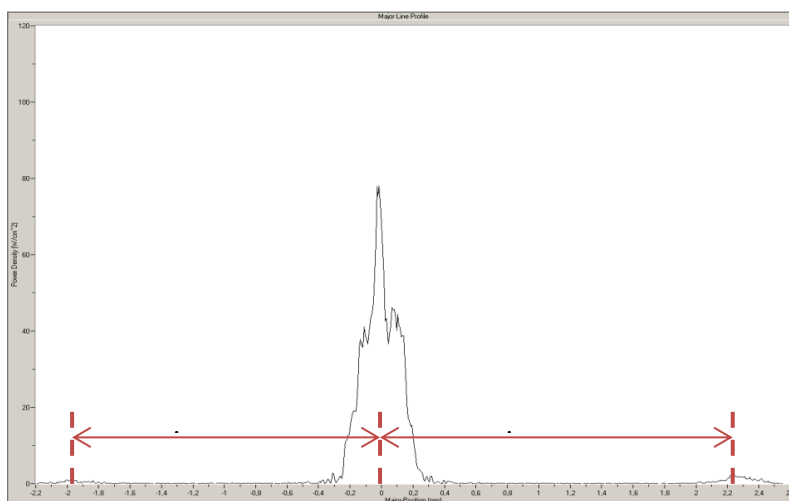


Рисунок 3.11 – Период между основным и боковыми дифракционными максимумами

На рисунках 3.8-3.11 представлены численные результаты параметров дифрагированного пучка. Для сравнения теоретических расчетов и экспериментальных данных все результаты приведем в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты моделирования и экспериментальной части

Параметры	Моделирование	Эксперимент
Период между левым и центральным максимумами Λ , мм	1,65	1,95
Период между правым и центральным максимумами Λ , мм	1,7	2,3
Интенсивность левого максимума $I_{л}$, норм. зн.	1	0,02
Интенсивность центрального максимума $I_{ц}$, норм. зн.	1	1
Интенсивность правого максимума $I_{п}$, норм. зн.	1	0,04

Сравнив теоретические и экспериментальные данные, необходимо сделать вывод о степени их соответствия.

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 Двумерный оптический сигнал, его информационная структура.
- 2 Скалярная теория дифракции: формула Гюйгенса-Френеля, дифракции Френеля и Фраунгофера.
- 3 Преобразование световых полей элементами оптических систем
- 4 Преобразование Фурье (прямое) в оптической системе.
- 5 Обратное преобразование Фурье в оптической системе.
- 6 Операция интегрирования в оптической системе.
- 7 Операция фильтрации в оптической системе.
- 8 Операция дифференцирования в оптической системе.
- 9 Вычисление функции свертки в оптической системе.

6 Рекомендуемая литература

- 1 Дубнищев, Ю.Н. Теория и преобразование сигналов в оптических системах [Электронный ресурс] : учеб. пособие — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2011. — 368 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/698>. — Загл. с экрана. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/698> (дата обращения: 20.06.2018).
- 2 Оптические и акустооптические системы обработки информации: Учебное пособие / Башкиров А. И. - 2012. 100 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/1819> (дата обращения: 20.06.2018).

3 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2 АКУСТООПТИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО ВВОДА ИНФОРМАЦИИ В ОПТИЧЕСКУЮ СИСТЕМУ

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение.....	42
2. Ход работы	42
3. Содержание отчета.....	46
4. Контрольные вопросы.....	47
5. Рекомендуемая литература.....	47

1 Введение

Цель работы: изучение принципов работы акустооптического анализатора спектра (АОАС) в режиме дифракции Брэгга. Измерение полосы частот в узкополосном и широкополосном режимах, оценка дифракционной эффективности η_d и длины взаимодействия светозвукопровода d .

В ходе работы необходимо:

1. Изучить принцип работы АОАС.
2. Собрать экспериментальную установку для измерения параметров АОАС.
3. Провести измерения рабочей полосы частот и дифракционной эффективности АОАС в узкополосном и широкополосном режимах .
4. Провести оценку расчетных параметров АОАС и сравнить с экспериментально полученными.

2 Ход работы

Собрать экспериментальную установку для измерения параметров АОАС.

Схема экспериментальной установки для измерения полосы частот представлена на рисунке 2.1.

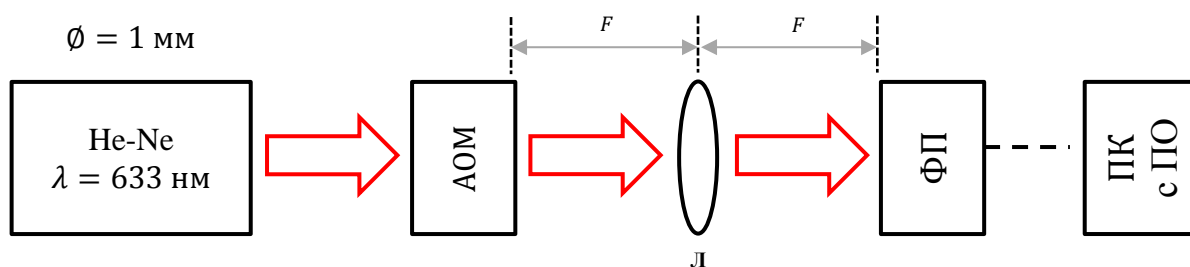


Рисунок 2.1 – Схема экспериментальной установки для измерения полосы частот

Схема экспериментальной установки для измерения дифракционной эффективности η_d представлена на рисунке 2.2.

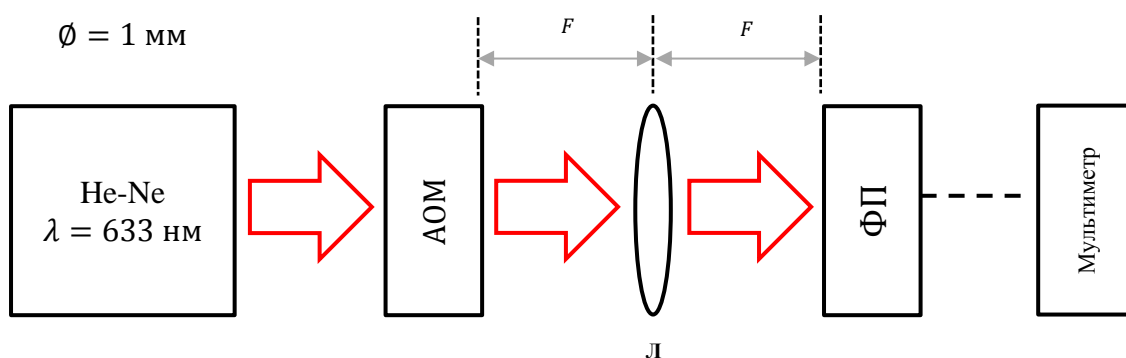


Рисунок 2.2 – Схема экспериментальной установки для измерения дифракционной эффективности

Источником излучения послужил He-Ne лазер с длиной волны $\lambda = 633 \text{ нм}$. Диаметр выходного пучка $\varnothing = 1 \text{ мм}$. Далее излучение подается на акустооптический модулятор (АОМ), на выходе которого наблюдается дифракция Брэгга. После АОМ излуче-

ние поступает на фотоприемник (ФП), с помощью которого измеряются фототоки основного и бокового дифракционного максимумов. С помощью ПК в ПО для АОАС «Анализатор цепей скалярный Р2М» регистрируются спектральные характеристики излучения (рисунок 2.3).

