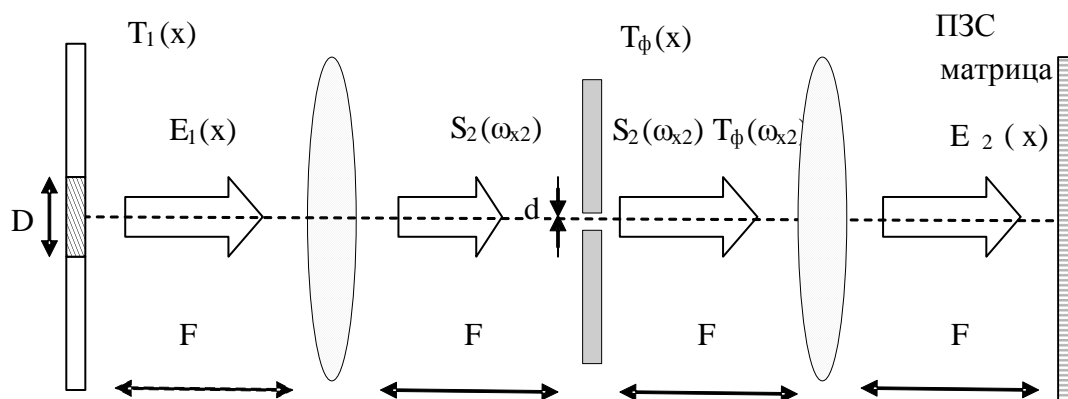


Г.Г. Куц, С.Н. Шарангович

# ОПТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА В РАДИОТЕХНИКЕ

Учебно-методическое пособие по практическим занятиям и  
 организации самостоятельной работы студентов  
 специальности 210302 «Радиотехника»



Министерство образования и науки Российской Федерации  
**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ  
(ТУСУР)**

Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники  
(СВЧиКР)

Утверждаю  
Зав. кафедрой СВЧиКР  
\_\_\_\_\_ С.Н. Шарангович  
" 1 " 11 2010г.

**ОПТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА  
В РАДИОТЕХНИКЕ**

Учебно-методическое пособие по практическим занятиям и  
организации самостоятельной работы студентов  
специальности 210302 «Радиотехника»

Разработчики:  
Доцент каф. СВЧиКР  
\_\_\_\_\_ Г.Г. Куш  
Профессор каф. СВЧиКР  
\_\_\_\_\_ С.Н. Шарангович

**УДК 621.391.63**

Рецензент:  
профессор каф..СВЧиКР

Мандель А.Е.

**Г.Г. Куц, С.Н. Шарангович**

Оптические устройства в радиотехнике: учебно-методическое пособие по практическим занятиям и организации самостоятельной работы / С.Н.Шарангович, Г.Г.Куц. – Томск: ТУСУР, 2010. – 46 с

Цель, преследуемая в данном пособии, достаточно полно и содержательно рассмотреть все виды самостоятельной работы при изучении дисциплины «Оптические устройства в радиотехнике».

Приводится программа курса, его цели и задачи. Каждый раздел программы заканчивается методическими указаниями со ссылкой на литературу. Представлены темы реальных и виртуальных лабораторных занятий, а также темы практических занятий с примерами решения типовых задач.

Представлен перечень индивидуальных расчетных заданий. Даны примеры решения расчетных работ. Приводится список экзаменационных вопросов.

Методические указания предназначены для студентов очной, заочной и вечерней и дистанционной форм обучения специальности 210302 «Радиотехника» по дисциплине «Оптические устройства в радиотехнике» и могут быть использованы студентами, обучающимися по направлениям подготовки бакалавриата «Радиотехника» и «Телекоммуникации».

**УДК 621.391.63**

© Томск. гос. ун-т систем упр. и  
радиоэлектроники, 2010

© Куц Г.Г., Шарангович С.Н. 2010

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ.....	6
2. СОДЕРЖАНИЕ ЛЕКЦИОННОГО КУРСА.....	8
2.1. Разделы лекционного курса.....	8
2.2. Разделы, вынесенные на самостоятельную работу.....	11
3. ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАНЯТИЯ.....	12
4. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ.....	13
4.1. Темы практических занятий .....	13
4.2. Примеры решения типовых задач.....	14
4.3. Контрольные работы №1-№4.....	19
5. ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ ЗАДАНИЯ.....	23
5.1. Расчетное задания №1.....	23
5.2. Расчетное задания №2.....	26
5.3. Расчетное задания №3.....	29
5.4. Расчетное задания №4.....	31
5.5. Пример выполнения расчетного задания.....	32
6. ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЕ ВОПРОСЫ.....	36
6.1. Перечень экзаменационных вопросов.....	36
6.2. Структура экзаменационного билета.....	37
7. ТЕСТОВЫЙ КОНТРОЛЬ .....	37
8. КОНТРОЛЬНЫЕ ЭТАПЫ И ИХ ОЦЕНКА по БРС.....	38
9. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ.....	40
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	42
ПРИЛОЖЕНИЕ Б .....	44
ПРИЛОЖЕНИЕ В .....	46

## ВВЕДЕНИЕ

Самостоятельная работа студентов является неотъемлемой частью учебного процесса в подготовке квалифицированных специалистов, способных самостоятельно и творчески решать стоящие перед ними задачи.

Самостоятельная работа – один из способов активного, целенаправленного приобретения студентом профессиональных знаний и навыков. Важное значение имеет самостоятельная работа для студентов заочного и вечернего, дистанционного обучения. Важнейшие социально-профессиональные навыки будущего специалиста, наилучшим образом, формируются в ходе самостоятельной работы. Самостоятельная работа студентов определяется требованиями Государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по направлению подготовки дипломированного специалиста – 654200 «Радиотехника» для специальности 210302 (200700) - Радиотехника, утвержденного 17.03.2000 г. (рег. №151тех/дс) и рабочей программой по дисциплине «Оптические устройства в радиотехнике», утвержденной в ТУСУРе, содержанием учебников, учебных пособий и методических руководств.

Преподаватель знакомит студентов с рабочей программой курса, списком литературы, методикой работы над литературой, порядком и методикой составления конспектов лекций, методикой проведения практических занятий, написанием тезисов, докладов и рефератов, составлением презентаций. Профессиональный подход к подготовке специалистов предусматривает эффективное взаимодействие ТУСУРа с работодателями и профессионалами. Кафедра организует консультации, приглашает студентов на обсуждение рефератов, в которых освещаются проблемные материалы, на выставки рекомендованной литературы, пропагандирует наглядные пособия, стенды, видеофильмы. В пользование студентам представляется библиографические списки, в том числе в электронном виде, отечественные и зарубежные.

К видам самостоятельной работы относятся:

- систематическое чтение и конспектирование литературы;
- выполнение индивидуальных расчетных заданий;
- подготовка к семинарским, практическим занятиям;
- подготовка к лабораторным занятиям;
- углубленное самостоятельное изучение основных вопросов учебной программы;
- написание рефератов по разделам курса;
- представление презентаций по вопросам курса, недостаточно освещенным в учебных пособиях ;
- обработка и анализ экспериментальных данных, полученных во время экспериментов и наблюдений при выполнении НИР и ГПО;

Преподаватель знакомит студентов с рабочей программой курса, списком литературы, методикой работы над литературой, порядком и методикой составления конспектов лекций, практических занятий, написанием тезисов,

докладов и рефератов, составлением презентаций.

Компетентностный подход к подготовке специалистов предусматривает эффективное взаимодействие ТУСУРа с работодателями и профессионалами. Кафедра организует консультации, приглашает студентов на обсуждение рефератов, в которых освещаются проблемные материалы, на выставки рекомендованной литературы, пропагандирует наглядные пособия, стенды, видеофильмы. В пользование студентам представляется библиографические списки, в том числе в электронном виде, отечественные и зарубежные.

Мероприятия, создающие предпосылки и условия для реализации самостоятельной работы:

- обеспечение информационными ресурсами (справочники, учебные пособия, банки индивидуальных заданий, пакеты прикладных программ по проверке знаний);
- методические материалы (указания по выполнению лабораторных работ, руководства, практикумы, сборники задач);
- контролирующие материалы (тесты);
- материальные ресурсы (ПК, измерительное и технологическое оборудование);
- консультации преподавателей;
- возможность публичного обсуждения теоретических и/или практических результатов, полученных студентом самостоятельно (конференции, олимпиады, конкурсы);

Контролируемая самостоятельная работа направлена на углубление и закрепление знаний студентов, развитие аналитических навыков по проблематике курса.

Пособие разработано в соответствии с временными рекомендациями по организации самостоятельной работы студентов (письмо Минобрнауки РФ от 27.11.2002 "Об активизации самостоятельной работы студентов высших учебных заведений").

## **1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **1.1 Цели и задачи дисциплины**

Дисциплина "Оптические устройства в радиотехнике" относится к блоку специальных дисциплин, читаемых для студентов специальности 210302 - "Радиотехника", и является дисциплиной, устанавливаемой ГОС.

**Целью** преподавания дисциплины является подготовка специалистов в области основ теории и принципов работы оптических устройств обработки информации, а также оптических линий связи.

**Основными задачами** изучения дисциплины являются:

- получение необходимых знаний по физическим и теоретическим основам функционирования оптических систем передачи и обработки сигналов,
- получение необходимых знаний по принципам построения перспективных систем связи и обработки информации.

## **1.2 Требования к уровню освоения содержания дисциплины**

В результате изучения дисциплины студенты должны:

- **знать** теоретические основы оптической обработки информации; принципы построения и работы, а также характеристики основных функциональных узлов оптических систем: спектроанализатора, согласованного фильтра, коррелятора; физические основы распространения излучения по оптическому волокну, основные характеристики источников и приемников оптического излучения, принципы построения волоконно-оптических систем передачи информации;
- **уметь** определять и обосновывать целесообразность использования оптических методов обработки информации для решения конкретных радиотехнических задач, выбирать наиболее приемлемый алгоритм обработки и реализующие его схемы; составлять схемы волоконно-оптических систем передачи аналоговых и цифровых сигналов и оценивать качество их работы;
- **иметь** представление об оптических процессорах, применяемых в современных радиоэлектронных комплексах; о принципах группообразования и управления эксплуатационными процессами в волоконно-оптических линиях с помощью ЭВМ.

## **1.3. Перечень обеспечивающих дисциплин.**

Данная дисциплина базируется на знаниях, полученных студентами в процессе изучения следующих дисциплин: «Электродинамика и распространение радиоволн», «Радиотехнические цепи и сигналы», «Устройства приема и обработки сигналов», «Радиотехнические системы», «Сети и системы цифровых телекоммуникаций».

### **Объем дисциплины и виды учебной работы.**

Вид обучения	Очное (9 семестр)	Заочное (6,7 семестры)	Очно-заочное (9 семестр)
Вид учебной работы	Всего часов		
Общая трудоемкость дисциплины	90	90	90
Лекции	28	8	17
Лабораторные занятия	-	8	-
Практические занятия	14	-	9
Курсовой проект	-	-	-
Самостоятельная работа	48	74	64
Вид итогового контроля	Экзамен	Зачет	Экзамен
7 семестр			
9 семестр			

## 2. СОДЕРЖАНИЕ ЛЕКЦИОННОГО КУРСА

### Разделы дисциплины и виды занятий

№ п/п	Раздел дисциплины	Лекции (28 час)	Пр.зан. (14 час)	Лаб.раб (8 час)
1	Физические и математические основы оптической обработки информации	2	2	
2	Функциональная и структурная организации аналоговых оптических процессоров	2		4
3	Оптические корреляторы когерентного и некогерентного типов	2	2	
4	Акустооптические процессоры спектрального и корреляционного типа с пространственным и временным интегрированием	5	2	
5	Физические основы распространения излучения по оптическому волокну	4	2	4
6	Характеристики компонентов волоконно-оптических систем передачи	3	2	
7	Функциональная схема линейной части фотоприемного тракта	2	2	
8	Принципы построения волоконно-оптических систем передачи, особенности аналоговых волоконно-оптических систем передачи информации	4	2	
9	Многофункциональные волоконно-оптические системы передачи информации	3		
10	Особенности производства и эксплуатации оптических устройств обработки информации	1		

### 2.1. Разделы лекционного курса.

#### 2.1.1. Физические и математические основы оптической обработки информации (2 час.)

Двумерный оптический сигнал, его информационная структура. Скалярная теория дифракции: формула Гюйгенса-Френеля, дифракции Френеля и Фраунгофера. Преобразование световых полей элементами оптических систем (линза, зеркало, призма).

*Методические указания.* Для усвоения последующих разделов курса важно понять, что электромагнитные радио и оптические сигналы можно описать единым математическим аппаратом. Особенность дифракции Фраунгофера по сравнению с дифракцией Френеля. Четко представлять различие между оптическими и радиосигналами, особенности оптического сигнала, способы введения информации в оптический сигнал, обратить особое внимание на линзу, как на один из основных элементов оптических систем



обработки информации [1, 7].

### **2.1.2. Функциональная и структурная организации аналоговых оптических процессоров (2 час.)**

Оптический спектроанализатор, элементы и параметры. Пространственный сигнал, пространственный спектр. Пространственно-частотный фильтр, его структура. Оптические методы и процедуры оптической сигнальной обработки, согласованная фильтрация. Физические основы голографии. Уравнение голограммы произвольного объекта. Дифракционная эффективность и информационные свойства голограммы. Методы голографии в задачах обработки информации.

