

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

УДК 628.92/.97

Белян Александр Андреевич

Синтез оптических цифровых элементов и их применение для обработки  
сигналов

**АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание степени магистра технических наук

по специальности 1-41 80 02 Технология и оборудование для производства  
полупроводников, материалов и приборов электронной техники

Научный руководитель

Боженков Владимир Владимирович

Кандидат технических наук, доцент

Минск 2016

## ВВЕДЕНИЕ

Цель работы — анализ оптических цифровых элементов и их применение для обработки сигналов. Цифровые устройства обеспечивают высокую помехоустойчивость и точность реализации алгоритмов обработки сигналов в их основе, как правило, используется явление интерференции оптических волн и нелинейность оптических устройств. К ним относятся интерферометры Маха-Цандера и Фабри-Перо, двух фотонная логика на фотонном кристалле, цифровая голография и устройства на нанотрубках и нановолокнах. На этих устройствах реализуются типовые логические функции: И, ИЛИ, НЕ и на их основе триггеры и регистры. На практике используются устройства памяти ROM, RAM, кодеры декодеры сигналов, формирователи оптических кодовых последовательностей на основе решеток Брегга и голографии и анализаторы спектра в виде оптического БПФ и голографические анализаторы спектра. Области применения оптических логических устройств являются: оптические кодеры и декодеры, формирователи потоков данных, оптические сети связи с OFDM и CDMA, устройства оптической памяти, оптические процессоры, оптические анализаторы спектра на основе ДПФ и голографических устройств. Применение указанных устройств из-за их ультравысокого быстродействия, малых габаритов и потребления весьма перспективно для передачи и обработки оптических сигналов, хранения информации, а также для применения в цифровых оптических процессорах. Применение оптических систем с ортогональной частотной модуляцией (OFDM) позволяет перейти к терагерцовым скоростям передачи. Это направление успешно развивается. В настоящее время наиболее подходящими для реализации устройств передачи и обработки оптических сигналов являются интерферометры Маха-Цандера и Фабри-Перо. Наиболее полно преимущества реализуются применением оптических систем при полной замене электронных устройств оптическими вплоть до "последней мили".

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА**

### **Цель работы:**

Целью диссертации является анализ существующих оптических логических элементов и разработка концепт проекта оптических логических элементов.

### **Положения выносимые на защиту:**

Классификация оптических логических элементов по их конструкционным особенностям.

Разработка физической модели оптических логических элементов.

Разработка концепт проекта оптических логических элементов.

### **Апробация результатов диссертации**

Основные теоретические и практические результаты диссертационной работы были представлены в следующей научной конференции: 52 научно-техническая конференция студентов и магистрантов БГУИР: Тезисы докладов – Минск, 2016 и в статье в научном журнале.

### **Структура и объём диссертации**

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, библиографического списка. Объём магистерской диссертации составляет 59 страниц, включая 18 иллюстраций, 8 таблиц, библиографического списка из 15 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Первая глава диссертационной работы имеет обзорный характер. Рассматриваются существующие в мире оптические логические элементы и принципы их построения. Так же даётся их классификация по конструкционным особенностям.

В настоящее время существует огромное множество конструкций и технологий изготовления оптических логических элементов. В связи с этим можно их классифицировать по конструкционным особенностям. В основе большинства элементов лежит принцип создания нелинейной среды распространения сигнала. Одним из массово изучаемых методов является использование полупроводникового оптического усилителя (SOA).

SOA представляет собой нелинейный усилитель небольшого размера, который предлагает преимущества быть интегрированным для получения последующей системы, необходимой в системе оптической связи. Низкое энергопотребление SOA выставляется и их одномодовых волноводов структуры делают их особенно подходящими для использования с одномодовым волокном. В настоящее время SOA является наиболее развитым оптическим усилителем, который быстро прогрессирует в направлении оптической обработки сигналов.