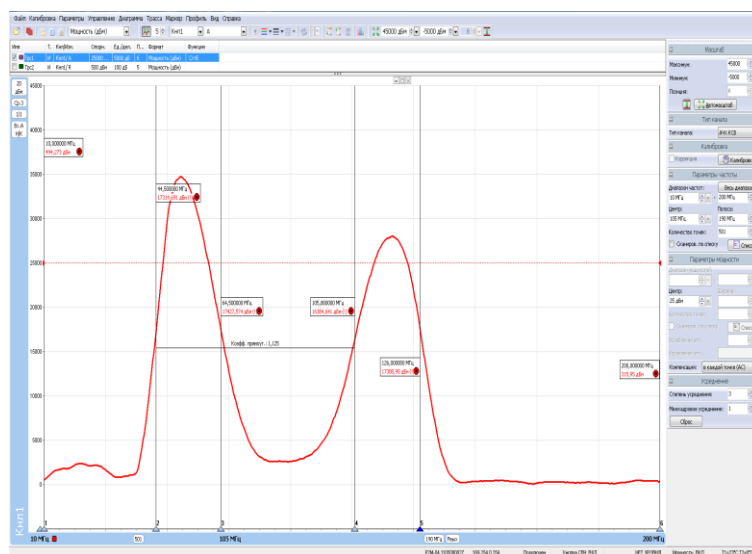


Рисунок 2.3 – Общий вид ПО «Анализатор цепей скалярный Р2М»

Провести измерение и анализ частотной зависимости дифракционной эффективности АОАС в узкополосном режиме, типовая характеристика которой представлена на рисунке 2.4.

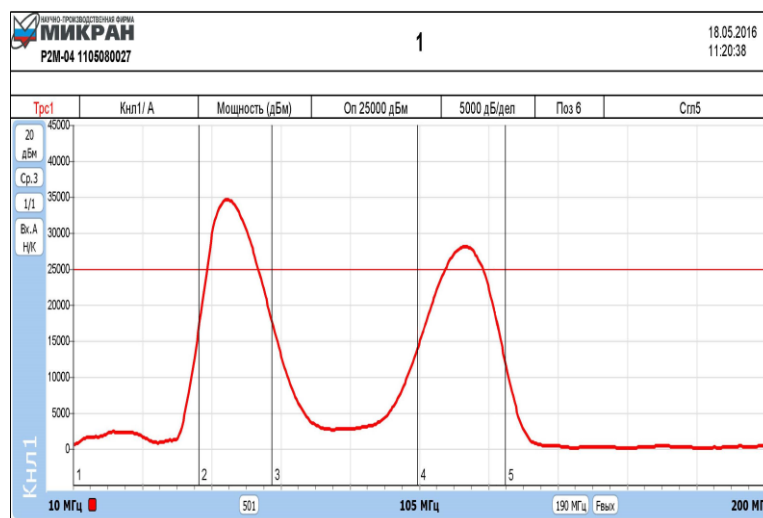


Рисунок 2.4 – Частотная характеристика АОАС в узкополосном режиме

Результаты измерений для данного режима занести в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты измерений спектра излучения в широкополосном режиме

Маркеры	2	3	4	5	Δf_{III}
Частота, МГц	44,5	64,5	104,8	129,5	20
Амплитуда, мкА	17431,866	17059,689	14704,531	12687,82	–

Провести измерение и анализ частотной зависимости дифракционной эффективности АОАС в широкополосном режиме, типовая характеристика которой представлена на рисунке 2.5..

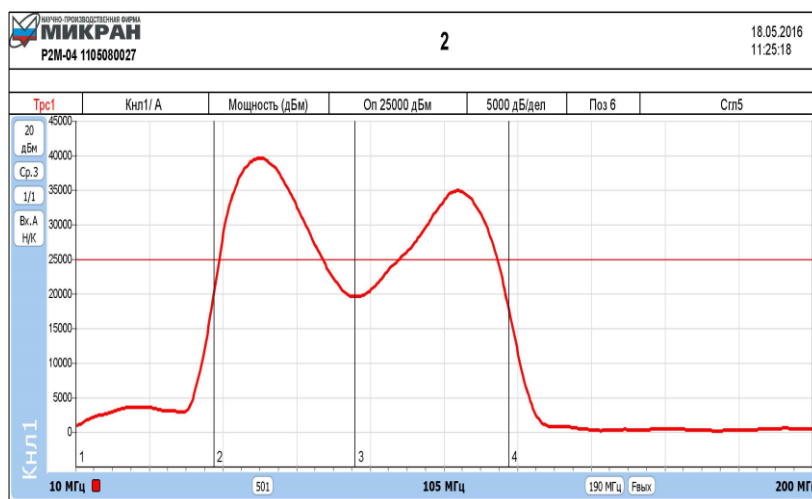


Рисунок 2.5– Анализ спектра излучения в широкополосном режиме

Результаты измерений для данного режима занести в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты измерений в узкополосном режиме

Маркеры	2	3	4	Δf_y
Частота, МГц	45,5	88,9	119,5	75,3
Амплитуда, мкА	19527,788	17189,313	19935,889	–

Провести измерение и анализ частотной зависимости дифракционной эффективности АОАС в режиме слияния дифракционных максимумов, типовая характеристика которой представлена на рисунке 2.6.

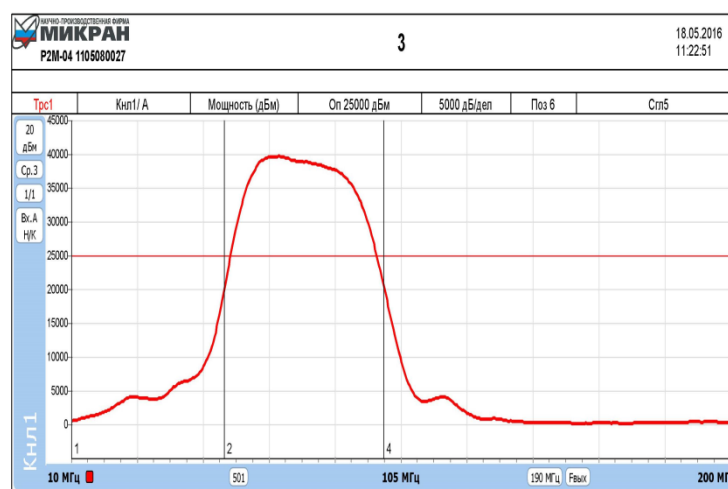


Рисунок 2.6 – Частотная характеристики в режиме слияния дифракционных максимумов частотной характеристики

Результаты измерений для данного режима занести в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 – Результаты измерений в режиме слияния дифракционных максимумов

Маркеры	2	3	4
Частота, МГц	54	200	100
Амплитуда, мкА	20189,314	239,598	20283,523

Провести измерение дифракционной эффективности АОАС. Результаты измерения мультиметром занести в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Результаты измерений мультиметром

Параметры	$I_{\text{шум}}$	$I_1 + I_{\text{шум}}$	$I_0 + I_{\text{шум}}$	$(I_1 + I_0) + I_{\text{шум}}$
Фототок, мА	-0,004	0,017	0,359	0,376

Дифракционная эффективность оценивается как:

$$\eta_d = \frac{I_1}{I_1 + I_0} = \frac{0,017}{0,359} = 0,047.$$

Провести оценку длины взаимодействия светозвукопровода d АОАС для узкополосного и широкополосного режимов.

