

**Язбек Хуссейн**

**ОПТИМИЗАЦИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО  
ОПТИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ В КАЧЕСТВЕ МОДУЛЯТОРА  
ИНТЕНСИВНОСТИ СИГНАЛОВ В ОПТИЧЕСКИХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ  
СИСТЕМАХ**

05.13.01 - Системный анализ, управление и обработка информации  
(в технических системах)

**Автореферат диссертации**  
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Работа выполнена в Инженерной академии ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов» (РУДН)

Научный руководитель:                   Беляев Виктор Васильевич  
доктор технических наук, профессор,  
профессор департамента механики и мехатроники  
Инженерной академии РУДН

Официальные оппоненты:               Корнилова Анна Владимировна  
доктор технических наук, доцент,  
доцент департамента строительства  
Инженерной академии РУДН

  Старков Александр Владимирович  
доктор технических наук, доцент,  
доцент кафедры «Системный анализ и управление»  
Аэрокосмического института ФГБОУ ВО «Московский  
Авиационный Институт» (МАИ)

Ведущая организация:                   Акционерное общество «Научно-исследовательский  
институт «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха»

Защита диссертации состоится 28 декабря 2020 года в 16:00 на заседании диссертационного совета РУДН ПДС 2022.001 по адресу: 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке РУДН по адресу: 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6, а также на сайте <http://dissovet.rudn.ru>.

Объявление о защите и автореферат диссертации размещены на сайтах <http://vak2.ed.gov.ru/> и <http://dissovet.rudn.ru>

Автореферат разослан 27 ноября 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета ПДС 2022.001  
кандидат технических наук

Самусенко О.Е.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность исследования:**

Задачи системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации оптических телекоммуникационных систем являются чрезвычайно актуальными с точки зрения определения критериев, влияющих на их функционирование и оценки их эффективности, качества и надежности.

Оптические сети доступа являются конечной частью оптической сети, которая соединяет центральный офис и помещения клиента. Эта последняя линия сети обычно простирается на расстояние от 20 до 40 км. Количество оптико-волоконных соединений ежегодно увеличивается на 28%.

В предыдущих работах использовались сигналы мультиплексирования с ортогональным частотным разделением (OFDM) для улучшения сети оптического доступа, поскольку OFDM является очень хорошо известным методом модуляции, используемым как в проводных, так и в беспроводных системах связи (Prasad R., 2004).

Сигнал адаптивно модулированного оптического ортогонального частотного мультиплексирования (AMOOFDM) использует всю полосу пропускания, распределяя подходящий формат модуляции (DPSK, QPSK, 8-256 QAM) независимо для каждой поднесущей. Формат модуляции распознается путем взаимодействия между передатчиком и приемником в начале установления соединения в системе одномодового волокна (Tang J., 2006).

В течение последних десяти лет сигналы AMOOFDM были исследованы применительно к задачам оптимизации систем оптической связи с использованием технологии полупроводникового оптического усилителя (SOA) для повышения производительности сетей оптического доступа, где SOA используются для отправки сигнала AMOOFDM в его оптической форме. Использование SOA с этой целью является актуальной темой для исследований в системах оптической связи с точки зрения определения критериев для оптимизации системы. Благодаря этим исследованиям в качестве критериев были определены интенсивность сигнала, скорость передачи данных и дальность передаваемого сигнала. В результате разработано специальное математическое и алгоритмическое обеспечение, позволяющее смоделировать систему со скоростью передачи около 30 Гбит/с для одного оптического канала на расстоянии до 80 км с использованием SOA, а при использовании отражающего SOA она достигала всего 60 км. Использование SOA с квантовыми точками (QD-SOA) вместо обычного и отражающего устройства не привело к увеличению расстояния передачи. Использование двухкаскадных SOA улучшило дистанцию до 90 км. Но все же при использовании всех вышеперечисленных систем наблюдается резкое падение уровня мощности

высокочастотных поднесущих, что приводит к ограничению пропускной способности системы максимум до 30 Гбит/с и расстояния максимум до 90 км, поскольку до сих пор нет конкретной конструкции для решения этой проблемы.

Расширение зоны действия передачи жизненно важно для снижения стоимости системы за счет уменьшения необходимого количества узлов между центральным офисом и помещением клиента. При увеличении пропускной способности системы очень важно повысить качество обслуживания для каждого клиента или увеличить количество обслуживаемых клиентов на одну оптоволоконную линию или один оптоволоконный канал.

Поэтому для задач оптимизации систем оптической связи с использованием технологии SOA на основе выбранных критериев для оптимизации системы для повышения производительности сетей оптического доступа актуальной задачей является разработка новых конструкций SOA и методов их работы для определения оптимальных критериев с целью повышения производительности оптических сетей и расширения диапазона доступа. Результат может быть достигнут моделированием новых оптимальных конструкций SOA и QD-SOA, которые улучшают скорость передачи в битах и дальность передачи сигналов AMOOFDM в модуляторе интенсивности приемника прямого детектирования в пассивных оптических сетях. Это становится возможным благодаря расширению полосы пропускания системы на стороне передатчика за счет использования этих конфигураций в качестве преобразователя электрического сигнала в оптический, что решит проблему пропускной способности системы за счет устранения проблемы падения уровня мощности высокочастотных сигналов AMOOFDM.

Поскольку сформулированная традиционная задача является сложной, не выпуклой на пространстве поиска, и, следовательно, имеет много экстремальных решений, она решается за счет технических методов, а не классическими алгоритмами.

**Объект исследования:** Методы оптимизации новой модели SOA/QD-SOA с улучшенной производительностью.

**Предмет исследования:** Система моделирования для конечномерной оптимизации конфигураций SOA/QD-SOA.

**Цель исследования:** Разработка методов оптимизации моделей новых конструкций (мультиэлектродной конфигурации) SOA и QD-SOA с использованием критериев интенсивности сигнала, скорости передачи данных и дальности передаваемого сигнала, что существенно расширяет оптимальные условия функционирования, улучшает скорость передачи в битах, а также дальность передачи сигналов AMOOFDM в модуляторе интенсивности приемника прямого детектирования в пассивных оптических телекоммуникационных системах (IMDD/PON).

**Задачи исследования:**

1. Исследовать теоретические основы управления моделью полупроводникового оптического усилителя с разным количеством управляющих электродов (1E-SOA, 2E-SOA) и разработать метод оптимизации модели, добавив дополнительный управляющий электрод (модель 3E-SOA), с учетом оптимальных условий эксплуатации.

2. Исследовать теоретические основы управления одноэлектродной моделью полупроводникового оптического усилителя с квантовыми точками (1E-QD-SOA) и разработать метод ее оптимизации, добавив дополнительные управляющие электроды (модели 2E-QD-SOA и 3E-QD-SOA), с учетом оптимальных условий эксплуатации.