Следовательно можно представить следующую классификацию:

- 1 Оптические элементы на основе SOA;
- 1.2 Оптические логические элементы на основе ультра нелинейного интерферометра;
- 1.3 Оптические логические элементы на основе интерферометра Маха-Цандера;
- 1.4 Оптические логические элементы на основе интерферометра Майкельсона;
- 1.5 Оптические логические элементы на основе интерферометра Саньяка;
- 1.6 Оптические логические элементы на основе интерферометра задержки;
- 2 Оптические элементы без использования SOA;

2.1 Оптические логические элементы на основе волокна с дисперсионным смещением/высоко нелинейного волокна;

2.2 Оптические логические элементы на основе интерферометра Фабри-Перо;

2.3 Оптические логические элементы на основе многоветвевго волновода;

2.4 Фотонные оптические логические элементы.

Во второй главе рассмотрен физический принцип работы разрабатываемых элементов.

Сложение частот света — многофотонный процесс взаимодействия лазерного излучения с веществом, при котором поглощаются два или больше квантов лазерного излучения, а излучается один квант с частотой, равной сумме частот поглощённых квантов.

В процессе поглощения нескольких квантов внешнего поля электрон в атоме или молекуле переходит из одного связанного состояния в другое. В случае распространения двух волн с различными частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$  атом поглощает два кванта с этими частотами и затем излучает один квант с частотой  $\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$  (согласно закону сохранения энергии  $h\omega_3 = h\omega_1 + h\omega_2$ ).

Фундаментальные законы квантовой физики, описывающие взаимодействие света с веществом на микроскопическом уровне, — это закон А. Эйнштейна для фотоэффекта и постулаты Н. Бора.

Обратимся сначала к закону А. Эйнштейна, согласно которому электрон, связанный в квантовой системе, может перейти в свободное состояние в результате поглощения кванта света (фотона), если его энергия больше энергии связи электрона:

$$h\omega > I \quad (2.1)$$

В этом соотношении  $\omega$  — частота света,  $h$  — постоянная Планка, а  $I$  — энергия связи электрона — в зависимости от типа квантовой системы представляет собой потенциал ионизации атома или молекулы, ширину запрещенной зоны в полупроводнике, работу выхода из поверхности металла. В

интересующем нас случае взаимодействия света с атомом соотношение (2.1) описывает процесс фотоионизации атома.

Этот знаменитый закон А. Эйнштейн сформулировал в 1905 году, исходя из анализа экспериментальных данных А.Г. Столетова и Г. Герца о внешнем фотоэффекте с поверхности металла. В дальнейшем соотношение (2.1) было неоднократно проверено на других различных квантовых объектах, в том числе и на атомах, и уже более полувека используется для измерения энергий связи электрона.

Одним важным следствием соотношения (2.1) является наличие так называемой “красной границы” при взаимодействии света с веществом. Поглощение падающего света за счет ионизации среды ограничено с красной стороны спектра, то есть со стороны малых частот (малой энергии фотона). Именно наличие “красной границы” обуславливает отсутствие поглощения в атмосфере, связанного с ионизацией атомов и молекул, в видимой части спектра солнечного излучения ( $h\nu < 1$ ) и наличие поглощения для ультрафиолетовой части спектра ( $h\nu > 1$ ).

Обобщим соотношение (2.1), представляющее собой основной закон фотоионизации, на процесс многофотонной ионизации (рисунок 2.1 а). Условие реализации процесса многофотонной ионизации может быть записано следующим образом:

$$k h \omega > 1 \quad (2.2)$$

В неравенстве (2.2) величина  $k$  – число фотонов, в результате поглощения которых происходит процесс многофотонной ионизации.