Для узкополосного режима:

$$\Delta f_y = \frac{5,55 \cdot v^2 \cdot n_d}{\pi \cdot d \cdot \lambda \cdot f_0},$$

где $v = 650$ м/с – скорость распространения акустической волны;

$n_d = 2,26$ – показатель преломления материала светозвукопровода (TeO_2);

$\lambda = 0,633$ мкм – длина волны источника излучения.

Из выражения вычислим d :

$$d = \frac{5,55 \cdot v^2 \cdot n_d}{\pi \cdot \Delta f_y \cdot \lambda \cdot f_0},$$

где Δf_y – полоса частот дифракции:

$$\Delta f_y = f_{\max} - f_{\min} = 64,5 - 44,5 = 20 \text{ МГц.}$$

Тогда:

$$d = \frac{5,55 \cdot v^2 \cdot n_d}{\pi \cdot \Delta f_y \cdot \lambda \cdot f_0} = \frac{5,55 \cdot 650^2 \cdot 2,26}{3,14 \cdot 20 \cdot 10^6 \cdot 0,633 \cdot 10^{-6} \cdot 55 \cdot 10^6} = 2,423 \cdot 10^{-3} \text{ м} \approx 2,5 \text{ мм}$$

Для широкополосного режима:

$$\Delta f_{\text{ш}} = 2 \cdot v \cdot \sqrt{\frac{n_d}{\lambda \cdot d}} \Rightarrow d = \frac{4v^2 \cdot n_d}{\Delta f_{\text{ш}}^2 \cdot \lambda}$$

$$\Delta f_{\text{ш}} = f_{\max} - f_{\min} = 120,8 - 45,5 = 75,3 \text{ МГц,}$$

$$d = \frac{4v^2 \cdot n_d}{\Delta f_{\text{ш}}^2 \cdot \lambda} = \frac{4 \cdot 650^2 \cdot 2,3}{75,3^2 \cdot 10^{12} \cdot 0,633 \cdot 10^{-6}} = 1,083 \cdot 10^{-3} \text{ м} \approx 1,1 \text{ мм.}$$

3 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.

4 Контрольные вопросы

- 1 Как определить полосу частот АОАС?
- 2 Как можно настроить оптическую схему, в которой необходимо реализовать прямое и обратное преобразование Фурье и пространственную оптическую фильтрацию?
- 3 Как в схеме, где реализуется прямое и обратное преобразование Фурье, изменится изображение в выходной плоскости, по сравнению со входным изображением?
- 4 Что характеризует частотная зависимость дифракционной эффективности АОС?
- 5 Чем определяется разрешающая способность АОАС?

5 Рекомендуемая литература

- 1 Дубнищев, Ю.Н. Теория и преобразование сигналов в оптических системах : учеб. пособие. — Санкт-Петербург : Лань, 2011. — 368 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/698> (дата обращения: 20.06.2022).
- 2 Оптические и акустооптические системы обработки информации: Учебное пособие / Башкиров А. И. - 2012. 100 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/1819> (дата обращения: 20.06.2022).

4 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3 ОПТИЧЕСКИЙ МУЛЬТИПЛЕКСОР НА ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ФИЛЬТРАХ

Содержание

1. Введение.....	50
2. Мультиплексоры на интерференционных фильтрах.....	50
3. Рекомендации по выполнению работы.....	59
4.1. Расчётное задание	59
4.2. Экспериментальное задание	61
4. Содержание отчета.....	62
5. Контрольные вопросы.....	62
Список литературы.....	62

1 Введение

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

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 разработка 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).

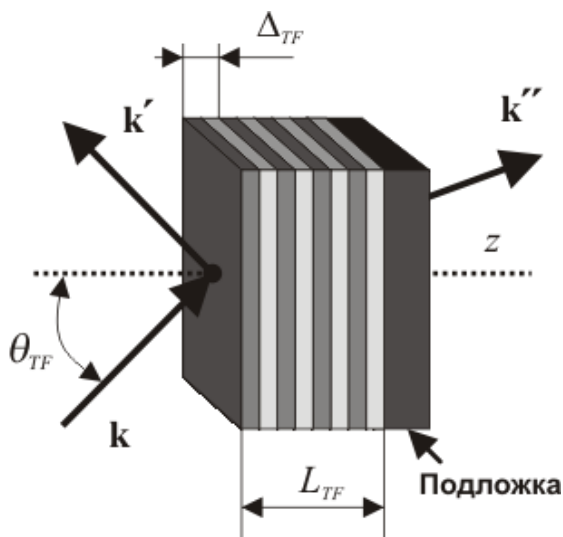


Рисунок 2.1 – Конструкция интерференционного фильтра, где n_1 и n_2 – показатели преломления слоев, L_{TF} – толщина структуры, Δ_{TF} – период структуры, \mathbf{k} , \mathbf{k}' , \mathbf{k}'' – волновые вектора падающей, отражённой и прошедшей световых волн, θ_{TF} – угол падения волн.

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 LTF 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 – ΔTF и определить угол падения светового пучка на фильтр – θTF .

Расчётные формулы для определения параметров фильтра приведены в литературе [1] а техника нанесения слоёв 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 рисунке 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 попадал обратно в общий сигнал.

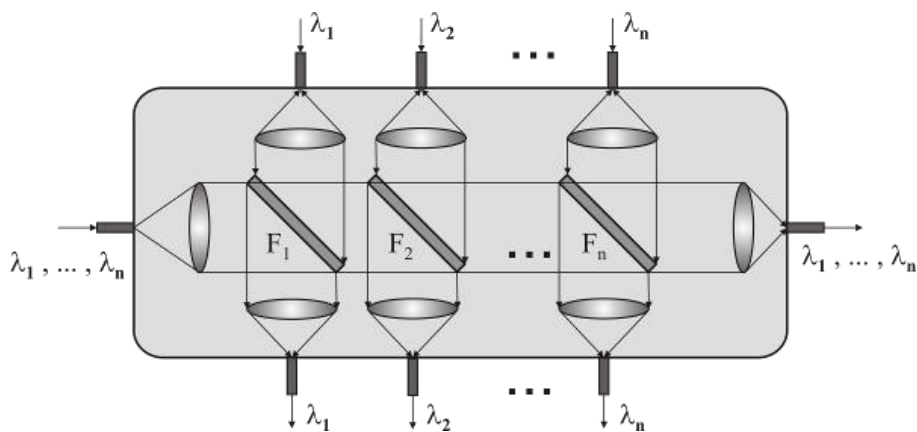


Рисунок 2.2 – Мультиплексор/демультиплексор на основе многоступенчатой системы тонкопленочных фильтров, где F_1, F_2, \dots, F_n – набор фильтров, настроенных каждый на свою длину волны.