3. Разработать специальное математическое и алгоритмическое обеспечение с кодами, имитирующими ME-SOA/ME-QD-SOA в качестве модуляторов интенсивности для сигналов AMOOFDM в оптических телекоммуникационных системах IMDD/PON.

4. На основе компьютерных методов обработки информации создать оптимизированную модель распространения сигнала через оптические телекоммуникационные системы, содержащие SOA.

5. Разработать программу для ЭВМ на основе выполненного моделирования.

**Научная новизна исследования:**

1. Впервые оптимизирована работа полупроводниковых оптических усилителей 1E- и 2E-SOA за счет добавления дополнительного управляющего электрода (создана модель 3E-SOA), использованного в качестве модулятора интенсивности сигналов AMOOFDM в оптических телекоммуникационных системах.

2. Впервые оптимизирована работа 1E-QD-SOA за счет добавления дополнительного управляющего электрода (создана модель 2E-QD-SOA), использованного в качестве модулятора интенсивности сигналов AMOOFDM в оптических телекоммуникационных системах.

3. Впервые оптимизирована работа полученного на предыдущем этапе 2E-QD-SOA за счет добавления дополнительного управляющего электрода (создана модель 3E-QD-SOA), использованного в качестве модулятора интенсивности сигналов AMOOFDM в оптических телекоммуникационных системах.

**Практическая значимость работы:**

Обоснованы следующие практические применения в реальных телекоммуникационных инфраструктурах:

При анализе выбранных критериев для оптимизации системы обнаружено, что мультиэлектродные (ME) конфигурации расширяют зону охвата передачи, что снижает стоимость системы за счет уменьшения количества узлов, необходимых между центральным

офисом и помещением заказчика. Кроме того, расширение сетей доступа до 120 км (сети доступа на большие расстояния) в некоторых местах заменяет использование городских сетей. Также появляется возможность предоставления услуг во многих сельских районах, которые не имеют доступа к интернету.

На основе компьютерных методов обработки информации создана оптимизированная модель распространения сигнала через оптические телекоммуникационные системы, содержащие SOA, благодаря чему обнаружено расширение полосы пропускания системы на стороне передатчика за счет использования ME-конфигурации SOA/QD-SOA в качестве преобразователя электрического сигнала в оптический, что решает проблему пропускной способности системы за счет устранения проблемы падения уровня мощности высокочастотных поднесущих сигналов AMOOFDM. Увеличение пропускной способности системы жизненно важно для повышения качества обслуживания каждого клиента или для увеличения числа обслуживаемых клиентов на одну оптоволоконную линию или один оптоволоконный канал.

Благодаря предложенным методам и алгоритмам прогнозирования и оценки эффективности, качества и надежности системы предложенные модели ME-конфигураций демонстрируют высокую эффективность и большую гибкость в выборе оптимальных условий эксплуатации, по сравнению с применявшимися до этого конструкциями с использованием тех же рабочих условий: предложенные модели ME-конфигураций имеют гораздо более широкий диапазон вариаций входной оптической мощности, с возможностью высокой скорости передачи сигнала. Соответственно, можно снизить стоимость, сложность и энергопотребление нашей системы, просто сохранив ту же инфраструктуру сети и изменив только составляющую преобразования электрического компонента в оптический и исключив использование лазерного источника на стороне абонентского устройства (ONU).

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Модель описания и оценки эффективности оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации в виде платформы моделирования, имитирующая ME-SOA в качестве модуляторов интенсивности для сигналов AMOOFDM в оптических сетях IMDD/PON на основе разработанных критериев оптимизации удобных параметров каждой секции, определения длины и тока смещения, необходимых для получения лучшей электрической полосы пропускания.

2. Модель описания и оценки эффективности оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации в виде платформы моделирования, имитирующая ME-QD-SOA в качестве модуляторов интенсивности для сигналов AMOOFDM в оптических сетях IMDD/PON на основе разработанных критериев оптимизации удобных параметров каждой

секции, определения длины и тока смещения, необходимых для получения лучшей электрической полосы пропускания.

3. Компьютерная программа, выступающая в качестве платформы моделирования имитирующая ME-SOA/ME-QD-SOA в качестве модуляторов интенсивности для сигналов AMOOFDM в оптических сетях IMDD/PON и для оптимизации удобных параметров каждой секции, определения длины и тока смещения, необходимых для получения лучшей электрической полосы пропускания.

4. Параметры ME-SOA/ME-QD-SOA с использованием разработанных критериев и численных методов.

5. Специальное математическое и алгоритмическое обеспечение для компьютерной модели распространения сигнала через оптические сети доступа с использованием разработанных критериев оптимизации.

6. Компьютерная программа для ЭВМ «Симулятор для приемопередатчика сигналов адаптивно модулированного оптического ортогонального частотного мультиплексирования (AMOOFDM)», подана заявка в «Роспатент».

**Апробация результатов исследования:** Основные концепции и результаты исследования были обсуждены и представлены на различных международных научных конференциях, семинарах и заседаниях кафедры:

1. «ME-SOA enhancing the system capacity of the optical access networks». Международная научная конференция преподавателей, аспирантов и студентов «Наука на благо человечества - 2018», 16-27 апреля 2018 года. Московский областной государственный университет (МГОУ), Москва, Россия.

2. «A comparison between the typical access networks and the adaptively modulated optical orthogonal frequency division multiplexing based access networks». Научно-практическая конференция с международным участием «Инженерные системы - 2019», 4-5 апреля 2019 года. Российский университет дружбы народов (РУДН). Москва, Россия.

3. «Multi-electrode QD-SOA as an intensity modulator of AMOOFDM signals in IMDD PONs». Международная мультидисциплинарная научная конференция «Перспективная элементная база нано- и микроэлектроники», 12-13 декабря 2019 года. Московский областной государственный университет (МГОУ), Москва, Россия.

4. «Использование мультиэлектродного полупроводникового оптического усилителя с квантовыми точками (QD-SOA) в качестве модулятора интенсивности сигналов AMOOFDM в IMDD PONs». Международная конференция «Перспективная элементная база микро- и наноэлектроники с использованием современных достижений теоретической физики», 16–18

сентября 2020 года. Московский государственный областной университет (МГОУ), Москва, Россия.

5. Диссертационная работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ). Теоретическое и численное исследование повышения производительности оптических сетей доступа с использованием многоэлектродной SOA и многоэлектродной квантовой точки SOA. Грант № (19-0700602\_а).

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ, из них 4 публикации в индексируемых журналах (Scopus, WoS), 2 публикации в индексируемых журналах (ВАК), 1 публикация в индексируемых журналах (РУДН) и 1 публикация в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ) и запатентованная в «Роспатенте» программа для ЭВМ.

### **Личный вклад автора**

Автору принадлежит ведущая роль в выборе направления исследования, анализе и обобщении полученных результатов.