*Методические указания.* В этом разделе особое внимание необходимо обратить на устройство и принцип действия когерентного оптического фурье-процессора на основе тонкой сферической линзы, понять физику и математическую основу описания процессов ввода и передачи информации, иметь четкое представление о пространственном сигнале, пространственном спектре. Понять, что применение оптического анализатора спектра с использованием фурье-линзы для исследования диаграмм направленности различных излучателей упрощает задачу. Важно понять, что с помощью оптических систем достаточно просто выполняются операции умножения, интегрирования, преобразования Фурье, Френеля, Гильберта, вычисление функций корреляции, свертки и т.д. [1, 7,16].

### **2.1.3. Оптические корреляторы когерентного и некогерентного типов (2 час.)**

Схемные решения для когерентных и некогерентных модификаций оптических корреляторов, принципы функционирования.

*Методические указания.* В этом разделе важно понять, что к АОП корреляционного типа относятся устройства оптической обработки, выходным продуктом которых является корреляционный интеграл пары сигналов, введенных тем или иным способом в оптическую систему и, что к этой же группе процессоров можно отнести различные фильтры, формирующие на выходе интеграл свертки [1, 7,16].

### **2.1.4. Акустооптические процессоры спектрального и корреляционного типа с пространственным и временным интегрированием (5 час.)**

Акустооптическое (АО) взаимодействие как средство ввода динамического сигнала в оптическую систему. Дифракция света на акустических волнах в режиме Рамана-Ната и Брэгга, их особенности. Параметры АО модуляторов. АО процессоры корреляционного типа с пространственным интегрированием: согласованный фильтр и конвольвер, принципы работы, ограничения. АО спектроанализаторы с пространственным интегрированием: полоса анализа, частотное разрешение, пути их повышения. Области применения АО процессоров в современной радиоэлектронике .

**Методические указания.** Очень важно знать и понять, что разновидностью когерентных оптических процессоров, ориентированных на обработку радиосигналов, являются акустооптические процессоры (АОП), в которых для ввода радиосигналов в оптическую систему используются акустооптические модуляторы, работающие на эффекте акустооптического взаимодействия. Важно знать режимы дифракции, устройство и принцип действия АО, основные его параметры и характеристики [1,2].

### **2.1.5. Физические основы распространения излучения по оптическому волокну (4 час.)**

Планарные и полосковые оптические волноводы, одномодовый и многомодовый режимы распространения, дисперсия в оптических волноводах. Оптическое волокно (ОВ). Особенности распространения излучения по ОВ. Режим слабонаправляющего волновода. Характеристическое уравнение, моды ОВ. Виды дисперсии в ОВ. Причины потерь в ОВ.

**Методические указания.** Это очень важный для усвоения последующих разделов курса материал. Нужно понять физику и математическую основу описания процессов передачи света по ОВ. Материал можно изучать, используя [1,3,4,14].

### **2.1.6. Характеристики компонентов волоконно-оптических систем передачи (3 час.)**

Основные параметры ОВ: профиль показателя преломления, числовая апертура, коэффициент затухания, полоса пропускания. Оптические кабели и разъемы, их конструкции и параметры. Источники излучения передатчиков оптических линий связи: светодиоды и полупроводниковые лазеры, их основные рабочие характеристики. Ввод оптического излучения в волокно. Фотоприемники оптических систем передачи: лавинные и р-і-п фотодиоды, принцип действия и параметры.

**Методические указания.** Эти вопросы очень подробно изложены в [1,5,6]. Обратите внимание на причины, обуславливающие большую чувствительность и быстродействие р і п фотодиодов.

### **2.1.7. Функциональная схема линейной части фотоприемного тракта (2 час.)**

Отношение сигнал-шум на выходе приемного устройства с высокоимпедансными усилителями на биполярном и полевом транзисторах. Приемные устройства с трансимпедансным усилителем.

**Методические указания.** Материал можно изучать, используя [1,3,5].

### **2.1.8. Принципы построения волоконно-оптических систем передачи, особенности аналоговых волоконно-оптических систем передачи информации (4 час.)**

Обобщенная структурная схема построения волоконно-оптической линии связи (ВОЛС), ее основные функциональные блоки, топологические

реализации. Каналообразование: частотное и временное разделение каналов. Цифровые плезиохронные ВОЛС: скорость передачи, канальность, группообразование. Цифровые синхронные ВОЛС, основные принципы группообразования.

*Методические указания.* Материал можно изучать, используя [1,4, 5, 6,].

### **2.1.9. Многофункциональные волоконно-оптические системы передачи информации (3 час.)**

Волоконно-оптические сети: топологии, особенности. Полностью оптические сети.

*Методические указания.* Нужно понять физику и математическую основу описания процессов, происходящих в многофункциональных волоконно-оптических системах передачи информации. Материал можно изучать, используя [1,4, 6,8].

### **2.1.10. Особенности производства и эксплуатации оптических устройств обработки информации (1 час)**

*Методы изготовления оптических волокон и кабелей.\* Управление эксплуатационными процессами с помощью ЭВМ.\**

*Методические указания.* Материал можно найти в [6, 9].

## **2.2. Разделы, вынесенные на самостоятельную работу.**

### **2.2.1 Акустооптические корреляторы с временным интегрированием**

Акустооптические корреляторы с временным интегрированием: радиочастотная и видеочастотная модификации, принципы работы, схемные реализации, рабочие параметры

*Методические указания.* Материал можно изучать, используя [1,2,] Необходимо обратить внимание на прямой и косвенный алгоритмы формирования корреляционного интеграла.

### **2.2.2 Акустооптические спектроанализаторы с временным интегрированием**

Акустооптические спектроанализаторы с временным интегрированием: алгоритмы работы, варианты схемных решений, рабочие параметры.

*Методические указания.* Физические основы и технические характеристики акустооптических спектроанализаторов можно изучить, пользуясь [1,2].

### **2.2.3 Нелинейные эффекты в ОВ,**

Солитонный режим распространения оптического излучения.

*Методические указания.* Вопросы формирования и распространения оптических сигналов в солитонном режиме можно изучить, пользуясь [5].

### **2.2.4 Особенности аналоговых ВОЛС**

Особенности аналоговых ВОЛС: обеспечение требуемого качества передачи аналоговых широкополосных сигналов, прямая модуляция и модуляция с линеаризацией характеристик, предварительная частотная модуляция поднесущей. Принципы построения многоканальных и телевизионных аналоговых ВОЛС\*.

**Методические указания.** Вопросы распространения оптических сигналов в открытых линиях можно изучить, пользуясь [13]. Технические характеристики современных оптических систем связи – в учебных пособиях [1, 4, 6, 11], рекламных проспектах фирм-производителей [17-22].

### **2.2.5 Атмосферные оптические линии связи.**

Распространение оптического излучения в свободном пространстве, дифракционная расходимость. Особенности распространения излучения в условиях атмосферы: окна прозрачности, влияние турбулентностей и аэрозолей.

**Методические указания.** Вопросы распространения оптических сигналов в открытых линиях можно изучить, пользуясь [10].

### **2.2.6. Технология изготовления и материалы ОВ.**

Основные классы материалов для изготовления ОВ. Основные группы технологических процессов изготовления ОВ. Вытягивание оптического волокна из расплавов. Метод химического осаждения из газовой фазы.

**Методические указания.** Достаточно подробно эти вопросы изложены в [1]. а также в журналах LightWave.

Формой отчетности по разделам самостоятельной работы (п. 2.2) является реферат, реферат-доклад или презентация [15]. Объем реферата от 10 до 25 печатных страниц. Рекомендации по составлению реферата даны в Приложении В, а рекомендации по оформлению слайдов презентаций - в Приложении Г.

При оценке вашего труда преподавателя интересует:

- соответствие содержания выбранной теме;
- глубина проработки материала;
- правильность и полнота использования источников;
- оформление реферата.

## **3. ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАНЯТИЯ.**

Основными целями проведения и выполнения лабораторной работы являются :

- углубленное освоение студентами теоретических положений изучаемой дисциплины «Оптические устройства в радиотехнике»;
- изучение особенностей строения, состояния, поведения и функционирования элементов и оптических устройств;

- освоение приемов, методов и способов выявления, наблюдения, измерения и контроля основных параметров и характеристик оптических процессоров;
- усвоение приемов, методов и способов обработки, представления и интерпретации результатов проведенных исследований.

При выполнении лабораторной работы студент должен продемонстрировать:

- владение соответствующим понятийным и терминологическим аппаратом;
- знакомство с учебно-методической и дополнительной литературой по заданной теме.

Список натуральных лабораторных работ:

1. Устройство ввода информации в оптическую систему;
2. Исследование планарных оптических волноводов.

Продолжительность каждой работы - 4 час..

Для студентов заочной и дистанционной формы обучения могут быть предложен лабораторный практикум из 4 компьютерных работ.

Список компьютерных лабораторных работ:

1. Исследование акустооптических модуляторов (АОМ);
2. Исследование акустооптических анализаторов спектра (АОАС);
3. Исследование параметров и характеристик многоволнового волоконно-оптического усилителя [12];
4. Исследование оптического мультиплексора на основе массива планарных волноводов (AWG) [13];

Методические указания к виртуальным лабораторным работам представлены в локальной вычислительной сети кафедры СВЧиКР .

#### 4. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ.

Решение задач способствует развитию навыков практического применения полученных теоретических знаний, а также позволяет глубже понять физическую сущность процессов и явлений в оптических процессорах, закрепить в памяти основные формулы, значения важнейших величин и параметров оптических фильтров, АОМ, АОАС [1,2,14].

##### 4.1 Темы практических занятий:

№ п/п	№ раздела дисциплины	Наименование практических занятий (по 2 час.)
1	1	Одномерное и двумерное преобразование Фурье в оптической системе
2	2	Оптическая фильтрация (ФНЧ,ФВЧ, гребенчатые фильтры)
3	4	Акустооптическая ячейка как элемент ввода радиосигналов в оптический сигнальный процессор

4	4	Акустооптический спектроанализатор радиосигналов
5	5,6	Расчет характеристик оптического волокна (дисперсия, затухание, числовая апертура)
6	6	Расчет характеристик излучателей ВОЛС
7	7	Расчет линейной части фотоприемного тракта (высокоимпедансные и трансимпедансные усилители)
8	8	Расчет энергетического бюджета волоконно-оптической линии связи (1 час)

Ниже приведен подробный анализ решения некоторых типовых задач на практике, способствующий более глубокому осмыслению студентом изучаемых вопросов, касающихся оптических устройств в радиотехнике.

#### 4.2. Примеры решения типовых задач

**Задача 1.** Найти длину пути оптического луча в ультразвуковом поле, если частота СВЧ-сигнала  $f_{ак0} = 300 \text{ МГц}$   $v_{ак} = 2600 \text{ м/с}$ , длина волны светового пучка  $\lambda_0 = 0,63 \text{ мкм}$

**Решение:**

Найдем длину волны ультразвукового поля в пьезопреобразователе:

$$\Lambda_0 = \frac{v_{ак}}{f_{ак0}} = \frac{2600}{300 \cdot 10^6} = 8,66 \text{ мкм}.$$

По условию дифракции Брэгга длина пути, на котором происходит взаимодействие светового пучка с ультразвуком, должна выбираться исходя из неравенств:

$$Q_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot l \cdot \lambda_0}{\Lambda_0^2} \geq 1.$$

где  $Q_0$ -параметр дифракции на несущей частоте.

Отсюда можно найти длину пути оптического луча:

$$l_{\min} \geq \frac{\Lambda_0^2}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_0} = \frac{(8,66 \cdot 10^{-6})^2}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,63 \cdot 10^{-6}} = 18,95 \text{ мкм}.$$

**Ответ:** 18,95 мкм.

**Задача 2.** Необходимо определить динамический диапазон, при котором характеристики АОАС остаются постоянными, при следующих условиях: чувствительность фотодетектора  $P_{ЭЛМН} = 1 \text{ мкВт}$ , акустическая мощность  $P_{ак} = 75 \text{ мВт}$ , суммарные потери  $\alpha = 0,310$ .

**Решение:**

динамический диапазон определяется следующим соотношением:

$$DD = 10 \cdot \lg \frac{P_{\text{ЭЛТРЕБ}}}{P_{\text{ЭЛМИН}}}$$

Для этого необходимо определить требуемую мощность с учетом потерь:

$$P_{\text{ЭЛТРЕБ}} = P_{\text{ак}} \cdot 10^{\alpha} = 73 \cdot 10^{0,31} = 149,066 \text{ мВт}.$$

где  $\alpha$  - суммарные потери,  $P_{\text{ак}}$  - акустическая мощность.

Тогда динамический диапазон будет равен:

$$DD = 10 \cdot \lg \frac{P_{\text{ЭЛТРЕБ}}}{P_{\text{ЭЛМИН}}} = 10 \cdot \lg \frac{149,066 \cdot 10^{-3}}{10^{-6}} = 51,734 \text{ дБ}.$$

**Ответ:** 51,734 дБ.

**Задача 3.** Определить акустические потери на границе пьезопреобразователь-светозвукопровод (ПП-СвЗвПр), если акустическое сопротивление ПП  $Z_{\text{ПП}} = 34,05 \text{ МОм}$ , акустическое сопротивление СвЗвПр  $Z_{\text{СвЗвПр}} = 31 \text{ МОм}$ .