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].

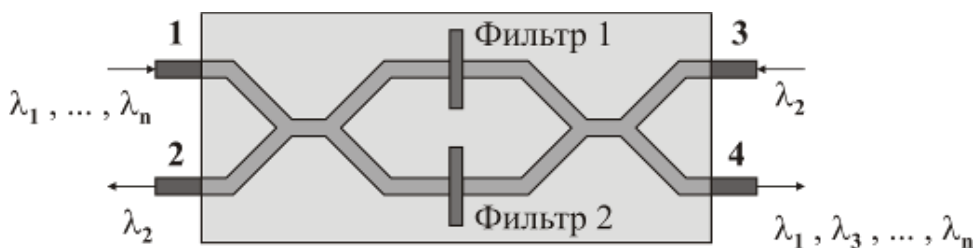


Рисунок 2.3 – Модуль мультиплексирования/демультиплексирования одного канала, на основе интерференционных фильтров и интерферометра Маха-Цендера.

Рассмотрим принцип действия этого устройства на примере выделения второго канала с λ_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 λ_2) в групповой сигнал, через порт 3. Структурная схема демультиплексора на основе этого модуля, представлена на рисунке 2.4.

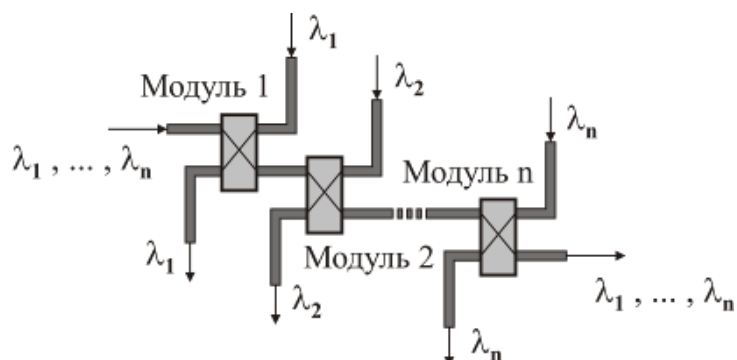


Рисунок 2.4 – Мультиплексор/демультиплексор на основе интерферометров Маха-Цендера.

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

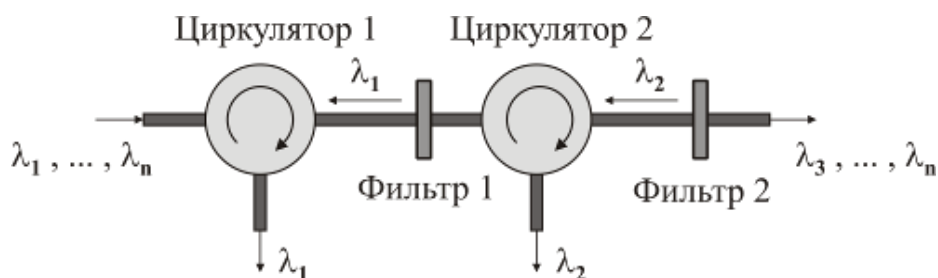


Рисунок 2.5 – Демультиплексор на основе циркулятора.

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.

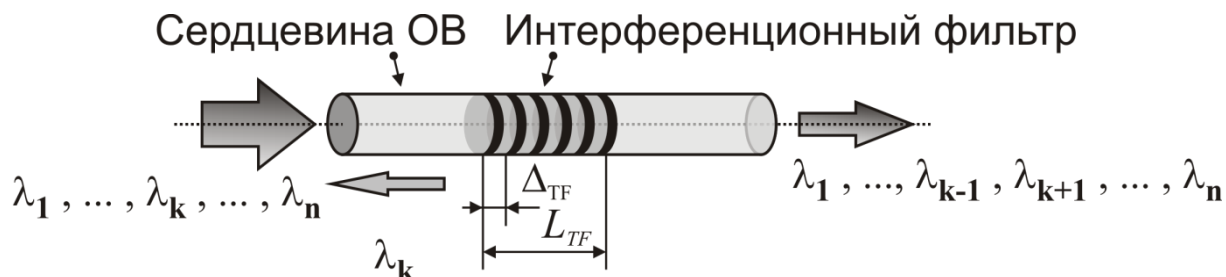


Рисунок 2.6 – Конструкция интерференционного фильтра, выполненного в оптическом волокне (волоконная решётка).

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).

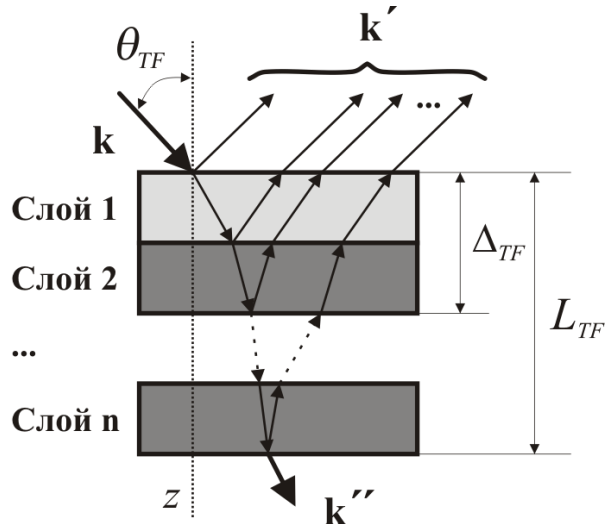


Рисунок 2.7 – Брэгговское отражение

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^{-ikz} 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 ТМ-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 λ 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.

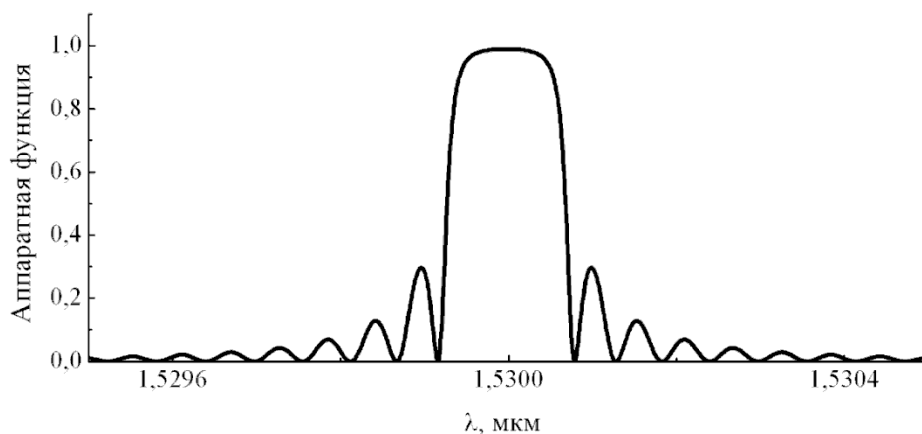


Рисунок 2.8 – Типичный вид аппаратной функции интерференционного фильтра.