Автор лично разработал теоретическую основу, модели, критерии оптимизации и все технические детали, выполнил кодирование, провел численное моделирование, получил, проанализировал и обобщил результаты, а затем написал рукопись.

Вклад автора является определяющим и заключается в непосредственном участии на всех этапах исследования: от постановки задач и их реализации до обсуждения результатов в научных публикациях и докладах на конференциях.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из обзора литературы и четырех глав собственных исследований, заключения, глоссария, списка литературы, списка рисунков, списка таблиц и 2 приложений.

Диссертация изложена на 128 страницах и включает в том числе 140 ссылок, 45 рисунков, 5 таблиц, 1 блок-схема и 45 формул.



## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность задач, решенных в диссертационной работе.

**Первая глава** представляет собой литературный обзор.

Литературный обзор начинается с общего обзора систем связи AMOOFDM-IMDD с точки зрения системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации. Предоставляется информация о развитии волоконно-оптических сетей и нескольких методах, используемых для улучшения производительности сетей оптического доступа; особый акцент делается на способности модуляции OFDM и AMOOFDM-IMDD для повышения производительности передачи таких сетей. Также рассмотрены свойства SOA и их значение в системах AMOOFDM-IMDD.

Приведены процедуры, подтвержденные экспериментально, используемые в диссертации для моделирования процессов создания, передачи и обнаружения сигналов AMOOFDM.

**Вторая глава** Методология исследования

В этой главе описывается оптическая система OFDM IMDD, использующая ME-SOA в качестве модулятора интенсивности (IM).

Дается подробное объяснение предлагаемой системы передачи (рис. 1), включающей в себя передатчик OFDM, приемник OFDM, оптоволоконный канал, электронно-оптический преобразователь, модели, используемые для выбранных электронно-оптических преобразователей (SOA, QD-SOA, ME-SOA, ME-QD-SOA). Эта разработанная система используется для демонстрации различий в применении предлагаемых компонентов SOA, а также преимуществ и недостатков использования каждого компонента для сетей оптического доступа следующего поколения. Впервые 3E-SOA, 2E-QD-SOA и 3E-QD-SOA были разработаны и использованы в качестве модуляторов интенсивности сигналов AMOOFDM в оптических сетях доступа.

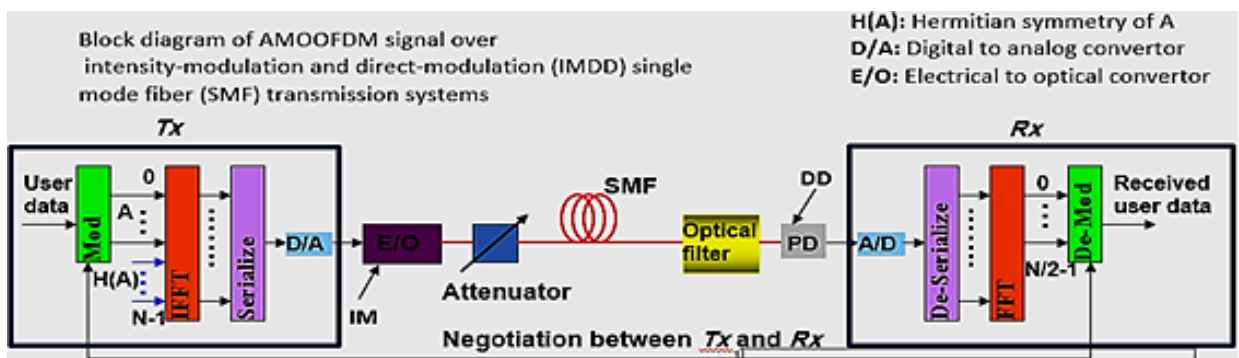
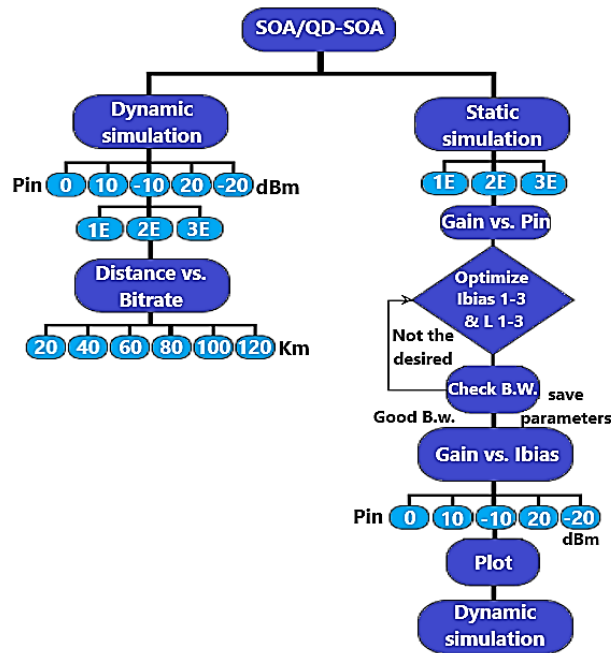


Рисунок 1: Блок-схема системы передачи IMDD с одномодовым волокном (SMF), передающей сигнал AMOOFDM

Кроме того, вторая глава демонстрирует работающую методологию исследования и вводит пошаговую стратегию моделирования системы, описанной выше. Указаны параметры моделирования предлагаемой численной системы для одно-, двух- и трехэлектродной (1E, 2E и 3E) конфигураций для SOA и QD-SOA.

Краткое описание процедуры моделирования показано на следующей блок-схеме (шаги, которые используются для моделирования SOA и QD-SOA, одинаковы)



В третьей главе описывается предлагаемая оптическая линия связи с обсуждением производительности модели ME-SOA.

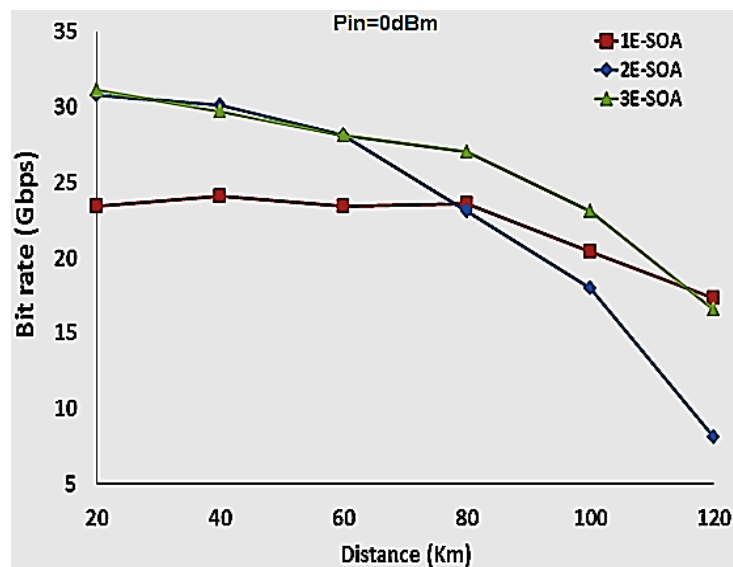


Рисунок 2. Скорость передачи в битах в зависимости от расстояния передачи для 1E-SOA, 2E-SOA и 3E-SOA для оптической входной мощности 0 дБм и тока смещения 300 мА