**Решение:**

Акустические потери на границе ПП-СвЗвПр определяются следующим выражением:

$$\alpha_{\text{ГР}} = 10 \cdot \lg \left( \frac{1}{\tau_{\text{ак}}} \right),$$

где  $\tau_{\text{ак}}$  - коэффициент пропускания границ ПП-СвЗвПр, который равен:

$$\tau_{\text{ак}} = \frac{4 \cdot \frac{Z_{\text{ПП}}}{Z_{\text{СвЗвПр}}}}{\left( \frac{Z_{\text{ПП}}}{Z_{\text{СвЗвПр}}} + 1 \right)^2} = 0,997.$$

Тогда можно найти акустические потери на границе ПП-СвЗвПр:

$$\alpha_{\text{ГР}} = 10 \cdot \lg \left( \frac{1}{0,997} \right) = 0,013.$$

**Ответ:** 0,013.

**Задача 4.** Найти относительную ширину полосы частот АОМ, если скорость звука  $v_{\text{ак}} = 6500 \text{ м/с}$ , средняя частота ультразвуковых колебаний  $f_{\text{ак}} = 16 \text{ МГц}$ , плотность материала, из которого изготовлен пьезопреобразователь  $\rho = 4700 \text{ кг/м}^3$ .

**Решение:**

Относительная ширина полосы частот АОМ определяется коэффициентом согласования акустического сопротивления преобразователя и активной среды:

$$\frac{\Delta f_{\text{ак}}}{f_{\text{ак0}}} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{Z}{Z_{\text{преобр}}},$$

где  $\frac{\Delta f_{\text{ак}}}{f_{\text{ак0}}}$  - относительная ширина полосы частот,

$Z_{\text{преобр.}}$  – акустическое сопротивление пьезопреобразователя ,  
 $Z_{\text{преобр.}} = \rho_{\text{преобр}} \cdot v_{\text{ак}}$ .

Рассчитаем акустическое сопротивление пьезопреобразователя:

$$Z_{\text{преобр.}} = 4700 \text{ кг/м}^3 \cdot 6500 \text{ м/с} = 30,55 \text{ мОм.}$$

**Задача 5.** Определить  $D_{\text{вх}}$ , если требуемая скорость звука светозвукопровода  $v_{\text{ак.гр}} = 6300 \text{ м/с}$ , число разрешимых элементов  $N = 100$ ,  $f_c = 1 \text{ кГц}$ .

**Решение:**

Разрешающая способность связана с  $D_{\text{вх}}$  следующим соотношением:

$$\delta f = \frac{v_{\text{ак}}}{D_{\text{вх}}}.$$

В тоже время разрешающая способность связана с быстродействием:

$$\delta f = \frac{1}{\tau}.$$

Следовательно:

$$D_{\text{вх}} = v_{\text{ак}} \cdot \tau.$$

Требуемое быстродействие определяется через частоту сигнала  $f_c$  и число разрешимых элементов  $N$ :

$$\tau = \frac{1}{f_c \cdot N},$$

$$\tau = \frac{1}{1 \cdot 10^3 \text{ Гц} \cdot 100} = 10 \text{ мкс}.$$

Подставим это значение в формулу для  $D_{\text{вх}}$ :

$$D_{\text{вх}} = 6300 \text{ м/с} \cdot 10 \cdot 10^{-6} \text{ Гц} = 6,3 \text{ мм.}$$

**Ответ:**  $D_{\text{вх}} = 6,3 \text{ мм.}$

**Задача 6.** Определить геометрические размеры пьезопреобразователя, изготовленного из ниобата лития, работающего в режиме дифракции Брэгга на частоте возбуждения  $f_{\text{ак}} = 15 \text{ МГц}$ . Длина волны  $\lambda_{\text{св}} = 0,63 \text{ мкм}$ ,  $v_{\text{ак}} = 7330 \text{ м/с}$ .

**Решение:**

Длина пути  $l$ , на котором происходит взаимодействие светового пучка с ультразвуком, рассчитывается по формуле:

$$l = \frac{\Lambda_0^2}{2\pi \cdot \lambda_{\text{св}}},$$

где  $\Lambda_0$  – длина волны ультразвука.

Длину волны ультразвука в звукопроводе на частоте ВЧ-сигнала  $f_{\text{ак}}$  можно определить по формуле:

$$\Lambda_0 = \frac{v_{\text{ак}}}{f_{\text{ак}}}.$$

$$\Lambda_0 = \frac{7330 \text{ м/с}}{15 \cdot 10^6 \text{ Гц}} = 0,488 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 0,488 \text{ мм}.$$



Тогда длина пути  $l$  равна:

$$l = \frac{(0,448 \cdot 10^{-3} \text{ м})^2}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,63 \cdot 10^{-6} \text{ м}} = 0,051 \text{ м} = 5,1 \text{ мм}.$$

Пьезопреобразователь представляет собой резонатор, поэтому толщина его выбирается равная половине длины волны возбуждаемого им ультразвукового поля:

$$d = \frac{\Lambda_0}{2}.$$

Подставим данные:

$$d = \frac{0,488 \cdot 10^{-3} \text{ м}}{2} = 0,244 \text{ мм}.$$

Ширина пластинки пьезопреобразователя  $h$  должна быть соизмерима с шириной оптического луча, взаимодействующего со звуковой волной,

$$h = \frac{1}{8} l.$$

Тогда:

$$h = \frac{1}{8} \cdot 5,1 \text{ мм} = 0,638 \text{ мм}$$

**Ответ:**  $l=5,1 \text{ мм}$ ,  $d=0,244 \text{ мм}$ ,  $h=0,638 \text{ мм}$ .

**Задача 7.** Определить диаметр одномодового волокна, работающего на длине волны  $0,85 \text{ мкм}$ , показатель преломления сердцевины  $n_1 = 1,47$ ,  $\Delta n = 0,005$ .

**Решение:**

Диаметр одномодового ступенчатого волокна найдем из условия одномодовости, которое гласит, что если нормированная частота удовлетворяет соотношению:

$$V = \frac{2\pi \cdot a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \leq 2,405,$$

или

$$V = \frac{2\pi \cdot a}{\lambda} \sqrt{(n_1 - n_2)(n_1 + n_2)} = \frac{2\pi \cdot a}{\lambda} \sqrt{\Delta n \cdot 2n_1} \leq 2,405,$$

где  $\Delta n = n_1 - n_2$ ;

$$n_1 + n_2 \approx 2n_1,$$

то в оптическом волокне может распространяться только одна мода.

Отсюда находим:

$$a \leq \frac{2,405 \cdot \lambda}{2\pi \sqrt{\Delta n \cdot 2n_1}} \leq \frac{2,405 \cdot 0,85 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 3,14 \sqrt{0,005 \cdot 2 \cdot 1,47}} \leq 2,68 \text{ мкм}.$$

**Ответ:**  $a \leq 2,68 \text{ мкм}$ .

**Задача 8.** Определить и сравнить общую дисперсию ступенчатого волокна для

лазера и светодиода при следующих значениях величин:  $\tau_0 = 0$ ;  $\lambda = 0,9 \text{ мкм}$ ;  $\Delta\lambda = 3 \text{ нм}$  для лазера и  $\Delta\lambda = 30 \text{ нм}$  для светодиода.

**Решение:**

Рассмотрим два случая: 1) ступенчатое волокно в одномодовом режиме; 2) ступенчатое волокно в многомодовом режиме. Общая дисперсия определяется через межмодовую и внутримодовую дисперсии:

$$\tau = \sqrt{\tau_{мм}^2 + \tau_{им}^2}.$$

*Межмодовая дисперсия* характерна только для многомодовых оптических волокон. Ее возникновение обусловлено как различной длиной пути, пробегаемого каждой модой, так и различными постоянными распространения отдельных мод. Для ступенчатого оптического волокна этот вид дисперсии определяется следующим соотношением:

$$\tau_{мм} = L \frac{n_1 \cdot \Delta}{c},$$

где  $L$  - протяженность волокна;

$$\Delta \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} = 0.008;$$

$c$  - скорость света в вакууме.

В свою очередь *внутримодовая дисперсия* включает в себя материальную и волноводную дисперсии:

$$\tau_{вм} = \tau_{мат} + \tau_{в}.$$

*Материальная дисперсия* обусловлена зависимостью скорости оптического излучения (или показателя преломления вещества  $n$ ) от длины волны  $\lambda$ . В коротковолновом диапазоне ( $\lambda = 0,85 \text{ мкм}$ ) этот вид дисперсии является преобладающим:

$$\tau_{мат} = \Delta\lambda \cdot L \frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_1}{d\lambda^2} = \Delta\lambda \cdot L \cdot M(\lambda),$$

где  $M(\lambda)$  - удельная материальная дисперсия.

В области низких значений материальной дисперсии ( $\lambda \approx 1,27 \text{ мкм}$ ) преобладающей становится *волноводная дисперсия*. Волноводная дисперсия – зависимость постоянной распространения излучения (а значит и его скорости) от отношения  $a/\lambda$ .

$$\tau_{в} = \Delta\lambda \cdot L \frac{2n_1^2}{c \cdot \lambda} = \Delta\lambda \cdot L \cdot B(\lambda),$$

где  $B(\lambda)$  - удельная внутримодовая дисперсия.

Учитывая все вышеизложенное, для первого случая общая дисперсия

определяется как:

$$\tau = \tau_{\text{вм}} = \tau_{\text{мат}} + \tau_{\text{г}}.$$

Так как на заданной длине волны  $\tau_{\text{мат}} \gg \tau_{\text{г}}$ , то:

$$\tau = \tau_{\text{мат}} = \Delta\lambda \cdot L \cdot M(\lambda).$$

Таким образом, получим для протяженности оптического волокна 1 км:

$$\text{для лазера} - \frac{\tau}{L} = 3_{\text{нм}} \cdot 75_{\text{нс/км} \cdot \text{нм}} = 0,225_{\text{нс/км}};$$

$$\text{для светодиода} - \frac{\tau}{L} = 30_{\text{нм}} \cdot 75_{\text{нс/км} \cdot \text{нм}} = 2,25_{\text{нс/км}}.$$

Для второго случая:

$$\tau = \tau_{\text{мм}} = L \frac{n_1 \cdot \Delta}{c}.$$

$$\text{для лазера} - \frac{\tau}{L} = \frac{1,46 \cdot 0,008}{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}} = 38,933_{\text{нс/км}};$$

$$\text{для светодиода} - \frac{\tau}{L} = \frac{1,46 \cdot 0,008}{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}} = 38,933_{\text{нс/км}}.$$

Таким образом, мы выяснили, что при многомодовом режиме использования оптического волокна общая дисперсия одинакова для лазера и светодиода, а при одномодовом – дисперсия для лазера в десять раз больше чем для светодиода. Откуда можно сделать вывод, что на большие расстояния эффективнее использовать возбуждение колебаний в одномодовом режиме.

### 4.3 Контрольные работы

Ниже приводятся темы и вопросы контрольных работ. Цель контрольных работ: закрепление и проверка знаний по основным разделам лекционного курса в течение семестра для студентов очной и очно-заочной (вечерней) форм обучения.

#### Контрольная работа №1.

#### Тема: Интегральные и спектральные преобразования в когерентных оптических системах

1. Спектральное представление двумерного оптического сигнала. Представление дискретными пространственными и спектральными отсчетами. Дискретное двумерное преобразование Фурье. Информационная емкость оптического сигнала.
2. Дайте представление монохроматического оптического излучения в виде углового спектра плоских волн. Опишите его использование для решения дифракционных задач при анализе систем оптической обработки

информации .

3. Дайте описание передаточной функций свободного пространства конечной толщины в виде линейного дисперсионного пространственного фильтра с конечной полосой пропускания пространственных частот.
4. Опишите применение интеграла суперпозиции для описания линейных оптических систем. Импульсный отклик слоя пространства толщиной  $z$  (формула дифракции Рэля-Зоммерфельда).
5. Опишите принцип Гюйгенса-Френеля. Импульсный отклик слоя пространства толщиной  $z$  в приближении Френеля.
6. Опишите принцип Гюйгенса-Френеля. Импульсный отклик слоя пространства толщиной  $z$  в приближении Фраунгофера.
7. Опишите Фурье-преобразования, осуществляемом тонкой сферической линзой. Пространственные частоты и их связь с координатами пространства в выходной плоскости устройства
8. Оптический Фурье-процессор на основе тонкой сферической линзы. Принцип работы, схемная реализации, рабочие параметры.
9. Сравните различные варианты оптических схем, осуществляющих двумерное преобразование Фурье на основе тонкой сферической линзы. Укажите достоинства и недостатки различных схем.
10. Опишите оптический процессор реализующий обратное преобразование Фурье в оптической системе. Принцип работы, схемная реализация.
11. Опишите оптический процессор реализующий операцию интегрирования. Принцип работы, схемная реализация.
12. Опишите оптический процессор реализующий операцию фильтрации. Принцип работы, схемная реализация .
13. Опишите оптический процессор реализующий операцию дифференцирования. Принцип работы, схемная реализация,
14. Опишите оптический процессор реализующий операцию свертки. Принцип работы, схемная реализация,
15. Опишите оптический процессор реализующий вычисление функции корреляции Принцип работы, схемная реализация.
16. Опишите оптический процессор реализующий операцию согласованной фильтрации. Принцип работы, схемная реализация.

## **Контрольная работа №2.**

**Тема: Акустооптические процессоры спектрального и корреляционного типа**

1. Акустооптическое взаимодействие как средство ввода динамического сигнала в оптическую систему. Дифракция света на акустических волнах в режиме Рамана-Ната, ее особенности.
2. Акустооптическое взаимодействие как средство ввода динамического сигнала в оптическую систему. Дифракция света на акустических волнах в режиме Брэгга, ее особенности.
3. Параметры акустооптических модуляторов – быстродействие, разрешающая способность, динамический диапазон, эффективность дифракции.