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

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

Прежде всего, каждый фильтр должен быть настроен на свою длину волны λ_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:

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

Так как речь идёт о фильтре настроенном на отражение центральной длины волны λ_i , то индекс i у коэффициента передачи опускаем. Из этого выражения найдём λ_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° , либо 45°). 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 λ_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 Δn и толщина структуры L_{TF} .

Важно подобрать такие значения этих параметров, чтобы коэффициент отражения для λ_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 λ_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 Δn . 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 Δn :

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

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

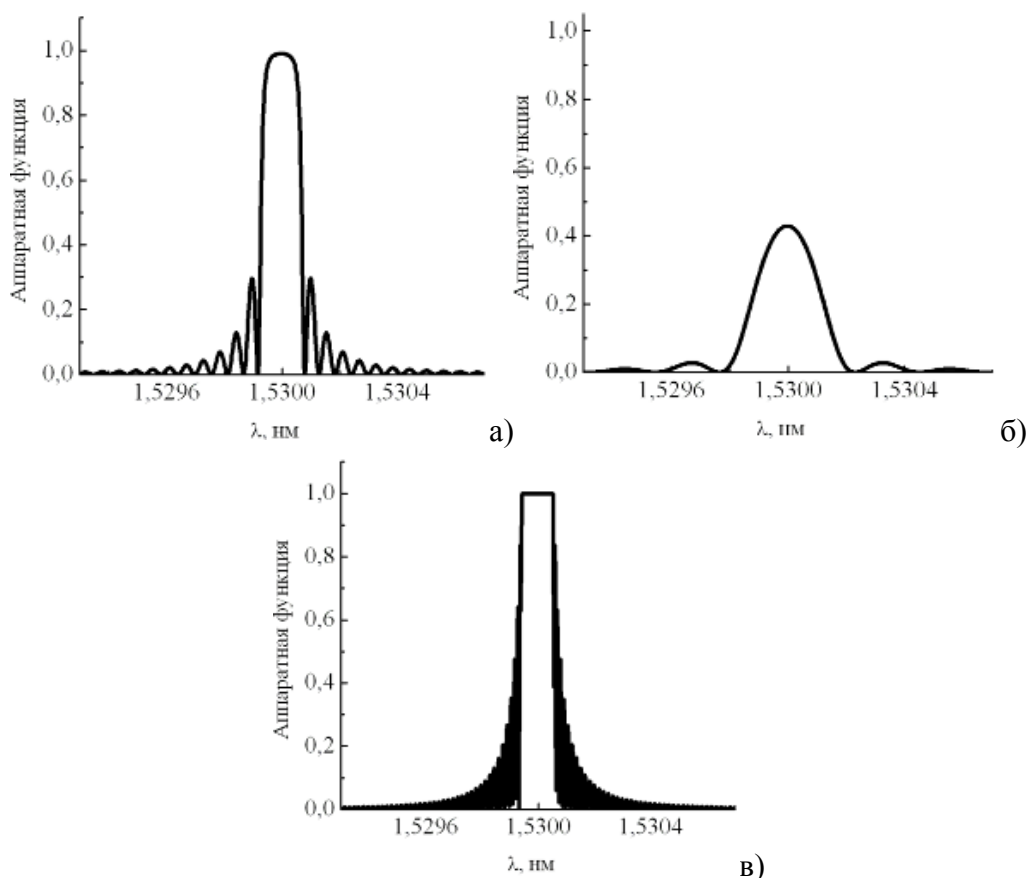


Рисунок 2.9 – Аппаратные функции тонкоплёночных фильтров, рассчитанных при различных значениях L_{TF} (мкм): а) 5.725, б) 1.5, в) 20.

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

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

Вывод

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

1. Определить угол падения светового пучка на фильтры θ_{TF} , исходя из схемы построения демультиплексора (рисунки 2.2, 2.4, 2.6);

2. Исходя из частотного плана ITU-T, выбрать центральные частоты информационных каналов (λ_i) и число каналов (\mathbf{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 Δn .
7. Варьируя значение Δn 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.

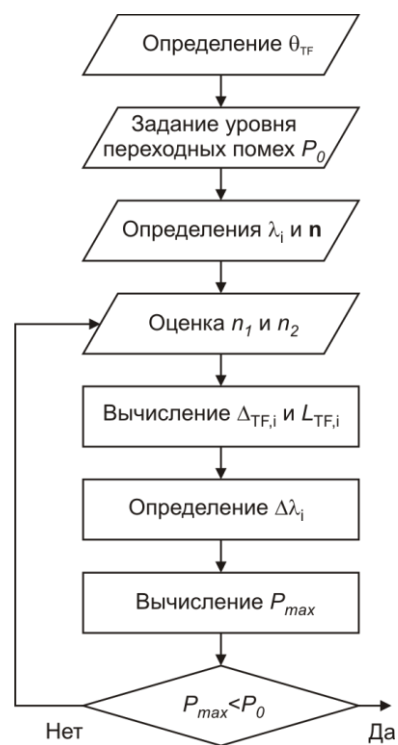


Рисунок 2.10 – Блок-схема построения демультимплектора на основе интерференционных фильтров.

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

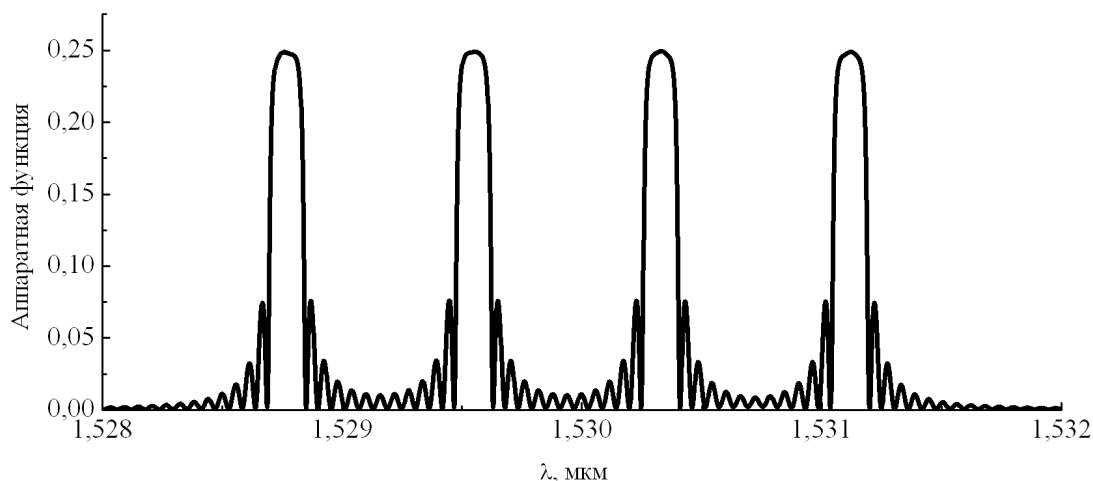


Рисунок 2.11 – Аппаратная функция демультимплектора на основе интерференционных фильтров.