На рис. 2 показаны результаты пропускной способности системы в зависимости от расстояния передачи по оптоволоконному каналу в предлагаемой оптической системе с использованием трех различных конфигураций SOA для оптической входной мощности для конфигураций SOA 0 дБм и общего тока смещения 300 мА для одного оптического канала при 1550 нм и индексе модуляции (отношение тока привода OFDM к току смещения) 80% для всех конфигураций. Результаты для 1E-SOA показывают, что пропускная способность системы начинается с 24 Гбит/с на расстоянии передачи 80 км. После этого отмечено ухудшение пропускной способности на расстоянии от 80 до 120 км, при которых скорость передачи данных составляет около 17 Гбит/с. Ухудшение пропускной способности на расстоянии, большем 80 км, связано с уменьшением соотношения сигнал/шум (SNR) в приемнике, вызванным повышенным затуханием сигнала на больших расстояниях передачи и ограничением сигнала (уменьшенным значением размаха сигнала OFDM из-за нелинейной кривой амплитудной характеристики SOA, как показано на рис. 3а).

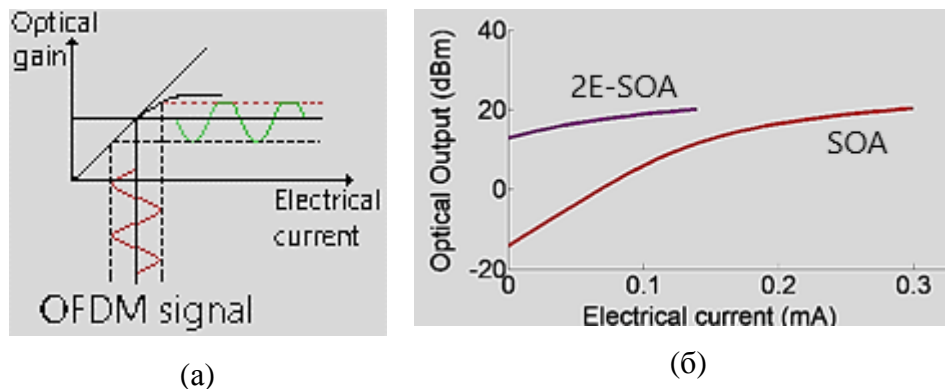


Рисунок 3.(а). Эффект ограничения, вызванный нелинейностью SOA, (б) оптический выход в зависимости от тока смещения для SOA, 2E-SOA

Кривая для 2E-SOA на рис. 2 показывает тот же случай, но с использованием 2E-SOA в качестве модулятора интенсивности (электронно-оптического преобразователя) вместо 1E-SOA. 2E-SOA регистрирует увеличение пропускной способности примерно на 7 Гбит/с для расстояния передачи 20 км. Это увеличение пропускной способности системы обусловлено увеличением полосы пропускания сигнала OOFDM на выходе 2E-SOA, в отличие от 1E-SOA, как отмечено на рис. 4. Более широкая полоса пропускания 2E-SOA обусловлена более быстрым временем реакции, в отличие от 1E-SOA. Улучшение пропускной способности системы продолжается до 80 км, после чего наблюдается резкое снижение скорости передачи данных в отличие от конфигурации с 1E-SOA. Это ухудшение происходит из-за повышенной нелинейности 2E-SOA, в отличие от 1E-SOA, как это можно наблюдать на рис. 3б. Эта нелинейность приводит к увеличению ограничения, как показано на рис. 5. Это ограничение ведет к дальнейшему снижению соотношения SNR на приемнике (фотодиод), что приводит к

снижению скорости передачи данных. На рисунке 2 также показаны результаты симуляции с использованием конфигурации 3E-SOA. 3E-SOA демонстрирует улучшение скорости передачи как на короткие, так и на длинные дистанции передачи. Эти результаты демонстрируют потенциал конфигураций 2E-SOA и 3E-SOA для значительного увеличения пропускной способности оптических сетей доступа на расстояние передачи до 120 км (17 Гбит/с для 3E-SOA), что намного превышает традиционные расстояния для оптических сетей доступа, составляющие от 20 до 40 км.

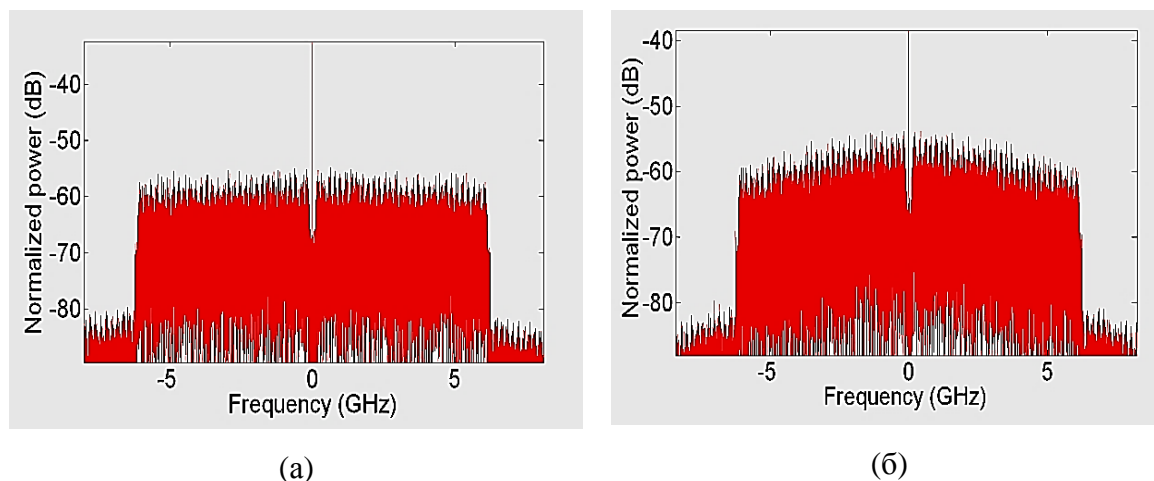


Рисунок 4. Ширина полосы пропускания оптического сигнала OFDM после (а) ME-SOA, (б) 1E-SOA.