4. Базовые элементы АОП- источники излучения, акустооптические модуляторы, фотоприемники. Основные параметры.
5. Акустооптический согласованный фильтр – принципы работы, схемные реализации, рабочие параметры.
6. Акустооптический конвольвер – принципы работы, схемная реализация, рабочие параметры.
7. Радиочастотный квадратурный АОКГТИ - принцип работы, схемная реализация, рабочие параметры.
8. Акустооптический согласованный фильтр для ЛЧМ-сигналов - принцип работы, схемная реализация, рабочие параметры.
9. Видеочастотный акустооптический коррелятор с временным интегрированием - принцип работы, схемная реализация, рабочие параметры.
10. Радиочастотный акустооптический коррелятор с временным интегрированием Монтгомери - принцип работы, схемная реализация, рабочие параметры
11. Радиочастотный акустооптический коррелятор с временным интегрированием со скрещенными световыми пучками - принцип работы, схемная реализация, рабочие параметры
12. Двумерный Радиочастотный акустооптический коррелятор с временным интегрированием - принцип работы, схемная реализация, рабочие параметры
13. Акустооптические анализаторы спектра с пространственным интегрированием - принцип работы, схемная реализация, рабочие параметры.
14. Акустооптические анализаторы спектра с временным интегрированием - принцип работы, схемная реализация, рабочие параметры
15. Акустооптический процессор для обработки сигналов антенных решеток - принцип работы, схемная реализация, рабочие параметры.

### **Контрольная работа №3**

#### **Тема: Характеристики компонентов волоконно-оптических систем передачи**

1. Физические основы распространения излучения в ОВ. Многомодовые и одномодовые ОВ.
2. Виды профилей показателя преломления, числовая апертура, полоса пропускания оптического волокна. Опишите структуру ОВ.
3. Что такое числовая апертура ОВ? Какие свойства ОВ зависят от нее?
4. Напишите соотношение для нормированной частоты ОВ. Что можно определить, зная величину нормированной частоты?
5. Перечислите виды дисперсии. Какой вид дисперсии и при каких условиях преобладает в многомодовом и одномодовом ОВ?
6. Назовите причины, влияющие на потери в ОВ.
7. Какими факторами ограничивается информационная емкость волокна?
8. Охарактеризуйте нелинейные явления в оптических волокнах
9. Назовите причины потерь в волоконно-оптических соединителях.

Перечислите и охарактеризуйте основные параметры соединителей.

10. Какие принципы используются при реализации спектрально- селективных разветвителей ? Какое их основное применение?
11. Нарисуйте структурную схему ПОМ. Поясните назначение его компонентов.
12. Основные характеристики источников излучения. В чем принципиальная разница СИД и ЛД?
13. Какими факторами определяются длина волны и вид спектральной характеристики полупроводниковых излучателей?
14. Сравните основные характеристики СИД и ЛД. Сформулируйте преимущества и недостатки каждого.
15. От каких факторов зависит эффективность ввода оптического излучения в ОВ?

#### **Контрольная работа №4**

#### **Тема: Принципы построения аналоговых и цифровых волоконно-оптических систем передачи**

1. Назовите и охарактеризуйте технологии, используемые в ВОСП.
2. Представьте структурную схему и опишите параметры цифровой ВОСП
3. Перечислите и поясните операции, используемые при формировании цифрового телефонного сигнала.
4. Какова основная цель кодирования цифрового сигнала в ВОСП ?
5. Формирование и передача сигналов в плезиохронной ВООТ
6. Охарактеризуйте синхронную цифровую иерархию в ВОСП
7. Опишите структурную схему и принцип работы многоволновых ВОСП.
8. Что такое транспондер ? Поясните необходимость его применения.
9. Опишите принцип действия ВОУ. Назовите основные параметры.
10. Перечислите и охарактеризуйте источники шумов в ВОУ.
11. Нарисуйте и поясните функциональную схему ВОУ. Каким требованиям должен удовлетворять его источник накачки?
12. Нарисуйте и опишите функциональную схему цифрового ФПУ.
13. Опишите принцип действия, назовите преимущества и недостатки р-і-п фотодиодов
14. Опишите принцип действия, назовите преимущества и недостатки ЛФД.
15. Назовите источники шумов в ФПУ. Причина возникновения квантового шума?
16. Что такое коэффициент ошибок ОСП ? От чего он зависит?
17. Представьте эквивалентную схему и опишите работу фотоприемного устройства с трансимпедансным (высокоимпедансным ) усилителем.

## 5. ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ ЗАДАНИЯ

**Индивидуальное расчетное задание** - это форма проверки знаний по отдельным вопросам курса «Оптические устройства в радиотехнике», своего рода контрольная работа. В данном разделе мы имеем в виду те контрольные работы, которые даются студентам как домашние задания.

При написании контрольной работы удобнее всего пользоваться рекомендованными преподавателем учебниками и конспектами лекций, так как вопросы контрольной составляются на основе стандартной программы курса обучения.

Индивидуальное задание еще не предполагает навыков исследовательского умения, ответы на вопросы должны демонстрировать достаточно хорошее знание и понимание существа рассматриваемых вопросов. Задание дает возможность оценить порядок и уяснить физический смысл процессов, происходящих в оптических процессорах.

Особое значение расчетное задание приобретает для студентов заочной и вечерней форм обучения, так как требует сосредоточенной работы над вопросами изучаемого курса, что помогает включиться в круг проблем данной дисциплины.

Материал для выполнения расчетного задания достаточно подробно изложен в [1, 2, 3, 7].

### 5.1. Расчетное задание №1. Интегральные преобразования оптических сигналов (для студентов очной формы обучения)

**Дано:** Оптический сигнал записан на оптический транспарант с функцией пропускания  $T_1(x)$ ,

$$T_1(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x \leq D/2, \\ 1 & \text{при } x > D/2, \end{cases}$$

где  $D=1$  см - апертура транспаранта, в схеме оптического процессора, осуществляющего преобразование Фурье на длине волны  $\lambda=0,63$  мкм и имеющего линзу с фокусным расстоянием  $F=10$  см.

**Определить:**

1. Спектр пространственных частот оптического сигнала;
2. Энергию, сосредоточенную в основном лепестке и боковых лепестках спектра оптического сигнала;
3. Представить схему оптического процессора, графики исходного сигнала и его спектра..

Варианты заданий представлены в табл. 1

Таблица 1 Варианты на 1-е расчетное задание

№	Функция пропускания оптического транспаранта $T_1(x)$	Апертура $D$ , мм	Длина волны $\lambda$ , мкм	Фокусное расстоян ие $F$ , мм
1.	Прямоугольная – $T_1(x) = 1 \cdot \begin{cases} 1 & \text{при }  x  \leq D/2, \\ 0 & \text{при }  x  > D/2., \end{cases}$	10	0,63	30
2.	Линейная – $T_1(x) = \frac{x}{D} \cdot \begin{cases} 1 & \text{при }  x  \leq D/2, \\ 0 & \text{при }  x  > D/2., \end{cases}$	15	0,63	35
3.	Квадратичная - $T_1(x) = (x/D)^2 / 2 \cdot \begin{cases} 1 & \text{при }  x  \leq D/2, \\ 0 & \text{при }  x  > D/2., \end{cases}$	20	0,63	40
4.	Квазиквадратичная - $T_1(x) = \frac{1}{1+(x/D)^2} \cdot \begin{cases} 1 & \text{при }  x  \leq D/2, \\ 0 & \text{при }  x  > D/2., \end{cases}$	5	0,63	30
5.	Экспоненциальная - $T_1(x) = e^{-\alpha x } \cdot \begin{cases} 1 & \text{при }  x  \leq D/2, \\ 0 & \text{при }  x  > D/2., \end{cases}$	10	0,63	45
6.	Квазиэкспоненциальная - $T_1(x) = (1 - e^{-\alpha x }) \cdot \begin{cases} 1 & \text{при }  x  \leq D/2, \\ 0 & \text{при }  x  > D/2., \end{cases}$	15	0,63	50
7.	Линейно-экспоненциальная - $T_1(x) = \frac{x}{D} e^{-\alpha x } \cdot \begin{cases} 1 & \text{при }  x  \leq D/2, \\ 0 & \text{при }  x  > D/2., \end{cases}$	20	0,63	55
8.	Гауссова – $T_1(x) = e^{-(x/D)^2} \cdot \begin{cases} 1 & \text{при }  x  \leq D/2, \\ 0 & \text{при }  x  > D/2., \end{cases}$	10	0,63	60
9.	Квазигауссова - $T_1(x) = (1 - e^{-(x/D)^2}) \cdot \begin{cases} 1 & \text{при }  x  \leq D/2, \\ 0 & \text{при }  x  > D/2., \end{cases}$	15	0,63	30
10.	Синусоидальная – $T_1(x) = \sin(\beta x) \cdot \begin{cases} 1 & \text{при }  x  \leq D/2, \\ 0 & \text{при }  x  > D/2., \end{cases}$	20	0,63	55
11.	Косинусоидальная – $T_1(x) = \cos(\beta x) \cdot \begin{cases} 1 & \text{при }  x  \leq D/2, \\ 0 & \text{при }  x  > D/2., \end{cases}$	10	0,63	40
12.	Косинус-квадратная - $T_1(x) = \cos^2(\beta x) \cdot \begin{cases} 1 & \text{при }  x  \leq D/2, \\ 0 & \text{при }  x  > D/2., \end{cases}$	12	0,63	80



13.	Взвешенная синусоидальная - $T_1(x) = (1 - \sin(\beta x)) \cdot \begin{cases} 1 & \text{при }  x  \leq D/2, \\ 0 & \text{при }  x  > D/2., \end{cases}$	15	0,63	45
14.	Взвешенная косинусоидальная $T_1(x) = (1 - \cos(\beta x)) \cdot \begin{cases} 1 & \text{при }  x  \leq D/2, \\ 0 & \text{при }  x  > D/2., \end{cases}$	2,0	0,63	50
15.	Фазовая синусоидальная - $T_1(x) = \exp[i \sin(\beta x)] \cdot \begin{cases} 1 & \text{при }  x  \leq D/2, \\ 0 & \text{при }  x  > D/2., \end{cases}$	1.0	0,63	55
16.	Фазовая косинусоидальная $T_1(x) = \exp[i \cos(\beta x)] \cdot \begin{cases} 1 & \text{при }  x  \leq D/2, \\ 0 & \text{при }  x  > D/2., \end{cases}$	15	0,63	60
17.	Треугольная – $T_1(x) = 1 \cdot \begin{cases} (1 + x/D) & \text{при } -D/2 \leq x \leq 0, \\ (1 - x/D) & \text{при } 0 \leq x \leq D/2, \\ 0 & \text{при }  x  \geq D/2. \end{cases}$	20	0,63	80
18.	Трапециевидная - $T_1(x) = 1 \cdot \begin{cases} (\gamma D/2 + x)(1/\mu D) & \text{при } -\gamma D/2 \leq x \leq -\gamma D/2 + \mu D \\ 1 & \text{при } -\gamma D/2 + \mu D \leq x \leq \gamma D/2 - \mu D \\ (\gamma D/2 - x)(1/\mu D) & \text{при } \gamma D/2 - \mu D \leq x \leq \gamma D/2, \\ 0 & \text{при }  x  \geq \gamma D/2. \end{cases}$	10	0,63	35
19.	Линейно-фазовая – $T_1(x) = \exp[i\beta x] \cdot \begin{cases} 1 & \text{при }  x  \leq D/2, \\ 0 & \text{при }  x  > D/2., \end{cases}$	10	0,63	45
20.	Квадратично-фазовая - $T_1(x) = \exp[i\beta x^2] \cdot \begin{cases} 1 & \text{при }  x  \leq D/2, \\ 0 & \text{при }  x  > D/2., \end{cases}$	15	0,63	40
21.	Импульсно-фазовая - $T_1(x) = \exp[im\pi], \quad m = \begin{cases} 1 & \text{при } 3D/8 \leq  x  \leq D/2, \\ D/8 \leq  x  \leq D/4, \\ 0 & \text{при остальных } x. \end{cases}$	20	0,63	45
22.	Колоколообразная – $T_1(x) = \frac{1}{\cosh[\alpha x]} \exp[i\beta x^2] \cdot \begin{cases} 1 & \text{при }  x  \leq D/2, \\ 0 & \text{при }  x  > D/2., \end{cases}$	10	0,63	30
23.	Взвешено-синусоидальная – $T_1(x) =  \sin(\beta x)  \cdot \begin{cases} 1 & \text{при }  x  \leq D/2, \\ 0 & \text{при }  x  > D/2., \end{cases}$	15	0,63	35
24.	Взвешено-косинусоидальная –	20	0,63	40

	$T_1(x) =  \cos(\beta x)  \cdot \begin{cases} 1 & \text{при }  x  \leq D/2, \\ 0 & \text{при }  x  > D/2., \end{cases}$			
25.	Кубичная - $T_1(x) = (x/D)^3/2 \cdot \begin{cases} 1 & \text{при }  x  \leq D/2, \\ 0 & \text{при }  x  > D/2., \end{cases}$	10	0,63	30
26.	Фаз овая линейная - $T_1(x) = \exp[i\beta x] \cdot \begin{cases} 1 & \text{при }  x  \leq D/2, \\ 0 & \text{при }  x  > D/2., \end{cases}$	15	0,63	35

Примечание: параметры  $\alpha, \beta, \gamma$  – задаются преподавателем.