4 Рекомендации по выполнению работы

4.1 Расчётное задание

1. Согласно своему варианту задания, из таблицы 1 получить исходные данные для расчёта демультиплексора.
2. По таблице ИТУ-Т найти число каналов n и центральные частоты λ_i .

Таблица 4.1 – Исходные данные для выполнения работы

Параметры	Вариант				
	1	2	3	4	5
Диапазон длин волн*	1528,77 – 1532,68 нм	1528,77 – 1536,61 нм	1546,12 – 1554,13 нм	1539,77 – 1549,32 нм	1535,82 – 1538,98 нм
Δf_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 – 1553,33 нм	1533,47 – 1542,94 нм	1546,12 – 1554,13 нм	1535,04 – 1557,36 нм	1530,33 – 1536,61 нм
Δf_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 – 1554,13 нм	1550,92 – 1560,61 нм	1533,47 – 1557,36 нм	1533,47 – 1557,36 нм	1541,35 – 1550,92 нм
Δf_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 демультиплексор.

*** – 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_l 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 Δn занести в таблицу:

Параметр/ № фильтра	1	2	...	n
λ_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
λ_i				
n				
R_{FP}				
L_{FP}				

4.2 Экспериментальное задание

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

Исследование оптического демультиплексора, на основе интерференционного фильтра.

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

Параметр / Δn	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 функций демультиплексоров и рассчитанные графики пе-

реходных помех, при различных значениях Δn . 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 Δn , который удовлетворял бы уравнению $P_{max}(\Delta n) = P_0 \pm 1$ дБ. Обозначим его как Δn_{opt} .
3. Рассчитать конструкционные параметры фильтров, при Δn_{opt} . На основе полученных параметров смоделировать аппаратную функцию демультиплексора и рассчитать переходные помехи. Результаты занести в таблицу:

Параметр / № фильтра	1	2	...	n
λ_i				
$\Delta n_{opt i}$				
Δ_{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.

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?

Список литературы

1. Скляров, О.К. Волоконно-оптические сети и системы связи [Электронный ресурс] : учеб. пособие / О.К. Скляров. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2018. — 268 с. — [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/104959>

(дата обращения: 20.06.2022).

2. Заславский К.Е. Волоконно-оптические системы передачи со спектральным уплотнением: Учебное пособие для вузов. - Новосибирск: СибГУТИ, 2005. – 136 с.
3. 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.
4. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи (4-е, дополненное издание)- М. : Эко-Тренд. 2007. -512 с..
5. Фокин В.Г. Оптические системы передачи и транспортные сети. Учебное пособие .- М.: Эко-Трендз, 2008. -288 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 интерференционных фильтров и фильтров Фабри-Перро» .- М.: ВНИИЦ, 2006. - № 50200501792.

5 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4 ОПТИЧЕСКИЙ УСИЛИТЕЛЬ НА ДОПШИРОВАННОМ ВОЛОКНЕ

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ.....	65
2. Теоретический материал по EDFA	65
3. Рекомендации по выполнению работы.....	71
4. Содержание отчета.....	73
5. Контрольные вопросы.....	73
Список литературы.....	74

1 Введение

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

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 ${}^4I_{13/2}$ (двух-уровневая модель) и уравнений распространения для оптической мощности $P(z)$.

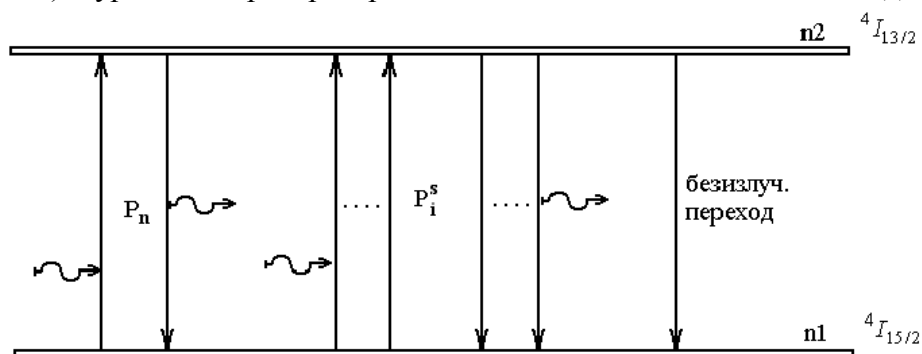


Рисунок 2.1 - Диаграмма рабочих уровней при наличии накачки и информационных сигналов.

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 ${}^4I_{13/2}$:

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

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) 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,

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

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

$\alpha(\lambda)$ и $g^*(\lambda)$ – спектральные коэффициенты поглощения и усиления активной среды;
 $\Gamma = n_i S_E / S_f = n_i d_E^2 / d_f^2$ – 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 σ_a и σ_e представлены на рис. 2.2.

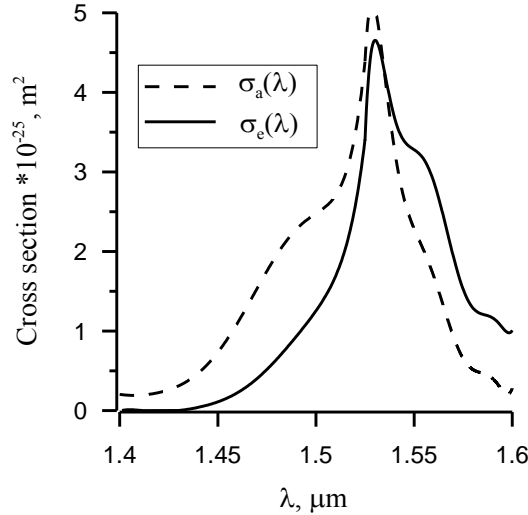


Рисунок 2.2 - Эффективные сечения поглощения (σ_a) и излучения (σ_e).

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

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

где индекс k принимает значение (s) - 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 OH^- , а также рассеиванием вследствие растреклования 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 частотой $f > 10$ кГц для описания EDFA достаточно исследовать стационарный режим, т.о. найдем решение системы уравнений (2.4), (2.10) при $d/dt=0$. 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:

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

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

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 :

$$U_p = 1 \text{ – для прямой накачки;}$$

$$U_p = -1 \text{ – для обратной накачки.}$$

$U_p = 0$, $P_p = 2P_p$ – 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).