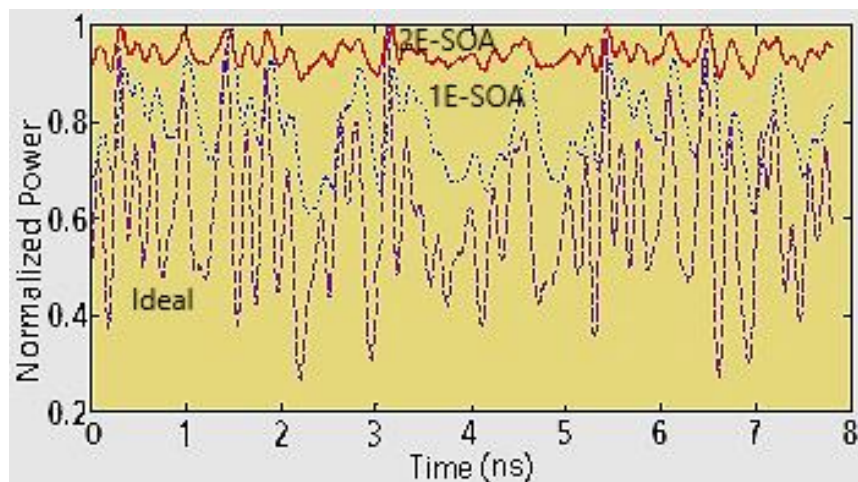


Рисунок 5. Сигнал OOFDM во временной области обреза на выходе идеального модулятора интенсивности, 1E-SOA, 2E-SOA

Далее в 3 главе рассматриваются контурные графики производительности.

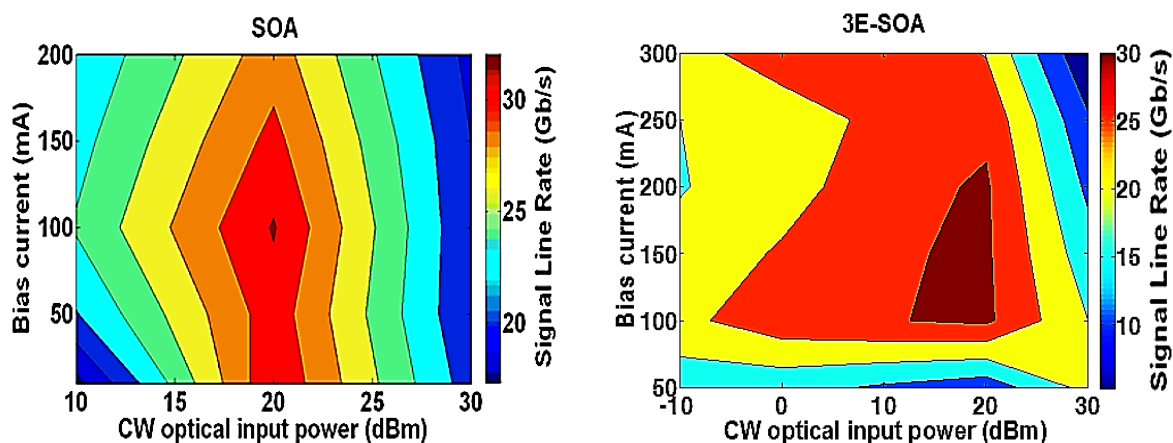


Рисунок 6. Емкость системы (а) 1E-SOA, (б) 3E-SOA

На рис. 6 показана пропускная способность системы оптической передачи как для 1E-SOA, так и для 3E-SOA, для диапазона входной оптической мощности от -10 дБм до 30 дБм и для тока смещения диапазона от 50 мА до 300 мА. Расстояние передачи составляет 60 км, а длина волны волоконно-оптического канала составляет 1550 нм. Результаты для 1E-SOA показывают, что для достижения скорости передачи более 30 Гбит/с нужно иметь оптическую входную мощность 20 дБм. Эта оптическая входная мощность высока для SOA и не может быть использована на практике, поскольку максимальная входная мощность для SOA не может превышать 17 дБм. График для 3E-SOA демонстрирует решение этой проблемы, поскольку он показывает, что для достижения скорости 30 Гбит/с можно снизить оптическую входную мощность до 12 дБм и поддерживать ток смещения на уровне 100 мА в то же самое время. Это снижение оптической входной мощности для достижения той же производительности делает систему более практичной и менее энергозатратной. Более высокая скорость передачи данных при высоких входных оптических мощностях обусловлена тем, что при более высоких оптических входных мощностях ширина полосы пропускания SOA увеличивается из-за уменьшенного эффективного времени жизни носителей SOA. Однако по мере увеличения оптической входной мощности кривая усиление-ток станет более нелинейной, что приведет к увеличению ограничения сигнала OFDM, как это показано на рис. 5. Это приводит к снижению наблюдаемой скорости передачи, когда оптическая входная мощность увеличивается до 20 дБм и более.

**В четвертой главе** предлагается оптическая линия связи с обсуждением производительности модели ME-QD-SOA.

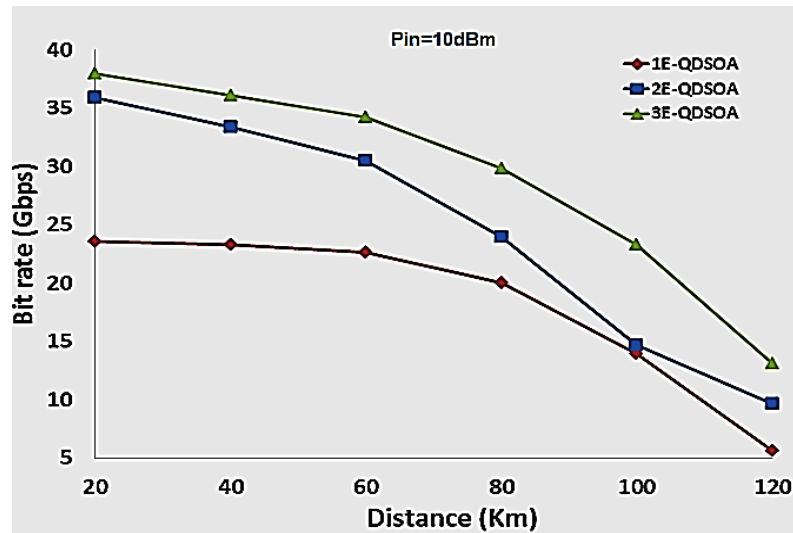


Рисунок 7. Скорость передачи в битах в зависимости от расстояния передачи для 1E-QD-SOA, 2E-QD-SOA и 3E-QD-SOA для оптической входной мощности 10 дБм и тока смещения 300 мА

На рис. 7 показаны результаты пропускной способности системы в зависимости от расстояния передачи по оптоволоконному каналу для предлагаемой автором оптической системы с использованием трех различных конфигураций QD-SOA, при оптической входной мощности для конфигураций SOA 10 дБм и общего тока смещения 300 мА для одного оптического канала в 1550 нм и индекса модуляции (отношение тока привода OFDM к току смещения) 80% для всех конфигураций. Результаты для 1E-QD-SOA демонстрируют пропускную способность около 24 Гбит/с до 60 км. После этого происходит ухудшение скорости передачи данных из-за нелинейности QD-SOA. Если используется 2E-QD-SOA, то скорость передачи увеличивается примерно на 12 Гбит/с (50%) на расстоянии 20 км из-за значительного расширения полосы пропускания. Такое улучшение сохраняется на большом расстоянии - 120 км.