## 5.2. Расчетное задание №2 - Фильтрация оптических сигналов

**Дано:** Оптический сигнал задан функцией пропускания  $T_1(x)$  оптического транспаранта согласно номера варианта в табл. 1.

**Задание:**

1. Синтезировать оптический фильтр по критерию заданному в табл. 2.
2. Определить передаточную характеристику и геометрические размеры фильтра.
3. Произвести восстановление формы отфильтрованного сигнала .
4. Представить схему оптического процессора, осуществляющего фильтрацию оптического сигнала, графики исходного и отфильтрованного сигналов, спектральную характеристику фильтра и спектра сигнала на его выходе.

Варианты заданий представлены в табл. 2

Таблица 2 Варианты на 2-е расчетное задание

№	Тип фильтра	Функция пропускания оптического фильтра $T_2(\omega_x)$ и критерий фильтрации	Апертура $D$ , мм	Фокусное расстояние $F_2$ , мм
1.	ФНЧ	$T_2(\omega_x) = 1 \cdot \begin{cases} 1 & \text{при }  \omega_x  \leq \omega_{x1}, \\ 0 & \text{при }  \omega_x  > \omega_{x1}, \end{cases}$ $\omega_{x1}$ -частота среза 0-го лепестка спектра	50	30
2.	ФВЧ	$T_2(\omega_x) = 1 \cdot \begin{cases} 0 & \text{при }  \omega_x  \leq \omega_{x1}, \\ 1 & \text{при }  \omega_x  > \omega_{x1}. \end{cases}$ $\omega_{x1}$ -частота среза +1-го лепестка спектра	100	35
3.	ППФ	$T_2(\omega_x) = 1 \cdot \begin{cases} 1 & \text{при } \omega_{x1} \leq \omega_x \leq \omega_{x2}, \\ 0 & \text{при остальных } \omega_x. \end{cases}$ $\omega_{x1}, \omega_{x2}$ -частоты среза +1-го лепестка спектра	100	40

4.	ПЗФ	$T_2(\omega_x) = 1 \cdot \begin{cases} 0 & \text{при } \omega_{x1} \leq \omega_x \leq \omega_{x2}, \\ 1 & \text{при остальных } \omega_x. \end{cases}$ <p><math>\omega_{x1}, \omega_{x2}</math> - частоты среза, в пределах которых содержится 90 % энергии 0-го лепестка спектра</p>	80	60
5.	ГФ	$T_2(\omega_x) = 1 \cdot \begin{cases} 0 & \text{при } \omega_{x1} \leq \omega_x \leq \omega_{x2}, \\ 0 & \text{при } \omega_{x3} \leq \omega_x \leq \omega_{x4}, \\ 1 & \text{при остальных } \omega_x. \end{cases}$ <p><math>\omega_{x1} \dots \omega_{x4}</math> - частоты среза <math>\pm 1</math>-х лепестков спектра по уровню 90 % энергии</p>	100	45
6.	ФНЧ	$T_2(\omega_x) = 1 \cdot \begin{cases} 1 & \text{при }  \omega_x  \leq \omega_{x1}, \\ 0 & \text{при }  \omega_x  > \omega_{x1}, \end{cases}$ <p>В пределах частот <math>\pm \omega_{x1}</math> должно содержаться 90 % энергии сигнала</p>	50	50
7.	ФВЧ	$T_2(\omega_x) = 1 \cdot \begin{cases} 0 & \text{при }  \omega_x  \leq \omega_{x1}, \\ 1 & \text{при }  \omega_x  > \omega_{x1}. \end{cases}$ <p>Вне полосы частот <math>\pm \omega_{x1}</math> должно содержаться 10 % энергии сигнала</p>	100	55
8.	ПФ	$T_2(\omega_x) = 1 \cdot \begin{cases} 1 & \text{при } \omega_{x1} \leq \omega_x \leq \omega_{x2}, \\ 0 & \text{при остальных } \omega_x. \end{cases}$ <p><math>\omega_{x1}, \omega_{x2}</math> - частоты среза +2-го лепестка спектра</p>	100	60
9.	ЗФ	$T_2(\omega_x) = 1 \cdot \begin{cases} 0 & \text{при } \omega_{x1} \leq \omega_x \leq \omega_{x2}, \\ 1 & \text{при остальных } \omega_x. \end{cases}$ <p><math>\omega_{x1}, \omega_{x2}</math> - частоты среза, в пределах которых находится 95% энергии спектра</p>	80	30
10.	ГФ	$T_2(\omega_x) = 1 \cdot \begin{cases} 0 & \text{при } \omega_{x1} \leq \omega_x \leq \omega_{x2}, \\ 0 & \text{при } \omega_{x3} \leq \omega_x \leq \omega_{x4}, \\ 1 & \text{при остальных } \omega_x. \end{cases}$ <p><math>\omega_{x1} \dots \omega_{x4}</math> - частоты среза <math>\pm 2</math>-х лепестков спектра</p>	100	35
11.	ФНЧ	$T_2(\omega_x) = 1 \cdot \begin{cases} 1 & \text{при }  \omega_x  \leq \omega_{x1}, \\ 0 & \text{при }  \omega_x  > \omega_{x1}, \end{cases}$ <p>В пределах частот <math>\pm \omega_{x1}</math> должно содержаться 80 % энергии сигнала</p>	50	40
12.	ФВЧ	$T_2(\omega_x) = 1 \cdot \begin{cases} 0 & \text{при }  \omega_x  \leq \omega_{x1}, \\ 1 & \text{при }  \omega_x  > \omega_{x1}. \end{cases}$ <p>Вне полосы частот <math>\pm \omega_{x1}</math> должно содержаться 20 % энергии сигнала</p>	100	80
13.	ПФ	$T_2(\omega_x) = 1 \cdot \begin{cases} 1 & \text{при } \omega_{x1} \leq \omega_x \leq \omega_{x2}, \\ 0 & \text{при остальных } \omega_x. \end{cases}$	100	45

		$\omega_{x1}, \omega_{x2}$ - частоты среза 0-го лепестка спектра, в пределах которых содержится 50% энергии		
14.	ЗФ	$T_2(\omega_x) = 1 \cdot \begin{cases} 0 & \text{при } \omega_{x1} \leq \omega_x \leq \omega_{x2}, \\ 0 & \text{при } \omega_{x3} \leq \omega_x \leq \omega_{x4}, \\ 1 & \text{при остальных } \omega_x. \end{cases}$ $\omega_{x1} \dots \omega_{x4}$ - частоты среза $\pm 3$ -х лепестков спектра	80	50
15.	ГФ	$T_2(\omega_x) = 1 \cdot \begin{cases} 0 & \text{при } \omega_{x1n} \leq \omega_x \leq \omega_{x2n}, \\ 1 & \text{при остальных } \omega_x. \end{cases}$ $\omega_{x1n}, \omega_{x2n}$ - частоты среза четных лепестков	100	55
16.	ФНЧ	$T_2(\omega_x) = 1 \cdot \begin{cases} 1 & \text{при }  \omega_x  \leq \omega_{x1}, \\ 0 & \text{при }  \omega_x  > \omega_{x1}, \end{cases}$ В пределах частот $\pm \omega_{x1}$ должно содержаться 10 % энергии сигнала	50	60
17.	ФВЧ	$T_2(\omega_x) = 1 \cdot \begin{cases} 0 & \text{при }  \omega_x  \leq \omega_{x1}, \\ 1 & \text{при }  \omega_x  > \omega_{x1}, \end{cases}$ Вне частот $\pm \omega_{x1}$ должно содержаться 75 % энергии сигнала	100	30
18.	ПФ	$T_2(\omega_x) = 1 \cdot \begin{cases} 1 & \text{при } \omega_{x1} \leq \omega_x \leq \omega_{x2}, \\ 0 & \text{при остальных } \omega_x. \end{cases}$ $\omega_{x1}, \omega_{x2}$ - частоты среза 1-го лепестка спектра, в пределах которых содержится 90% энергии	100	35
19.	ЗФ	$T_2(\omega_x) = 1 \cdot \begin{cases} 0 & \text{при } \omega_{x1} \leq \omega_x \leq \omega_{x2}, \\ 0 & \text{при } \omega_{x3} \leq \omega_x \leq \omega_{x4}, \\ 1 & \text{при остальных } \omega_x. \end{cases}$ $\omega_{x1} \dots \omega_{x4}$ - частоты среза $\pm 2$ -х лепестков спектра	80	45
20.	ГФ	$T_2(\omega_x) = 1 \cdot \begin{cases} 0 & \text{при } \omega_{x1n} \leq \omega_x \leq \omega_{x2n}, \\ 1 & \text{при остальных } \omega_x. \end{cases}$ $\omega_{x1n}, \omega_{x2n}$ - частоты среза нечетных лепестков	100	40
21.	ФНЧ	$T_2(\omega_x) = 1 \cdot \begin{cases} 1 & \text{при }  \omega_x  \leq \omega_{x1}, \\ 0 & \text{при }  \omega_x  > \omega_{x1}, \end{cases}$ В пределах частот $\pm \omega_{x1}$ должно содержаться 25 % энергии сигнала	50	45
22.	ЗФ	$T_2(\omega_x) = 1 \cdot \begin{cases} 0 & \text{при } \omega_{x1} \leq \omega_x \leq \omega_{x2}, \\ 0 & \text{при } \omega_{x3} \leq \omega_x \leq \omega_{x4}, \\ 1 & \text{при остальных } \omega_x. \end{cases}$ $\omega_{x1} \dots \omega_{x4}$ - частоты среза $\pm 3$ -х лепестков спектра	70	40
23.	ГФ	$T_2(\omega_x) = 1 \cdot \begin{cases} 0 & \text{при } \omega_{x1n} \leq \omega_x \leq \omega_{x2n}, \\ 1 & \text{при остальных } \omega_x. \end{cases}$ $\omega_{x1n}, \omega_{x2n}$ - частоты среза четных лепестков	90	50

24.	ФНЧ	$T_2(\omega_x) = 1 \cdot \begin{cases} 1 & \text{при }  \omega_x  \leq \omega_{x1}, \\ 0 & \text{при }  \omega_x  > \omega_{x1}, \end{cases}$ <p>В пределах частот <math>\pm \omega_{x1}</math> должно содержаться 10 % энергии сигнала</p>	60	40
25.	ФВЧ	$T_2(\omega_x) = 1 \cdot \begin{cases} 0 & \text{при }  \omega_x  \leq \omega_{x1}, \\ 1 & \text{при }  \omega_x  > \omega_{x1}, \end{cases}$ <p>Вне частот <math>\pm \omega_{x1}</math> должно содержаться 75 % энергии сигнала</p>	80	30
26.	ФВЧ	$T_2(\omega_x) = 1 \cdot \begin{cases} 0 & \text{при }  \omega_x  \leq \omega_{x1}, \\ 1 & \text{при }  \omega_x  > \omega_{x1}. \end{cases}$ <p><math>\omega_{x1}</math> - частота среза +1-го лепестка спектра</p>	75	40

**Примечание:** ФНЧ – фильтр нижних частот, ФВЧ – фильтр высоких частот, ППФ – полосно-пропускающий фильтр, ПЗФ – полосно-заграждающий фильтр, ГФ – гребенчатый фильтр, ФФ - фазовый фильтр  
 $\omega_{x1}$  – частота среза спектра сигнала задается преподавателем

### 5.3. Расчетное задание №3 - Акустооптическая ячейка как элемент ввода радиосигналов в оптический сигнальный процессор

**Задача.** Рассчитать одноканальный акустооптический модулятор в режиме дифракции Брэгга для заданных согласно варианта (см. табл.3) значениях величин:

- центральная частота –  $f_0 = ..$  ;
- полоса акустооптической модуляции  $\Delta f = ..$ ;
- длина волны светового пучка –  $\lambda_0 = ..$ ;
- ширина светового пучка –  $D_{CB} = ..$ ;
- выходная мощность генератора –  $P_{ЭЛ.ГЕН.} = ..$ ;

Материал пьезопреобразователя – ..:

- показатель преломления –  $n = ..$ ;
- скорость распространения акустической волны –  $v^{мн}_{AK} = ..$ ;

Материал светозвукопровода – ..:

- показатель преломления –  $n = ..$ ;
- скорость распространения акустической волны –  $v_{ак}^{сзн} = ..$  .

**Необходимо рассчитать:**

1. Геометрические размеры пьезопреобразователя (ПП) и светозвукопровода (СвЗвПр);
2. Электрические параметры: Электрическую входную мощность-  $P_{ЭЛ.ВХ}$  и акустическую мощность, необходимую для отклонения светового пучка -  $P_{AK}$ ;
3. Функциональные параметры: Ширину входного светового пучка,  $D_{ВХ}$ .
4. Оценить динамический диапазон и быстродействие АОМ.