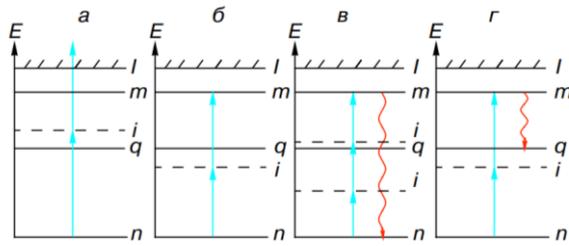


Рисунок 2.1 Схемы многофотонных процессов

а – Многофотонная ионизация атома, б – многофотонное возбуждение атома, в – возбуждение высшей (третьей) гармоники падающего излучения, г – гиперрамановское рассеяние.

$E$  – энергия электрона в атоме,  $I$  – потенциал ионизации атома,  $n$  – основное состояние,  $m, q$  – возбужденные связанные состояния электрона в атоме, прямые стрелки – вынужденные переходы электрона в результате поглощения фотона, волнистые стрелки – спонтанные переходы электрона,  $i$  – состояния электрона, поглотившего один или несколько фотонов.

Если теперь обратиться к вопросу о природе тех состояний  $i$  (рисунок 2.1), которые не соответствуют разрешенным согласно второму постулату Н. Бора, то ответ нельзя дать в рамках феноменологической квантовой теории. Физическую сущность этих состояний можно выяснить лишь в рамках квантовой механики. Прежде чем обратиться к квантовой механике, сделаем лишь одно замечание. Хорошо известно, что спектр связанных состояний электрона в атоме ангармоничен. Следовательно, нельзя предполагать, что электрон может переходить по спектру связанных состояний из одного состояния в другое, поглощая фотоны фиксированной частоты, как по лестнице с одинаковыми ступеньками. Реальные ступеньки все различной высоты, убывающей к потенциалу ионизации.

В третьей главе описаны принципы работы разрабатываемых элементов, произведены расчёты параметров полосовых светофильтров, представлена конструкция оптического логического элемента.

В данной диссертации разрабатываются конструкции следующих логических элементов И, ИЛИ, НЕ, ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ. Конструкция состоит из волоконного Y-объединителя, кристалла с нелинейным показателем преломления, полосового светофильтра. Для начала необходимо выбрать частоту информационных входов оптического сигнала и рабочую длину волны. Для данной работы были выбраны следующие параметры:

$$f_1=1 \text{ ТГц};$$

$$f_2=1 \text{ ТГц};$$

$$\lambda=1550 \text{ нм};$$

Согласно принципу генерации суммарной частоты:

$$f_3=f_1+f_2=2 \text{ ТГц}; \quad (3.1)$$

### 3.1.1 Элемент И

Элемент И состоит из двух информационных входов и одного выхода.

Таблица истинности данного элемента представлена в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Таблица истинности элемента И

A	B	C
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Как видно из таблицы сигнал на выходе элемента появляется только в том случае если сигнал подаётся на оба информационных входа. Следовательно полосовой фильтр должен отсекал одиночные сигналы и пропускать суммарный. В таком случае нижняя и верхняя границы пропускания должны равняться  $f_n=1,99 \text{ ТГц}$ ,  $f_v=2,01 \text{ ТГц}$ .

### 3.1.2 Элемент ИЛИ

Элемент ИЛИ состоит из двух информационных входов и одного выхода.

Таблица истинности данного элемента представлена в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Таблица истинности элемента ИЛИ

A	B	C
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Как видно из таблицы сигнал на выходе элемента появляется только в том случае если сигнал подаётся хотя бы на один из информационных входов. Данному элементу фильтр не требуется.

### 3.1.3 Элемент НЕ

Элемент НЕ состоит из одного информационного входа, одного поддерживающего входа и одного выхода. Таблица истинности данного элемента представлена в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Таблица истинности элемента НЕ

A	B	C
0	1	1
1	1	0

Инвертор работает следующим образом: сигнал на входе поддержки подаётся непрерывно на частоте которую находится в полосе пропускания фильтра, когда появляется сигнал на информационном входе, генерируется сигнал с суммарной частотой которая больше верхней границы пропускания фильтра. В таком случае нижняя и верхняя границы пропускания должны равняться  $f_n=0,99$  ТГц,  $f_v=1,01$  ТГц.