3E-QD-SOA показывает лучшую производительность: улучшение скорости передачи примерно на 14 Гбит/с (~ 60%) на расстоянии 20 км по сравнению с 1E-QD-SOA. 3E-QD-SOA также демонстрирует более высокую скорость передачи по сравнению с двумя другими конфигурациями для расстояний до 120 км. Улучшение за счет конфигураций QD-SOA лучше, чем для SOA, поскольку QD-SOA, хотя и являясь более дорогим устройством, имеет более высокую пропускную способность из-за более быстрого времени отклика по сравнению с SOA.

Далее в 4 главе рассматриваются контурные графики производительности.



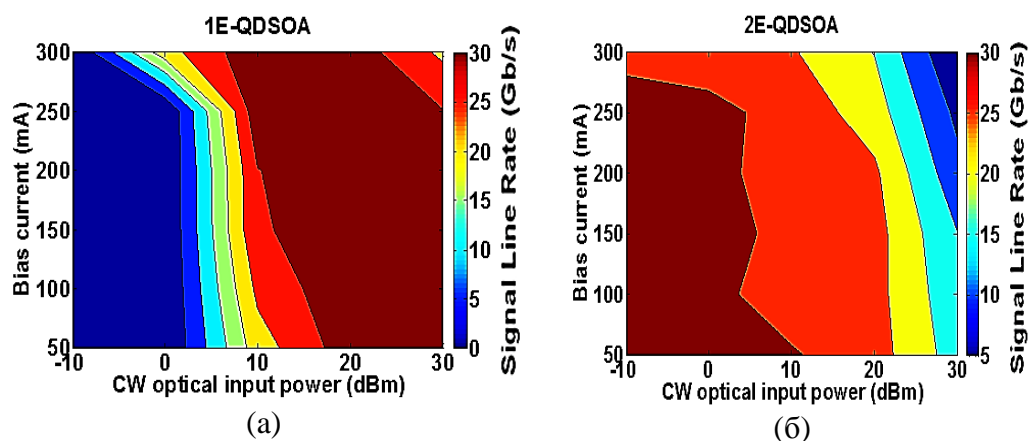


Рисунок 8. Емкость системы (а) 1E-QDSOA, (б) 2E-QD-SOA

На рис. 8 показана пропускная способность системы оптической передачи как для 1E-QD-SOA, так и для 2E-QD-SOA, для диапазона входной оптической мощности от -10 дБм до 30 дБм и для тока смещения диапазоном от 50 мА до 300 мА. Расстояние передачи составляет 60 км, а длина волны волоконно-оптического канала составляет 1550 нм. Результаты для 1E-QD-SOA показывают, что для достижения максимальной пропускной способности 30 Гбит/с есть широкий диапазон значений оптической входной мощности и значений тока смещения: можно иметь оптическую входную мощность 17 дБм при 50 мА, или можно снизить мощность оптического входа до 8 дБм при высоком значении тока смещения 300 мА. Проблема QD-SOA состоит в том, что он очень нелинейный, и это приводит к полному отказу системы при низких входных оптических мощностях, как это показано на рис. 8а. Рис. 8б демонстрирует, что с помощью 2E-QD-SOA можно решить эту проблему. Используя данный вид конфигурации, можно достичь скорости передачи 30 Гбит/с для оптических входных мощностей от 10 дБм до оптических входных мощностей всего лишь -10 дБм и для диапазона тока смещения от 50 мА до 275 мА. Снижение пропускной способности системы при более высоких входных оптических мощностях от 10 дБм и выше происходит постольку, поскольку, хотя увеличение входной оптической мощности увеличивает полосу пропускания компонента, нелинейность компонентов увеличивается, вызывая повышенный эффект ограничения, что приводит к значительному снижению соотношения SNR на стороне приемника.

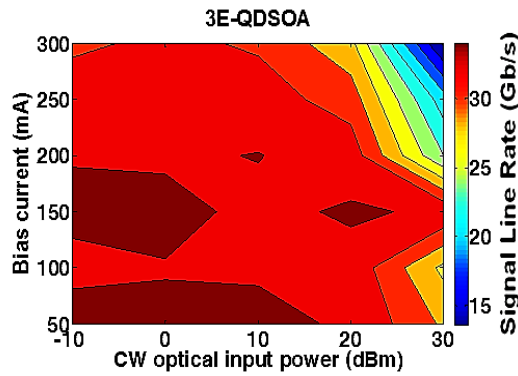


Рисунок 9: Емкость системы 3E-QDSOA

На рис. 9 показана пропускная способность системы оптической передачи для 3E-QD-SOA для диапазона входной оптической мощности от -10 дБм до 30 дБм, а также для тока смещения в диапазоне от 50 мА до 300 мА. Расстояние передачи составляет 60 км, а длина волны волоконно-оптического канала составляет 1550 нм. Результаты исследования показывают, что можно достичь скорости передачи 35 Гбит/с для широкого диапазона оптических входных мощностей или значений тока смещения, что дает гораздо большую гибкость при проектировании оптической сети доступа для достижения максимальной пропускной способности системы. Этот результат является значимым, поскольку он позволяет достичь тех же максимальных значений частоты ошибок по битам, используя меньшую на 20 дБ оптическую входную мощность и значение тока смещения менее 300 мА. Это достижение может позволить расширить дальность действия оптической сети доступа на расстояния, большие, чем 20 км, при сохранении той же производительности. Кроме того, это может позволить использовать более дешевые лазерные источники.

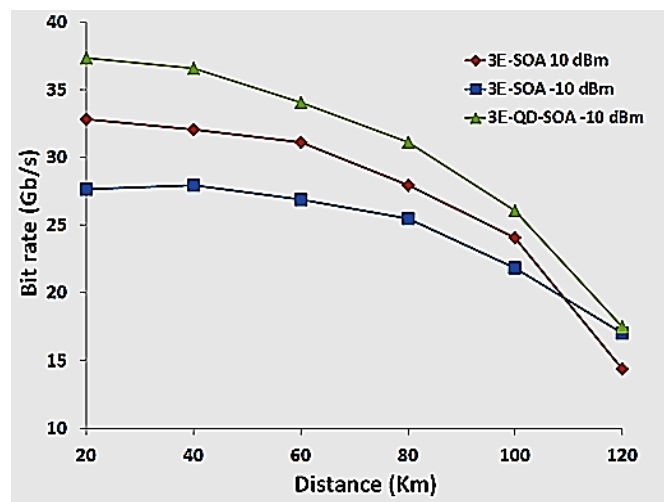


Рисунок 10. Скорость передачи в битах в зависимости от расстояния передачи для 3E-QD-SOA при входной мощности -10 дБм, 3E-SOA при входной мощности -10 дБм и 3E-SOA при входной мощности 10 дБм и токе смещения 300 мА



В пятой главе приводится сравнительная характеристика производительности модуляторов интенсивности ME-SOA и ME-QD-SOA.