Варианты заданий представлены в табл. 3

Таблица №3 Варианты на 3-е расчетное задание

№	Материал пьезопреобразователя	Материал светозвукопровода	$f_0$ , МГц	$\Delta f$ , МГц	$\delta f$	$\eta_{d0}$
1	Ниобат лития $\text{LiNbO}_3$	$\text{TeO}_2$ Парателлурит	50	20	1	90
2	Ниобат лития $\text{LiNbO}_3$	$\text{TeO}_2$ Парателлурит	75	25	0.5	70
3	$\text{SiO}_2$ кварц	$\text{TeO}_2$ Парателлурит	100	30	2	20
4	$\text{BaTiO}_3$ титонат бария	$\text{LiNbO}_3$ Ниобат лития	200	60	1	20
5	$\text{PbMoO}_4$ молибдат свинца	$\text{LiNbO}_3$ Ниобат лития	300	120	0.5	30
6	$\text{ZnO}$ окись цинка	$\text{LiNbO}_3$ Ниобат лития	500	90	1	10
7	Ниобат лития $\text{LiNbO}_3$	$\text{LiNbO}_3$ Ниобат лития	1000	20	3	20
8	$\text{ZnO}$ окись цинка	$\text{SiO}_2$ Кристал кварц	100	20	1	5
9	$\text{ZnO}$ окись цинка	$\text{SiO}_2$ Кристал кварц	200	30	0.5	8
10	Ниобат лития $\text{LiNbO}_3$	$\text{SiO}_2$ Кристал кварц	250	40	2	10
11	Ниобат лития $\text{LiNbO}_3$	GaP фосфид галлия	400	100	1	15
12	Ниобат лития $\text{LiNbO}_3$	GaP фосфид галлия	500	200	0.5	10
13	$\text{ZnO}$ окись цинка	GaP фосфид галлия	600	250	1	20
14	$\text{ZnO}$ окись цинка	GaP фосфид галлия	800	300	3	30
15	$\text{LiNbO}_3$ Ниобат лития	$\text{LiNbO}_3$ Ниобат лития	2500	500	1	5
16	$\text{LiNbO}_3$ Ниобат лития	$\text{LiNbO}_3$ Ниобат лития	1500	300	1	10
17	Ниобат лития $\text{LiNbO}_3$	$\text{TeO}_2$ Парателлурит	50	20	1	90
18	Ниобат лития $\text{LiNbO}_3$	$\text{TeO}_2$ Парателлурит	75	25	0.5	70
19	$\text{SiO}_2$ кварц	$\text{TeO}_2$ Парателлурит	100	30	2	20
20	$\text{BaTiO}_3$ титонат бария	$\text{LiNbO}_3$ Ниобат лития	200	60	1	20
21	$\text{LiNbO}_3$ Ниобат лития	$\text{PbMoO}_4$ молибдат свинца	300	120	0.5	30
22	$\text{ZnO}$ окись цинка	$\text{LiNbO}_3$ Ниобат лития	500	90	1	10
23	Ниобат лития $\text{LiNbO}_3$	$\text{TeO}_2$ Парателлурит	60	10	3	80
24	Ниобат лития $\text{LiNbO}_3$	$\text{TeO}_2$ Парателлурит	70	20	0.5	70
25	$\text{SiO}_2$ кварц	$\text{TeO}_2$ Парателлурит	120	20	2	30
26	$\text{BaTiO}_3$ титонат бария	$\text{LiNbO}_3$ Ниобат лития	400	80	2	10
27	$\text{LiNbO}_3$ Ниобат лития	$\text{PbMoO}_4$ Молибдат свинца	300	120	0.5	30

Параметры материалов светозвукопровода приведены в табл.4, пьезопреобразователя в табл.5 (см. Приложение В).

#### 5.4. Расчетное задание №4 – Расчет акустооптического анализатора спектра (АОАС)

**Задача.** Рассчитать одноканальный акустооптический анализатор спектра (АОАС) в режиме дифракции Брэгга для заданных согласно варианта (см. табл.3) значениях величин:

центральная частота –  $f_0 =$

полоса акустооптической модуляции  $\Delta f =$

длина волны светового пучка –  $\lambda_0 =$ ;

ширина светового пучка –  $D_{вх}$ ;

выходная мощность генератора –  $P_{ЭЛ.ГЕН.} =$ ;

Материал пьезопреобразователя – плавленый кварц:

показатель преломления –  $n =$ ;

скорость распространения акустической волны –  $v_{ак}^{nm} =$ ;

Материал светозвукопровода –

показатель преломления –  $n =$

скорость распространения акустической волны –  $v_{ак}^{сзн} =$ .

Геометрические размеры пьезопреобразователя (ПП)  $h, l, d$ ;

светозвукопровода (СвЗвПр)  $-a, b, c$ .

Требуемая акустическая мощность  $P_{ак} = \dots$

#### **Задание:**

1. Оптимизировать функциональные параметры АОАС - ширину входного светового пучка,  $D_{ВХ}$ .
2. Выбрать фотоприемное устройство.
3. Определить функциональные параметры АОАС – фокусное расстояние линзы, осуществляющей преобразование Фурье; место расположения и размеры светочувствительной части фотоприемного устройства в спектральной плоскости.
4. Оценить минимальное число разрешимых элементов по частоте  $\delta f$ , время максимального и минимального быстрого действия  $\tau_{max}, \tau_{min}$ .
5. Определить динамический диапазон АОАС.

**Указания:** Для нахождения недостающих данных необходимо воспользоваться таблицами №1,2,3 и данными, полученными в расчетной работе №3.

Параметры материалов светозвукопровода приведены в табл.4, пьезопреобразователя в табл.5 Приложения В.

### **5.5. Пример выполнения расчетного задания**

1. Расчетное задание №2 Фильтрация оптических сигналов
2. Исходные данные для расчета:

$$\lambda = 0.63 \text{ мкм} = 0.63 \cdot 10^{-6} \text{ м},$$

$$F = 0.05 \text{ м} = 5 \text{ см},$$

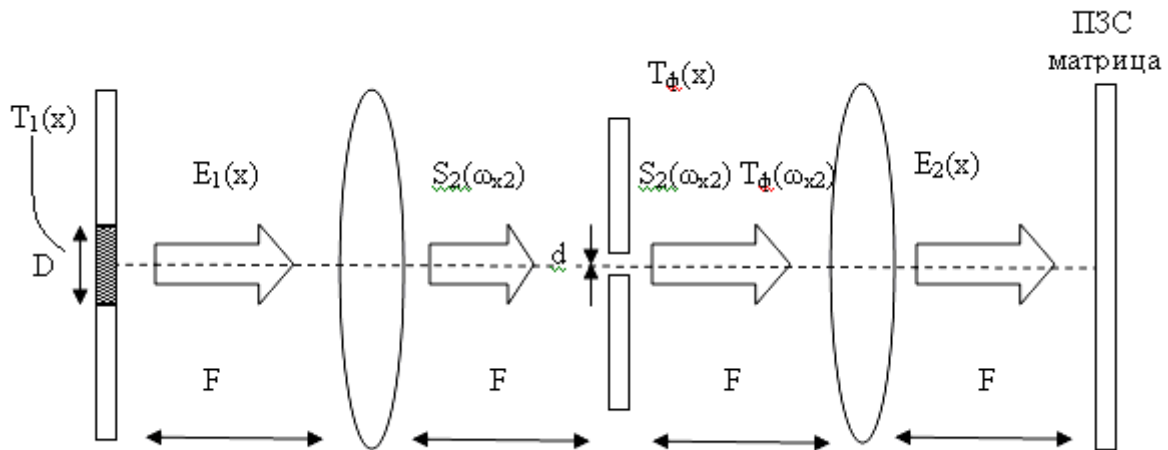
$$D = 0.01 \text{ м} = 1 \text{ см}.$$

### 3. Задание

- Синтезировать оптический фильтр по заданному критерию. Синтезировать фильтр, выделяющий 90 % энергии спектра оптического сигнала формой «треугольный импульс».
- Определить геометрические размеры фильтра.
- Произвести обратное преобразование.

### 4. Решение

Схематически принцип оптической фильтрации изображён ниже.



Исходный сигнал, имеющего форму «треугольный импульса», зададим в виде:

$$E_1(x) := \begin{cases} x + \frac{D}{2} & \text{if } \frac{-D}{2} \leq x \leq 0 \\ \frac{D}{2} - x & \text{if } 0 \leq x \leq \frac{D}{2} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

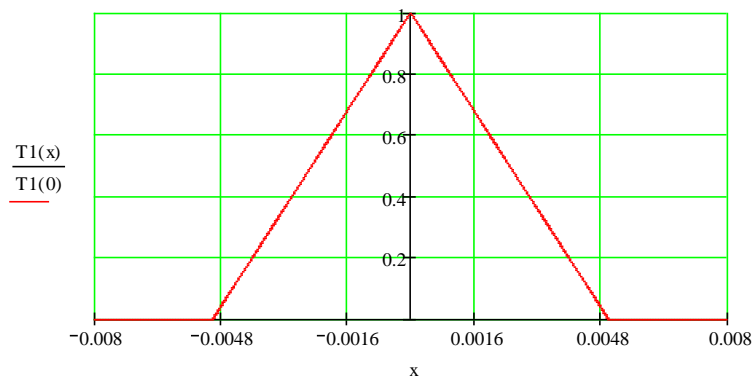


Рисунок 1 – Исходный сигнал (по заданию)



Пространственный спектр исходного сигнала :

$$S_{|\omega_{x2}|} := \int_{-0.5 \cdot D}^{0.5 \cdot D} E_1(x) \cdot e^{-i \cdot \omega_{x2} \cdot x} dx$$

Восстановленный после фильтра сигнал:

$$E_2(x) := \left[ \frac{1}{2\pi} \left( \int_{-\infty}^{\infty} T_2(\omega_{x2}) \cdot S_{|\omega_{x2}|} \cdot e^{i \cdot \omega_{x2} \cdot x} d\omega_{x2} \right) \right]$$

Необходимо определить спектр сигнала.

$$E_2(\omega_{x2}) = \int_{-\frac{D}{2}}^{\frac{D}{2}} T(x_1) \cdot e^{i \cdot \omega_{x2} \cdot x_1} dx_1 = \int_0^{\frac{D}{2}} \left(1 - \frac{2x_1}{D}\right) e^{-i \cdot \omega_{x2} \cdot x_1} dx_1 + \int_{-\frac{D}{2}}^0 \left(1 - \frac{2x_1}{D}\right) e^{-i \cdot \omega_{x2} \cdot x_1} dx_1;$$

$$E_2(\omega_{x2}) = -\frac{1}{\omega} \left( e^{-i \frac{D}{2} \omega_{x2}} - 1 \right) + \frac{2}{D} \left[ \left( \frac{D}{2\omega_{x2}} - \frac{1}{\omega_{x2}} \right) e^{-i \frac{D}{2} \omega_{x2}} + \frac{1}{\omega_{x2}} \right] - \frac{1}{\omega} \left( 1 - e^{i \frac{D}{2} \omega_{x2}} \right) - \frac{2}{D} \left[ -\frac{1}{\omega_{x2}} - \left( -\frac{D}{2\omega_{x2}} - \frac{1}{\omega_{x2}} \right) e^{i \frac{D}{2} \omega_{x2}} \right]$$

;

$$E_2(\omega_{x2}) = -\frac{1}{\omega} e^{-i \frac{D}{2} \omega_{x2}} + \frac{1}{\omega} + \frac{1}{\omega} e^{-i \frac{D}{2} \omega_{x2}} - \frac{2}{D\omega_{x2}} e^{-i \frac{D}{2} \omega_{x2}} + \frac{2}{D\omega_{x2}} - \frac{1}{\omega} + \frac{1}{\omega} e^{i \frac{D}{2} \omega_{x2}} + \frac{2}{D\omega_{x2}} - \frac{1}{\omega} e^{-i \frac{D}{2} \omega_{x2}} - \frac{2}{D\omega_{x2}} e^{i \frac{D}{2} \omega_{x2}}$$

;

$$E_2(\omega_{x2}) = \frac{4}{D\omega_{x2}^2} - \frac{2}{D\omega_{x2}^2} \left( e^{-i \frac{D}{2} \omega_{x2}} + e^{i \frac{D}{2} \omega_{x2}} \right) = \frac{4}{D\omega_{x2}^2} \left( 1 - \cos\left(\frac{D}{2} \omega_{x2}\right) \right).$$

$$E_2(\omega_{x2}) = \frac{4}{D\omega_{x2}^2} \left( 1 - \cos\left(\frac{D}{2} \omega_{x2}\right) \right).$$

$$S(0) = 5 \cdot 10^{-3}.$$

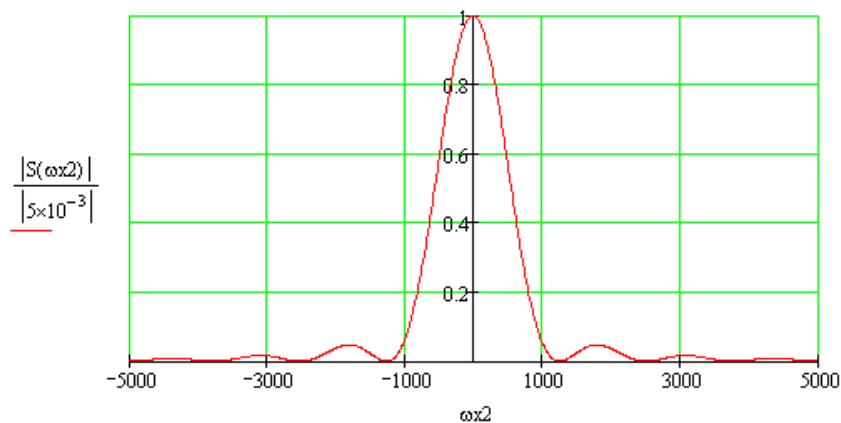


Рисунок 2 – Нормированный спектр сигнала

Определим энергию спектра сигнала и ширину окна ППФ.

$$I(\omega_{x2}) = 2 \int_0^{\omega_{x2}} |E_2(\omega_{x2})|^2 d\omega_{x2}.$$

Изобразим нормированную функцию энергии и определим необходимую

координату графически, используя пакет MathCad 13.