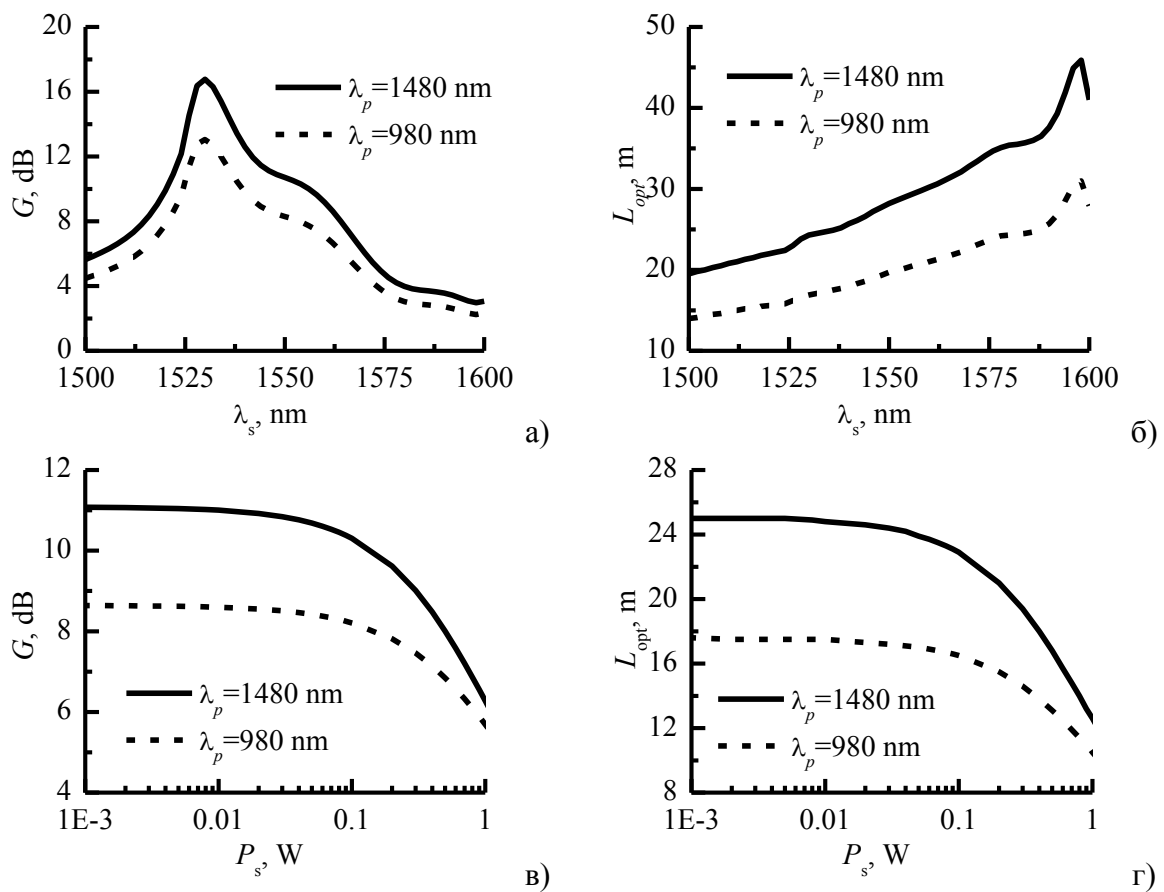


Рисунок 2.2

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

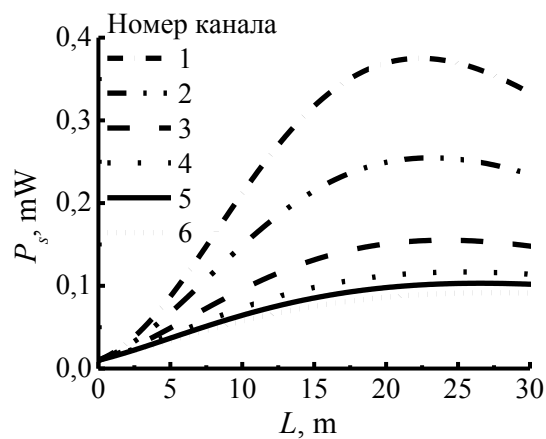


Рисунок 2.4

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).

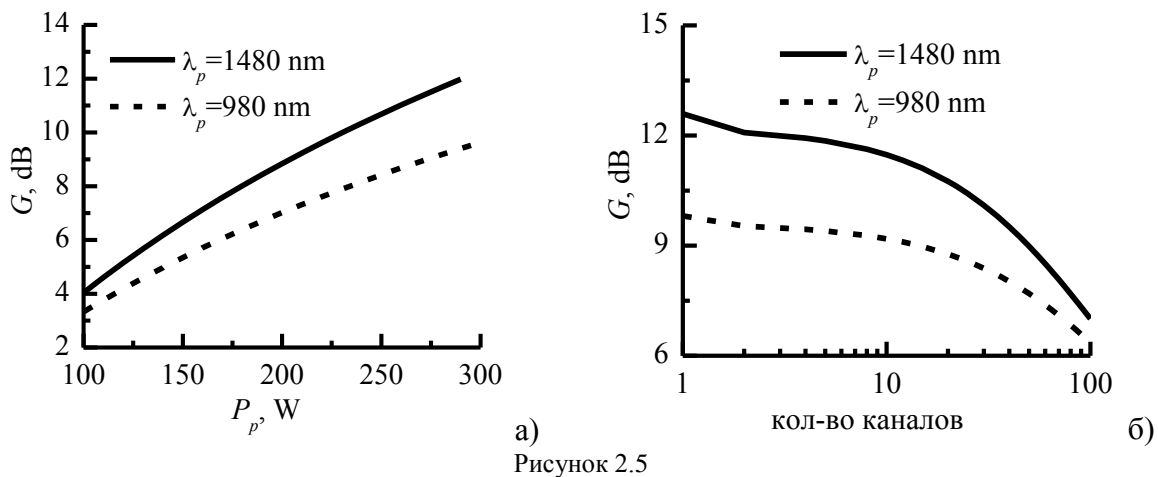


Рисунок 2.5

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 коэффициента усиления K_{max} от мощности сигнала P_s в диапазоне от 0,001 мВт до 0,5 мВт для $\lambda_p = 1480$ нм и $\lambda_p = 980$ нм. (P_p и λ_s задаются вариантом задания)
2. Исследовать зависимость максимального коэффициента усиления K_{max} от мощности накачки P_p в диапазоне от 100 до 300 мВт, для $\lambda_p = 1480$ нм и $\lambda_p = 980$ нм. (P_s и λ_s задаются вариантом задания)
3. Исследовать зависимость максимального коэффициента усиления K_{max} от длины

волны сигнала λ_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 $+40^0$ С, для $\lambda_p=1480$ нм и $\lambda_p=980$ нм. (λ_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 , λ_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 (λ_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.

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

Таблиц 2.1 - Варианты заданий

№ варианта	Тип усилителя	P_s , mW	λ_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?