На рис. 10 представлено сравнение емкости системы и расстояния передачи для 3E-QD-SOA при входной мощности -10 дБм, 3E-SOA при входной мощности -10 дБм и 3E-SOA при входной мощности 10 дБм и смещении 300 мА, при токе с индексом модуляции 80% и длиной волны 1550 нм. Результаты показывают, что 3E-SOA при 10 дБм имеет лучшую производительность, чем 3E-SOA при -10 дБм. Однако, при использовании 3E-QD-SOA наблюдается лучший результат, чем у 3E-SOA, на расстояниях до 120 км при использовании оптической входной мощности на 20 дБ меньше. Этот результат является значимым, поскольку для практического применения конфигураций SOA в пассивных оптических сетях следующего поколения требуется, чтобы SOA мог отправлять высокие скорости передачи данных, используя как можно более низкие оптические входные мощности, из-за того, что лазерный источник будет на стороне передатчика, а SOA будет на стороне терминала/блока оптической сети (ONU). SOA должен отправлять данные со стороны ONU на сторону терминала оптической линии (OLT), используя чрезвычайно уменьшенную мощность со стороны OLT из-за ослабления мощности лазера в волоконной линии связи между OLT и ONU. Причиной использования лазерного сигнала OLT является устранение необходимости в лазерном источнике в ONU, что снижает стоимость и сложность системы. На рисунке 11 изображена система WDM-PON, упомянутая ранее.

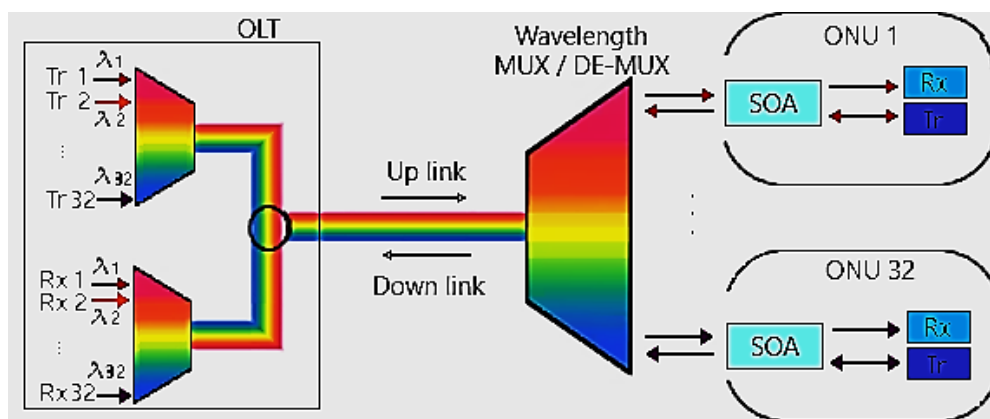


Рисунок 11. Диаграмма WDM-PON подчеркивает важность применения конфигурации SOA/QD-SOA, работающей на высокой скорости для передачи по восходящей линии связи при работе на низкой оптической входной мощности от лазерного источника на стороне передатчика

Далее в 5 главе рассматриваются контурные графики производительности.

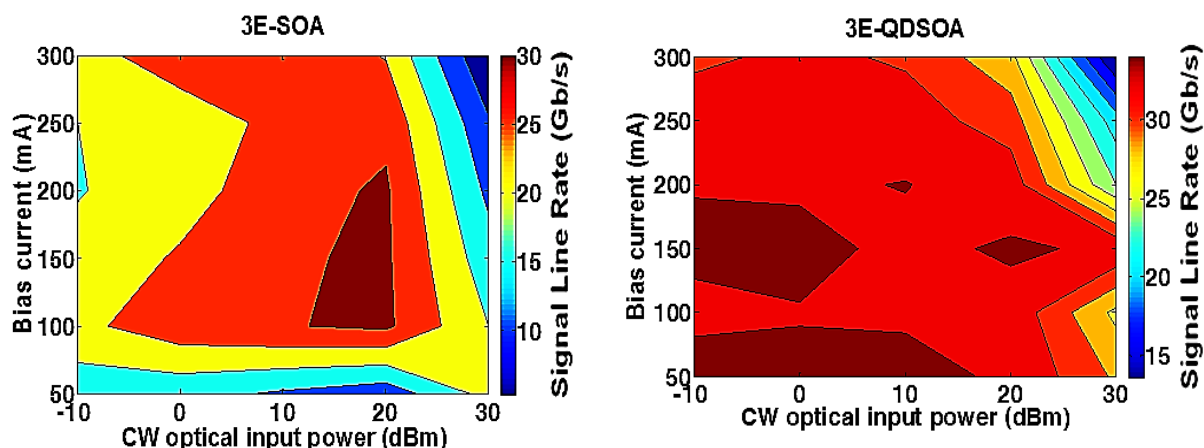


Рисунок 12. Емкость системы 3E-SOA и 3E-QDSOA

На рис. 12 показана производительность системы с использованием ME-конфигураций SOA и QD-SOA. Как замечено, при использовании 3E-SOA для достижения скорости линии 30 Гбит/с выбор ограничен: входная оптическая мощность составляет 12 дБм, а ток смещения 100 мА. В то же время для достижения скорости 30 Гбит/с при использовании 3E-QD-SOA есть полный диапазон как оптической входной мощности, так и тока смещения. Но самое главное, что, используя 3E-QD-SOA, можно достичь скорости передачи 35 Гбит/с с очень широким диапазоном селективности рабочих параметров. Причиной улучшения параметров QD-SOA по сравнению с SOA (в литературе также используется термин «объемный SOA») является то, что QD-SOA, хотя и являясь более дорогими девайсами, имеют гораздо более быстрое время отклика, чем SOA, что приводит к более широкой электрической полосе пропускания на 3 дБ. Это позволяет при применении QD-SOA модулировать сигналы OFDM с более высокой пропускной способностью, что приводит к увеличению скоростей передачи битов с использованием более низких значений оптической мощности (можно достичь даже большей пропускной способности, используя только -10 дБм оптической входной мощности в QD-SOA из-за более быстрого времени отклика, чем используя SOA при оптической входной мощности 20 дБм).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### **В диссертационной работе получены следующие основные результаты:**

1. Разработана модель описания и оценки эффективности оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации в виде платформы моделирования, имитирующей мультиэлектродные полупроводниковые оптические усилители (ME-SOA), в том числе ME-SOA с квантовыми точками, в качестве модуляторов интенсивности для сигналов AMOOFDM в оптических сетях IMDD/PON на основе разработанных критериев оптимизации параметров каждой секции ME-SOA.