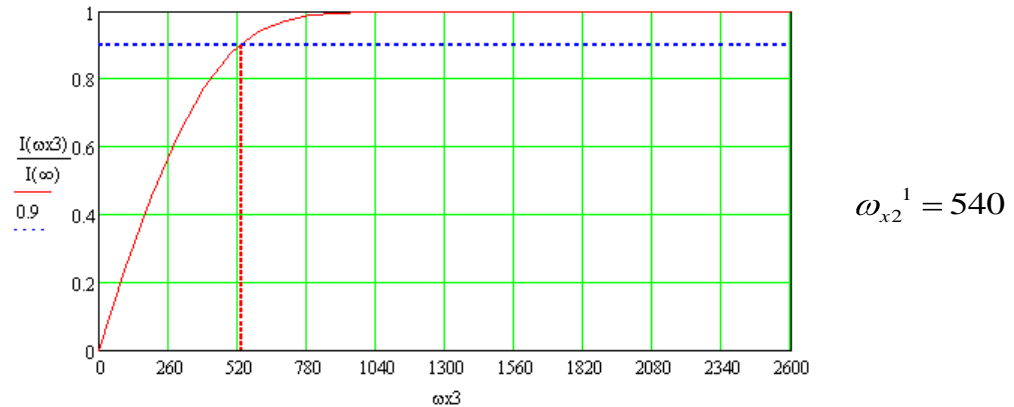


Рисунок 3 – Зависимость энергии сигнала от координаты  $\omega_{x3}$

Представим аналитическое решение, т.е. определим 30% от энергии  $I$ . Меняя пределы интегрирования и используя пакет MathCad 11, определим необходимую нам координату.

$$I_{90\%} = I(540).$$

Определим ширину окна фильтра (рис.5):

$$\Delta\omega_{x2} = 2\omega_{x2}^1 = 1080$$

$$d = \frac{\lambda \cdot F \cdot \Delta\omega_{x2}}{2\pi} = \frac{0.63 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 10^{-2} \cdot 1080}{2 \cdot 3.14} = 5.414 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 5.414 \text{ мкм}$$

$$T_{\phi} \omega_{x2} = \begin{cases} \frac{4}{D\omega_{x2}^2} \left( 1 - \cos\left(\frac{D}{2}\omega_{x2}\right) \right) & |\omega_{x2}| \leq 540 \\ 0 & |\omega_{x2}| > 540 \end{cases}$$

Изобразим спектр сигнала после фильтрации.

$$S_2(\omega_{X2}) = T_2(\omega_{X2}) \cdot S(\omega_{X2}).$$

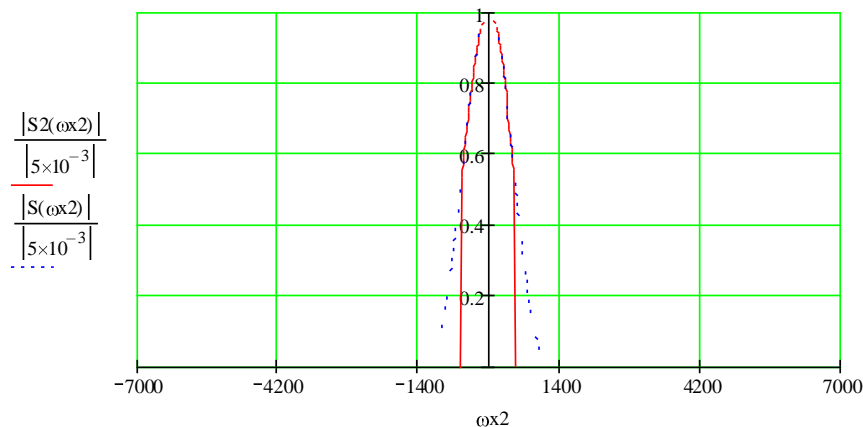


Рисунок 4 – Спектр сигнала на выходе фильтра

На рис. 4 сплошной линией изображен спектр сигнала после фильтрации, а пунктиром спектр исходного сигнала.

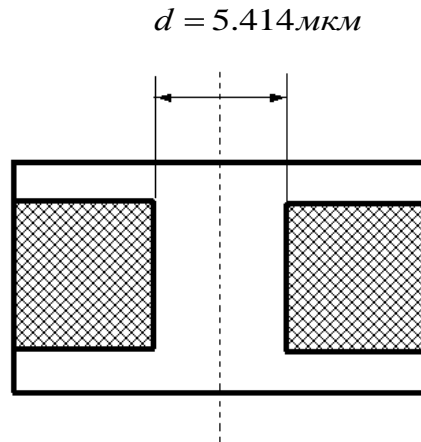


Рисунок 5 – Физическая реализация фильтра

Для того чтобы восстановить сигнал необходимо взять обратное преобразование Фурье от функции спектра после фильтрации:

$$E2(x) := \left[ \frac{1}{2\pi} \left( \int_{-\infty}^{\infty} T2(\omega x^2) \cdot S(\omega x^2) \cdot e^{i\omega x^2 \cdot x} d\omega x^2 \right) \right]$$

Используя пакет MathCad 13, построим график этой функции (рис.6).

$$E2(x) := \left[ \frac{1}{2\pi} \left[ \int_{-540}^{540} \frac{4}{D \cdot \omega x^2} \cdot \left( 1 - \cos\left(\frac{\omega x^2 \cdot D}{2}\right) \right) \cdot e^{i\omega x^2 \cdot x} d\omega x^2 \right] \right]$$

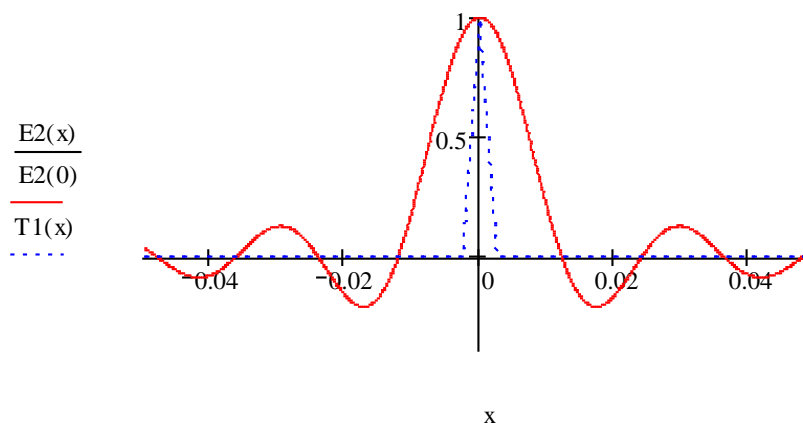


Рисунок 6 – Восстановленный сигнал

## 6. ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЕ ВОПРОСЫ

### 6.1. Перечень экзаменационных вопросов

1. Оптические методы обработки информации. Достоинства этих методов.
2. Двумерный оптический сигнал, его информационная структура.
3. Скалярная теория дифракции: формула Гюйгенса-Френеля, дифракции Френеля и Фраунгофера.
4. Преобразование световых полей элементами оптических систем
5. Преобразование Фурье (прямое) в оптической системе.
6. Обратное преобразование Фурье в оптической системе.
7. Операция интегрирования в оптической системе.
8. Операция фильтрации в оптической системе.
9. Операция дифференцирования в оптической системе.
10. Вычисление функции свертки в оптической системе.
11. Вычисление функции корреляции в оптической системе.
12. Согласованная фильтрация в оптике.
13. Голографический метод создания фильтров.
14. Фотопленка как оптический транспарант, ее основные характеристики.
15. АО модулятор как оптический транспарант.
16. АО частотомер, функциональная схема, принцип действия.
17. Области применения акустооптических процессоров в современной радиоэлектронике (системы глобальной ориентации),
18. АО процессор для обработки сигналов фазированных антенных решеток
19. Обобщенная структурная схема построения волоконно-оптической линии связи (ВОЛС),
20. Основные функциональные блоки ВОЛС, топологические реализации.
21. Каналообразование: частотное и временное разделение каналов.
22. Цифровые плезиохронные ВОЛС: скорость передачи, канальность, группобразование.
23. Цифровые синхронные ВОЛС, основные принципы группобразования
24. Волоконно-оптические сети: топологии, особенности. Полностью оптические сети.
25. Планарные и полосковые оптические волноводы.
26. Одномодовый и многомодовый режимы распространения,
27. Дисперсия в оптических волноводах.
28. Оптическое волокно (ОВ). Особенности распространения излучения по ОВ.
29. Режим слабонаправляющего волновода.
30. Характеристическое уравнение, моды ОВ.
31. Виды дисперсии в ОВ.
32. Основные параметры ОВ: профиль показателя преломления,
33. Основные параметры ОВ числовая апертура,
34. Основные параметры ОВ Причины потерь в ОВ. коэффициент затухания,
35. Основные параметры ОВ . Полоса пропускания.

36. Оптические кабели и разъемы, их конструкции и параметры.
37. Методы изготовления оптических волокон и кабелей.
38. Источники излучения передатчиков оптических линий связи: светодиоды.
39. Источники излучения передатчиков оптических линий связи - полупроводниковые лазеры, их основные рабочие характеристики.
40. Ввод оптического излучения в волокно.
41. Фотоприемники оптических систем передачи: лавинные фотодиоды, принцип действия и параметры.
42. Фотоприемники оптических систем передачи: p-i-n фотодиоды, принцип действия и параметры.
43. Функциональная схема линейной части фотоприемного тракта.

Подготовка к экзаменам содействует систематизации, обобщению и закреплению знаний, устранению пробелов, возникающих в процессе учебных занятий, и должна вестись в течение всего семестра. *Организация самостоятельной работы в семестре является залогом успешной сдачи зачетов и экзаменов.*

## **6.2. Структура экзаменационного билета.**

Экзаменационный билет состоит из двух теоретических вопросов по основным разделам курса «Оптические устройства в радиотехнике».

## **7. ТЕСТОВЫЙ КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ**

Компьютерный тестовый контроль знаний (контрольно-измерительные материалы) предназначен для контроля знаний студентов по основным разделам курса.

Методические указания к тестовому контролю знаний представлены в локальной сети кафедры СВЧиКР в разделе с методическими материалами к дисциплине «Оптические устройства в радиотехнике» - S:\ШаранговичСН\УМК ОУвР 210302.

## **8. КОНТРОЛЬНЫЕ ЭТАПЫ И ИХ ОЦЕНКА ПО БРС**

### **8.1. Методика текущего контроля освоения дисциплины**

Осуществляется в соответствии с **Положением о порядке использования рейтинговой системы для оценки успеваемости студентов** (приказ ректора 25.02.2010 № 1902) и основана на **бально-рейтинговой системы** оценки успеваемости, действующей с 2009 г., которая включает **текущий** контроль выполнения элементов объема дисциплины по элементам контроля с подведением текущего рейтинга (п.8.2.) и **итоговый** контроль.

**Правила формирования пятибалльных оценок** за каждую контрольную

точку (КТ1, КТ2) осуществляется путем округления величины, рассчитанной по формуле:

$$КТx|_{x=1,2} = \frac{(Сумма \_ баллов, \_ набранная \_ к \_ КТx) * 5}{Требуемая \_ сумма \_ баллов \_ по \_ балльной \_ раскладке}.$$

**Итоговый контроль освоения** дисциплины осуществляется на экзамене по традиционной пятибалльной шкале. Обязательным условием перед сдачей экзамена является выполнение студентом необходимых по рабочей программе для дисциплины видов занятий: выполнение и защита результатов лабораторных работ, сдача контрольных работ.

**Формирование итоговой суммы баллов** осуществляется путем суммирования семестровой (до 70 баллов) и экзаменационной составляющих (до 30 баллов).