Список литературы

8. Скляр, О.К. Волоконно-оптические сети и системы связи [Электронный ресурс] : учеб. пособие / О.К. Скляр. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2018. — 268 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/104959> (дата обращения: 20.06.2022).
9. Заславский К.Е. Волоконно-оптические системы передачи со спектральным уплотнением: Учебное пособие для вузов. - Новосибирск: СибГУТИ, 2005. – 136 с.
10. 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.
11. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи (4-е, дополненное издание)- М. : Эко-Тренд. 2007. -512 с..
12. Фокин В.Г. Оптические системы передачи и транспортные сети. Учебное пособие .- М.: Эко-Трендз, 2008. -288 с.
13. РД 45.286-2002. Руководящий документ отрасли аппаратура волоконно-оптической системы передачи со спектральным разделением. Технические требования.

Приложение А

Частотный план ITU-T

Таблица 1 Частотный план WDM по рекомендации МСЭ-T 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
192,4	•						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	25	50	100	(5)
(1)	(2)	(3)	(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
□	□	□	□	□
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

Номинальная центральная частота, ТГц Частотный интервал между каналами, ГГц				Номинальное значение длины волны, нм
12,5	25	50	100	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
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	
	200	200	100	100	50	50	100	100	100	50
Расстояние между оптическими каналами, ГГц										
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	50		25		50		25			
-20 дБ, не менее, ГГц	80		40		80		40			
4 ЛР №1 потери, не более, дБ	0,5									
5 Переходная помеха от смежного оптического канала, не более, дБ	-30									
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. Напри-мер, 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 мультиплексирования DWDM, кросс-коммутации, маршрутизатора IP, коммутатора ATM и мультиплексоров SDH.

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, ATM, 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. 1.6–1.8 приведены параметры оптических терминальных демультиплексов, мультиплексов ввода/вывода и линейных усилителей оборудования DWDM «Пуск».

Таблица 1.6

Параметры оптических терминальных демультиплексов

Наименование параметров		Значение параметров									
		8		16		40		80		160	
Количество оптических каналов		8		16		40		80		160	
Расстояние между оптическими каналами, ГГц		200	200	100	100	50	50	100	100	50	
Отклонение центральной частоты оптического канала, не более, ГГц		± 5,0			±3,0		± 5,0		± 3,0		
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 1.7 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	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			

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 пропускной 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. 1.8–1.9 приведены параметры оптического демультиплексора и линейного усилителя оборудования OptiX BWS 320G.

Таблица 1.8

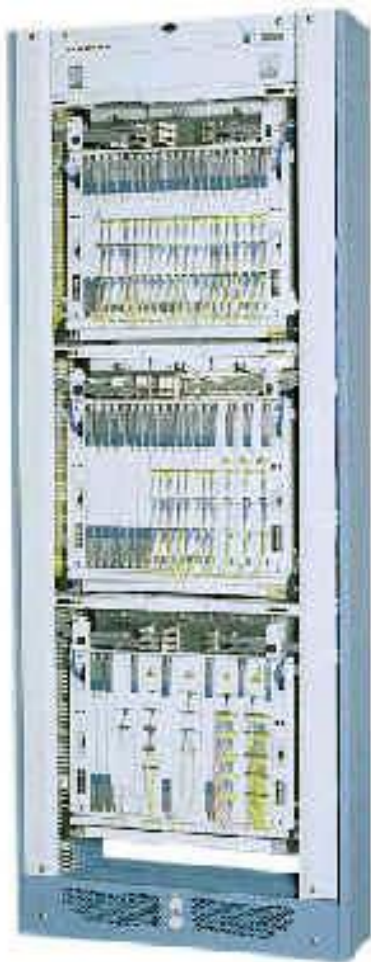
Параметры оптического демультиплексора

Название параметра	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 1.9

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



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 мульти-сервисные 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 1.10

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 1.9

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

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 1.9

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

Сравнительные характеристики оборудования

В табл. 1.10 представлена сравнительная характеристика оптических мультиплексоров ввода/вывода рассмотренных выше WDM-систем.

Таблица 1.10

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 «Ирэ-Полос»)
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-пленочный	AWG	тонко-пленочный	AWG	тонко-пленочный

В табл. 1.11 дана сравнительная характеристика терминальных оптических мультиплексоров.

Таблица 1.11

Характеристики терминальных мультиплексоров

Фирма	Optix BWS 320G (Huawei)	Spectral Wave 40/80 DWDM System (NEC)	«Пуск» (НТО «Ирэ-Полос»)
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. 1.12 представлена сравнительная характеристика оптических линейных усилителей рассмотренных выше WDM-систем передачи.

Таблица 1.12

Характеристики оптических линейных усилителей

Фирма	Optix BWS 320G (Huawei Company)	SpectralWave 40/80 DWDM System (NEC)	1640 WM (Alcatel)	«Пуск» (НТО «Ирэ-Полнос»)
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. Слепов Н.Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи (ATM, PDH, SDH, SONET и WDM) / Н.Н. Слепов. – М. : Радио и связь, 2003. – 468 с.
2. Волоконно-оптические сети и системы связи / О.К. Складов. – С-Пб : Лань, 2018. – 268 с.
3. Волоконно-оптические системы связи / Р. Фриман ; пер. с англ.; под ред. Н.Н. Слепова. – 3-е изд., доп. – М. : Техносфера, 2006. – 495 с.
4. Оптические телекоммуникационные системы. Учебник для вузов/ В. Н. Гордиенко, В. В. Крухмалев, А. Д. Моченов, Р. М. Шарифутдинов . Под ред. Профессора ; под ред В. Н. Гордиенко. – М: Горячая линия – Телеком, 2011. – 368 с.
5. Заславский К.Е. Волоконно-оптические системы передачи со спектральным уплотнением : учеб. пособие для вузов / К.Е. Заславский. – Новосибирск : СибГУТИ, 2005. – 136 с.
6. Жирар Андрэ. Руководство по технологии и тестированию систем WDM / Андрэ Жирар ; пер. с англ.; под ред. А.В. Шмалько. – М. : EXFO, 2001 – 264 с.
7. Листвин В.Н. DWDM системы: научное издание / Листвин В.Н. Трещиков В.Н.. – М. : Издательский Дом «Наука», 2013. – 300 с.
8. Измерительное, монтажное и кроссовое оборудование для сетей связи. Каталог 2002. – М. Группа компаний ТКС. – 2002. – 67 с. – Режим доступа : <http://www.tkc.ru/katalog/katalog2002.html> (дата обращения 18.09.2022).
9. РД 45.286-2002 Аппаратура волоконно-оптической системы передачи со спектральным разделением. Технические требования . – 2002. – 21 с.
10. РД 45.186-2001 Аппаратура волоконно-оптических усилителей для применения на взаимосвязанной сети связи Российской Федерации. Технические требования.

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
Δ	— период следования слоев
θ	— наклон фильтров
λ	— длина волны
ε	— диэлектрическая проницаемость
k	— волновой вектор
$K(\lambda)$	— постоянная связи мод
$\Delta\beta(\lambda)$	— фазовое рассогласование
I_{\max}	— максимальное отражение от тонкопленочного фильтра
Δn	— 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
$\eta_{\text{д max}}$	— 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

**ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ И ОБРАБОТКИ
ИНФОРМАЦИИ**

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Учебно-методическое пособие по лабораторным занятиям
по дисциплине «Оптические системы связи и обработки информации»

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.