### 3.1.4 Элемент ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ

Элемент ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ состоит из двух информационных входов и одного выхода. Таблица истинности данного элемента представлена в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Таблица истинности элемента ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ

A	B	C
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Принцип работы и характеристики аналогичны инвертору.

Таблица 3.7 – Результаты расчётов характеристик фильтров для разрабатываемых логических элементов

	A	X	N
	ND	OR	OT
f	1,9	0,9	0,9
н	9	9	9
f	2,0	1,0	1,0
в	2	1	1
$\Delta$	0,0	0,0	0,0
f	3	2	2
f	2,0	1	1
o	05		
k	5,9	4,4	4,4
	93544	95989	95989
s	2,9	2,2	2,2
	96772	47994	47994

r	2,9 96772	2,2 47994	2,2 47994
q	0,0 4681	0,0 62639	0,0 62639
v	0,6	0,5 4	0,5 4
n в	2,5	2,5	2,5
n н	1,5	1,3 5	1,3 5

Значит для элемента И топология будет выглядеть следующим образом:

$$(ВН)^3(НВ)^6(ВН)^6(НВ)^3$$

$$N=2*3+4*6+2*3=36 \text{ слоёв}$$

N-количество слоёв

Толщина одного слоя равняется четверти длины волны

$$d=\lambda/4=1550/4=387.5 \text{ нм}$$

$$L_{\text{омсф}}=N \cdot d=387.5*36=13950 \text{ нм}$$

Для элементов НЕ и ИСКЛ. ИЛИ топология будет выглядеть следующим образом:

$$(ВН)^2(НВ)^4(ВН)^4(НВ)^2$$

$$N=2*2+4*4+2*2=24 \text{ слоёв}$$

Толщина одного слоя равняется четверти длины волны

$$d=\lambda/4=1550/4=387.5 \text{ нм}$$

$$L_{\text{омсф}} = N \cdot d = 387.5 \cdot 24 = 9300 \text{ нм}$$

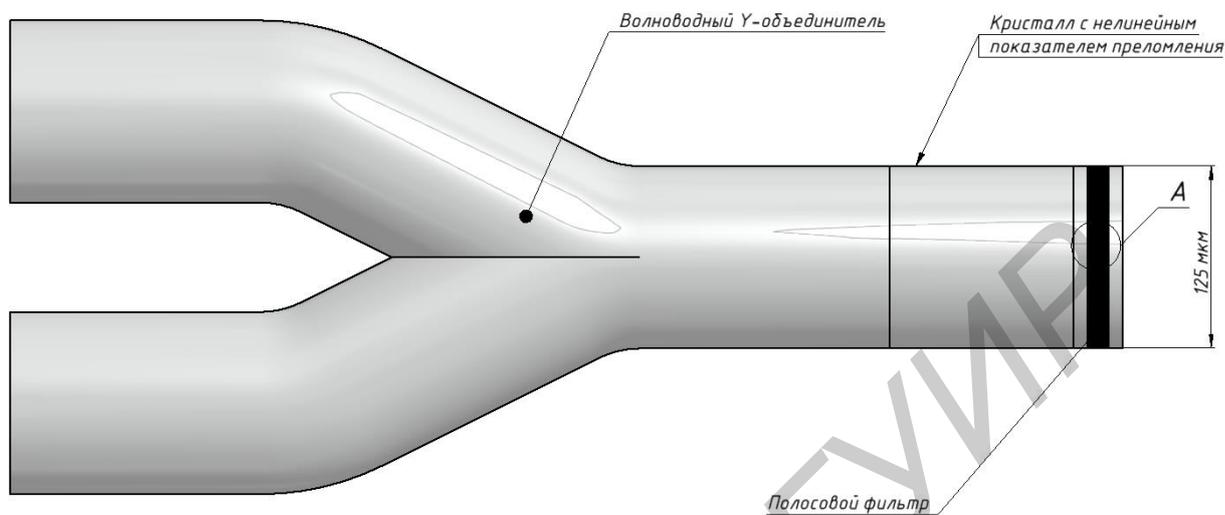


Рисунок 3.2 – Внешний вид предлагаемого логического элемента

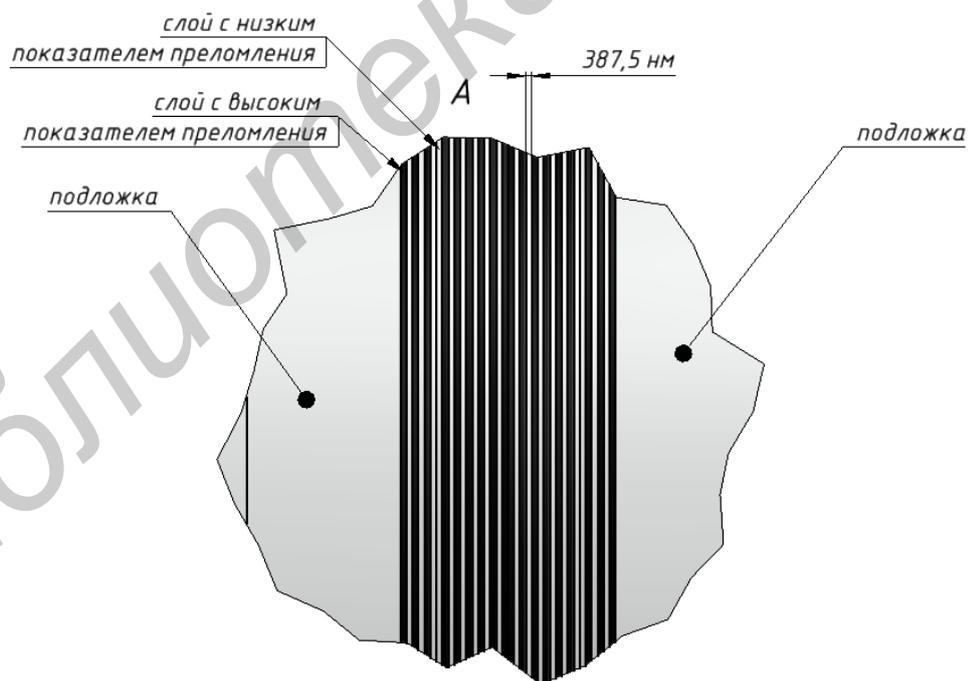


Рисунок 3.3 – Структура полосового фильтра

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе написания магистерской диссертации была разработана классификация оптических логических элементов согласно их конструктивных особенностей. Был обоснован выбор оптоволоконного кабеля. Рассчитаны оптические полосовые фильтры для осуществления логических функций. Подобраны материалы для изготовления фильтров. Разработаны концепт проекты для логических элементов И, ИЛИ, НЕ, Исключающее ИЛИ.

Исходя из результатов теоретических расчётов можно сделать вывод о целесообразности разработки данных устройств в виду их преимуществ перед электронными устройствами. Данными преимуществами являются:

- Малое затухание светового сигнала в волокне.
- Низкий уровень шумов в волоконнооптическом кабеле.
- Защищенность от электромагнитных помех.
- Малый вес и объем.
- Высокая безопасность от несанкционированного доступа.
- Гальваническая развязка элементов сети.
- Экономичность волоконнооптического кабеля.
- Длительный срок эксплуатации.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Белян А.А. Использование оптических логических элементов в системах телекоммуникаций. / А. А. Белян // 52 научно-техническая конференция студентов и магистрантов БГУИР: Тезисы докладов – Минск, 2016.
2. Белян А.А. Оптические цифровые элементы обработки сигналов. / А. А. Белян // Проблемы инфокоммуникаций– Минск, 2016.

Библиотека БГУИР