## 8.2. Применение балльно-рейтинговой системы для студентов очной формы обучения

### Распределение баллов по элементам контроля

Элементы учебной деятельности	Кол-во элементов	Длительность элемента, час.	Кол - во баллов за 1 элемент контроля	Срок контроля, (неделя с начала семестра)	Кол - во баллов (всего)
Посещение занятий	24	2	0,5	1-15	<b>12</b>
Выполнение контрольных работ	4	1	4	3, 5, 7, 9	<b>16</b>
Выполнение и защита индивидуальных заданий	4	2	8	6-17	<b>32</b>
Компонент своевременности				1-17	<b>10</b>
Сдача экзамена (максимум)					<b>30</b>
<b>Итог</b>					<b>100</b>

Таблица распределения баллов в течение семестра

Элементы учебной деятельности	Максимальный балл на 1-ую контрольную точку с начала семестра	Максимальный балл за период между 1КТ и 2КТ	Максимальный балл за период между 2КТ и на конец семестра	Всего за семестр
Посещение занятий	4	4	4	<b>12</b>
Контрольные работы	8	4	4	<b>16</b>
Выполнение и защита индивидуальных заданий	8	16	8	<b>32</b>
Компонент своевременности	3	4	3	<b>10</b>
<b>Итого максимум за период:</b>	<b>23</b>	<b>28</b>	<b>19</b>	<b>70</b>
Сдача экзамена (максимум)				<b>30</b>
<b>Нарастающим итогом</b>	<b>23</b>	<b>51</b>	<b>70</b>	<b>100</b>

## 9. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ.

### РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

#### а) основная литература:

1. Ушаков В.Н и др. Оптические устройства в радиотехнике: Учеб. пособие для вузов.- М.: Радиотехника, 2005. -240 с. **(70)**
2. Наумов К.П., Ушаков В.Н. Акустооптические сигнальные процессоры: Учеб. пособие для вузов. – М.: САЙНС-ПРЕСС, 2002. -80 с. **(20)**.
3. Гитин Л.Н., Кочановский В.Я. Волоконно-оптические системы передачи: Учеб. пособие/ - М.: Радио и связь, 2003. - 128 с. **(60)**

#### б) дополнительная литература:

4. Слепов Н. Н.. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи (АТМ, РDН, SDН, SONET и WDM )/ - 2-е изд., испр. . - М.: Радио и связь, 2003. - 468 с. **[60]**
5. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи: Пер. с англ./ - М.: Техносфера, 2006. – 447 с. **(15)**
6. Складов О.К. Современные волоконно-оптические системы передачи, аппаратура и элементы.-М.: Солон-Р, 2001. -238 с. **(3)**
7. Гудмен ДЖ. Введение в Фурье-оптику.-М.: Мир , 1970.- 364с.
8. Заславский К.Е. Волоконно-оптические системы передачи со спектральным уплотнением: Учебное пособие для вузов. - Новосибирск: СибГУТИ, 2005. – 136 с. **(20)**
9. Заславский К.Е. Волоконно-оптические системы передачи со спектральным уплотнением ВОСП-WDM (справочное пособие). -Новосибирск: СибГУТИ. -2006. -69 с.
10. Прохоров Д.В. Атмосферные оптические линии связи// «Технологии и средства связи», 2004, №1. - С. 34-39.
11. 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, 2007. – 153 с. **[25]**.
12. С.Н. Шарангович, Е.А. Довольнов Компьютерное исследование многоволновых эрбиевых волоконно-оптических усилителей: Методические указания к лабораторным работам по дисциплине "Мультиплексорное оборудование оптических цифровых систем связи" для студентов специальности 210401// - Томск: ТУСУР, 2006. - 31 с.
13. С.Н. Шарангович, В.Г. Миргород Компьютерное исследование оптического мультиплексора на основе массива планарных волноводов (AWG): Методические указания к лабораторным работам по дисциплине

- "Мультиплексорное оборудование оптических цифровых систем связи" для студентов специальности 210401// - Томск: ТУСУР, 2009. - 46 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://portal.tusur.ru/>
14. Ефанов В.И. Сборник задач по волоконно-оптическим линиям связи. - Томск: ТУСУР, 2007.– 50с.
  15. Свистунова Е.В. Как грамотно оформить, правильно презентовать и успешно защитить письменную работу : Практические рекомендации для студентов вузов. – М.: СтереомИР, 2006. – 114 с.: ил.
  16. В.В. Богатырева, А. Л. Дмитриев. Оптические методы обработки информации / Учебное пособие. – СПб: СПбГУИТМО, 2009. – 74 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://window.edu.ru/window/library?p\\_rid=64067](http://window.edu.ru/window/library?p_rid=64067)
  17. Terawave [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.teralink.ru/>.
  18. Официальный сайт компании Terawave Communications [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tarawave.com/>.
  19. Официальный сайт компании Huawei. Оборудование GPON [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.huawei.com/>.
  20. Оборудование WDM. Официальный сайт компании ОПТИКТЕЛЕКОМ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.optictelecom.ru/> .
  21. Официальный сайт компании EXFO [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.exfo.com/> .
  22. Официальный сайт компании Телеком-Транспорт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tt.ru/>



## Приложение А

### ВЫПОЛНЕНИЕ РЕФЕРАТИВНЫХ РАБОТ

#### 1. Общие требования

**Реферат** - краткое изложение содержания первичного документа (или его части) с основными фактическими сведениями. Роль первичного документа выполняет научное издание, монография, статьи. Второе значение этого понятия - доклад на определенную тему, включающий обзор соответствующих литературных и других источников, далее будем называть этот вид работы «реферат-доклад». Обычно студент сталкивается и с той, и с другой формой реферата [15].

Прежде чем выбрать тему реферата, определите свой интерес, над какой проблемой Вы хотели бы поработать, более глубоко изучить, и сформулируйте тему. Перед началом работы над рефератом следует наметить небольшой план и подобрать литературу. Прежде всего, воспользуйтесь литературой, рекомендованной учебной программой, а затем расширьте список источников, не забудьте использовать реферативные и специальные журналы, где Вы найдете новейшую научную информацию.

*Реферат составляется по следующему примерному плану:*

1. тема, предмет изучения, цель реферируемой работы;
2. методы проведения исследования в реферируемой работе. Если они новы, то их следует описать, если широко известны, то их следует только назвать;
3. существо работы, конкретные результаты работы. Приводятся основные теоретические, экспериментальные, описательные результаты, при этом предпочтение отдается новым результатам;
4. выводы (оценки, приложения), принятые и отвергнутые гипотезы, описанные в реферируемом источнике.

Если же реферат выполняется по нескольким источникам (реферат-доклад), необходимо написать **вводную часть**, раскрывающую общие подходы к рассматриваемой проблеме, и показать те особенности темы, которые вы собираетесь раскрыть, основываясь на реферируемых источниках, в конце работы сделать **обобщающие выводы и заключения**. Также необходимо в реферате-докладе оформлять **ссылки** на каждый реферируемый источник.

Обычно в реферате избегают вводных, общих фраз (например, «автор статьи рассматривает...»), излагают материал кратко и точно. Умение отделять основную информацию от второстепенной - одно из основных требований к реферирующему. Хорошие результаты в выработке умения выделять основную информацию дает известный прием, названный условно *фильтрацией и сжатием текста*, который включает в себя две операции: ^

1. разбивку текста на части по смыслу;
2. нахождение в каждой части текста одного слова, краткой фразы или обобщающей формулировки, выражающих основу содержания (ключевое

понятие) этой части.

Основное *отличие реферата от реферируемого текста* - отсутствие избыточного материала, то есть удаление отдельных слов или частей текста, не несущих значимой информации, а также замена развернутых оборотов текста более лаконичными сочетаниями (свертывание).

## **2. Структура и оформление реферата**

Примерный план реферата:

1. Титульный лист.
2. План-оглавление.
3. Введение.

Дается постановка вопроса, объясняется выбор темы, ее актуальность и значимость, указываются цель и задачи реферата, дается характеристика используемой литературы.

4. Основная часть.

Состоит из нескольких разделов. Каждый раздел основной части раскрывает отдельную проблему или одну из ее сторон и логически является продолжением предыдущего. Допускается включение таблиц, графиков, схем.

5. Заключение.

Подводятся итоги или дается обобщенный вывод по теме реферата, даются рекомендации.

6. Библиография. Список реферируемых источников с указанием их полных библиографических данных

При написании реферата используются не менее 8-10 различных источников.

### **Темы рефератов**

1. Оптические устройства распознавания образов на основе нейронных сетей
2. Оптические нелинейные элементы для реализации логических операций
3. Оптические процессоры обработки сигналов ФАР
4. Адаптивные оптические фильтры на основе фоторефрактивных кристаллов
5. Принципы построения оптических компьютеров
6. Многоволновые оптические источники излучения
7. Многоволновые оптические мультиплексоры и демультиплексоры
8. Оптические мультиплексоры ввода/вывода каналов
9. Многоволновые оптические усилители
10. WDM волоконно-оптические интерференционные фильтры
11. WDM фильтры на основе дифракционных решеток
12. Волноводные оптические компоненты спектрального мультиплексирования /демультиплексирования
13. Волоконно-оптические системы со спектральным разделением (WDM,DWDM,HDWDM, CWDM)
14. Принципы оптического мультиплексирования в полностью оптических сетях

## Приложение Б

### ПОДГОТОВКА ПРЕЗЕНТАЦИИ В POWER POINT

Основные принципы подготовки информации на слайдах [15].

**1. Принцип контраста** — включать контрастные элементы, т.е. использовать разный размер шрифтов, разные цвета, символы.

Контраст — это то, что привлекает внимание.

**2. Принцип повторяемости** — в одной теме использовать повторение некоторых элементов оформления, например, использовать одинаковые рамки, цвет поля, тип шрифта. Это создает ощущение организованности и единства.

**3. Принцип упорядоченности** — элементы на странице не должны быть расположены произвольно (хаотично), они должны иметь некоторую видимую связь между собой.

**4. Принцип близости** — элементы, связанные общим смыслом, должны быть сгруппированы вместе, образуя как бы некоторую визуальную единицу.

Кроме этого, существуют некоторые **конкретные правила представления текстовой и статистической информации на слайдах:**

**Занимайте не больше четырех-шести строк.** Не включая заголовков и подзаголовков, текстовая информация должна занимать не более 4-6 строк. Чтение большего количества строк отвлекает внимание слушателей и затрудняет понимание.

**Используйте не более 40 символов в строке, включая пробелы.** Если использовать большее количество символов, то на слайде будет недостаточно свободного (чистого) пространства, которое необходимо оставлять для того, чтобы слушатели могли быстро «схватывать» информацию. Кроме того, плотно заполненный слайд выглядит не структурированным. Необходимо оставлять свободное пространство по краям и с боков.

**Не пишите предложения, а только ключевые слова.** Поскольку показ слайдов сопровождается объяснениями, нет никакой необходимости перегружать их словами.

**Используйте как заглавные, так и строчные буквы.** Исследования показывают, что использование заглавных и строчных букв облегчает чтение и распознавание слов. При использовании же только заглавных букв чтение и распознавание слов замедляются.

**Используйте одинаковые и стандартные шрифты.** Использование слишком замысловатых и непривычных шрифтов (или их чередование) потребует дополнительных усилий, затруднит чтение и восприятие информации.

**Используйте цвет, большие буквы для того, чтобы выделить главное.** Можно усилить контрастность, используя цвет, буквы большего размера или добавляя простые изображения (картинки). Крупные буквы и яркий цвет направляют взгляд слушателей на то, что необходимо подчеркнуть.

**Не увлекайтесь спецэффектами.** Они должны применяться обоснованно. Помните, что от «летающих» букв рябит в глазах.

**Проверьте соответствие слайдов тексту доклада.** Очень неприятно видеть удивленного докладчика, у которого неожиданно закончились слайды.

**Пользуйтесь дополнительными возможностями Power Point.** В

частности, у него есть возможность включить «представление докладчика». При этом слушателям будут видны только слайды, а на мониторе докладчика будут выводиться также заметки к слайду, идти отсчет времени и показываться следующие слайды.

**Презентация - это не текст доклада.** Докладчик, превращающий свой доклад в комментарии к слайдам или того хуже - декламирующий текст со слайдов, выглядит неприглядно. Слайды должны дополнять сказанное им, а не повторять. В крайнем случае слайды могут конспективно фиксировать основные пункты, помогая следить за речью.

**Принято завершать презентацию слайдом с контактными данными или завершающей фразой.** Например, «Спасибо за внимание!». Тогда аудитория не будет шокирована внезапно оборвавшимся показом слайдов.

## Приложение В

### Параметры материалов для светозвукопровода АОМ

Таблица №4

Матер.	Длина волны света, $\lambda_{\text{св.}}$ , мкм	Коэфф. Оптич. Погл., $\alpha$ , Нп/м	Показ. Прел. Среды, $n_0$	Плотность Среды, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Скорость Акус. Волны, $v_{\text{ак}}$ , м/с	Коэф. Акуст. Погл., $\alpha_{\text{ак}}$ , Дб/см (500МГц)	Коэфф. АО. Качества $M_2 \cdot 10^{-15}$ , с <sup>3</sup> /кг	Упруго оптич. Коэфф.р	Агрег.е Состояние
TeO <sub>2</sub> Парателлурит	0,63	3	2,26	5720	650	50	800	0,18	тверд
SiO <sub>2</sub> Плав кварц	0,63	3,2	1,46	2200	5960	3	1,51	0,274	тверд
LiNbO <sub>3</sub> ниоб лития	0,63	2	2,29	4700	6570	0,03	7	0,255	тверд
GaP фосфид галлия	0,63	2	3,31	4180	6300	2	45	0,161	тверд
PbMoO <sub>4</sub> молибдат свинца	0,63	2	2,29	6950	3630	2,5	34	0,255	тверд

### Параметры материалов для пьезопреобразователя АОМ

Таблица №5

Материал Пьезопреобр.	Тип УЗВ (ультразвук. Волны)	Относительная проницаем. среды $\epsilon_r$	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Коэфф. электромехан. связи, $K_{\text{эл}}$	Скорость звука, $v_{\text{ак}}$ , м/с
Ниобат лития LiNbO <sub>3</sub>	Продольный	27,5	4640	0,55	7330
ВаТіО <sub>3</sub> титонат бария	Продольный	1260	5700	0,384	5470
ZnO окись цинка	Продольный	4,58	2650	0,098	5720
PbMoO <sub>4</sub> молибдат свинца	Продольный	26,8	6950	0,1	3750
Сульфид кадмия	Продольный	$\epsilon_r / \epsilon = 9,5$	5680	0,15	4460

**Учебное издание**

**Куш Галина Григорьевна**  
**Шарангович Сергей Николаевич**

**ОПТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА**  
**В РАДИОТЕХНИКЕ**

Учебно-методическое пособие по практическим занятиям и  
организации самостоятельной работы студентов по дисциплине  
«Оптические устройства в радиотехнике»

Формат 60x84 1/16. Усл. печ. л.-----.

Тираж 30 экз. Заказ-----.

Отпечатано в Томском государственном университете  
систем управления и радиоэлектроники.

634050, Томск, пр. Ленина, 40. Тел. (3822) 533018.