2. Исследованы теоретические основы управления моделью передачи сигналов IMDD-OOFDM (модуляция интенсивности и прямое детектирование - мультиплексирование с ортогональным частотным разделением) в сети доступа с использованием структуры 1E-SOA и 2E-SOA и разработан метод ее оптимизации путем добавления дополнительного управляющего электрода (создана модель 3E-SOA). Мультиэлектродная конфигурация для модулятора интенсивности значительно улучшает пропускную способность пассивных оптических сетей на расстоянии от 20 до 120 км. Трехэлектродная (3E) конфигурация обеспечивает более высокую интенсивность сигнала, что улучшает характеристики передачи на расстояниях до 120 км.

3. Исследованы теоретические основы управления одноэлектродной моделью SOA с квантовыми точками (1E-QD-SOA), и разработан метод ее оптимизации путем добавления дополнительных управляющих электродов (созданы модели 2E и 3E-QD-SOA). В отличие от 3E-SOA, эта конфигурация обеспечивает оптимизацию следующих критериев: пропускная способность системы (увеличение на 10 Гбит/с), расстояние передачи сигнала (увеличение на 20 км), входная оптическая мощность (снижение на 20 дБ).

4. Разработано специальное математическое и алгоритмическое обеспечение путем написания кодов, имитирующих ME-SOA/ME-QD-SOA в качестве модуляторов интенсивности для сигналов AMOOFDM в оптических телекоммуникационных системах IMDD/PON.

5. На основе компьютерных методов обработки информации создана упрощенная модель оптимальных условий работы с учетом входной оптической мощности и тока смещения. Результатом моделирования являются: более высокая гибкость при проектировании оптической сети доступа; снижение стоимости, сложности и энергопотребления; достижение максимальной скорости передачи данных более 35 Гбит/с за счет простого сохранения той же сетевой инфраструктуры при изменении только одного компонента для электронно-оптического преобразования.

6. Разработана компьютерная программа для ЭВМ «Симулятор для приемопередатчика сигналов адаптивно модулированного оптического ортогонального частотного мультиплексирования (AMOOFDM)», подана заявка в «Роспатент».

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в рецензируемых научных изданиях, включенных в список Scopus/WoS

1. Yazbeck H. Comparison of typical access networks with AMOOFDM based access networks. / H. Yazbeck, V.V. Belyaev // Journal of physics: IOP conference series: Materials Science and Engineering. – 2019. – V. 675. - P.1-8. 012033. doi:10.1088/1757-899X/675/1/012033.
2. Yazbeck H. Comparative analysis of application of wavelet analysis for the recognition of element composition nanostructures. / I.M. Tkachenko, E.R. Kozhanova, V.V. Belyaev, H. Yazbeck // Journal of physics: conference series. – 2019. – V. 1309. – doi: 10.1088/1742-6596/1309/1/012020.
3. Yazbeck H. Software for analysis of parameters and characteristics of Semiconductor Optical Amplifier. / E.R. Kozhanova, V.V. Belyaev, I.M. Tkachenko, H. Yazbeck // Journal of physics: IOP conference series. – 2020. - V. 1560. doi:10.1088/1742-6596/1560/1/012031.
4. Yazbeck H. Multi-electrode QD-SOA as an intensity modulator of AMOOFDM signals in IMDD PONs. / H. Yazbeck, V.V. Belyaev, I.M. Tkachenko, M Hamze// Journal of physics: IOP conference series. – 2020. – V.1560. doi:10.1088/1742-6596/1560/1/012021.

### Публикации в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК

5. Yazbeck H. Theoretical and numerical study of enhancing the performance of the optical access networks using ME-SOA. / H. Yazbeck, M. Hamze, A. Hamieh, V.V. Belyaev // Electrosviaz. – 2019. – № 6. – P.46-52. doi: 621.315:681.7.068.
6. Язбек Х. Применение технологии квантовых точек для электрооптических и оптоэлектронных устройств. / В. Беляев, Х. Язбек // Электроника НТБ. – 2020. – № 9. – P.110-116. doi: 10.22184/1992-4178.2020.200.9.110.116.

### Публикации в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень РУДН

7. Yazbeck H. The advantages of AMOOFDM access networks over other technologies: A review. / H. Yazbeck, V.V. Belyaev, I.M. Tkachenko // Electrosviaz. – 2020. - № 4. – P. C.55–60. doi: 10.34832/ELSV.2020.5.4.008.

### Прочие публикации

8. Yazbeck H. A comparison between the typical access networks and the adaptively modulated optical orthogonal frequency division multiplexing based access networks. / H. Yazbeck, V.V. Belyaev // Сборник материалов научно-практической конференции с международным участием «Инженерные системы – 2019», Москва. – 2019. – P.102–110.

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ**

SOA: полупроводниковый оптический усилитель.

QD-SOA: полупроводниковый оптический усилитель с квантовыми точками.

RSOA: отражающий полупроводниковый оптический усилитель.

1E, 2E, 3E-SOA: одноэлектродная, двухэлектродная, трехэлектродная SOA.

ME-SOA: мультиэлектродная SOA.

ME-QD-SOA: мультиэлектродная SOA с квантовыми точками.

OFDM: ортогональное частотное мультиплексирование.

AMOOOFDM: Адаптивно-модулированное оптическое ортогональное частотное мультиплексирование.

SMF: одномодовое волокно.

IMDD: модуляция интенсивности / прямое детектирование.

PON: пассивная оптическая сеть.

WDM-PON: мультиплексирование с разделением по длине волны.

OLT: оптический линейный терминал.

ONU: блок оптической сети.

## АННОТАЦИЯ ДИССЕРТАЦИИ

**Язбек Хуссейн**

### **Оптимизация функционирования полупроводникового оптического усилителя в качестве модулятора интенсивности сигналов в оптических телекоммуникационных системах**

Пассивные оптические телекоммуникационные сети (PON) нашли широкое применение в народном хозяйстве благодаря высокой степени защиты информации, помехоустойчивости и высокой пропускной способности. Диссертация посвящена повышению эффективности PON, а именно исследованию влияния различных конфигураций полупроводниковых оптических усилителей (SOA), используемых в качестве модуляторов интенсивности и предусилителей, на передачу сигналов адаптивно модулированного оптического мультиплексирования с ортогональным частотным разделением (AMOOFDM) в системах модуляции интенсивности и прямого обнаружения (IMDD). Рассказывается о новых мультиэлектродных моделях ME-SOA и новых мультиэлектродных моделях с квантовыми точками ME-QD-SOA и их сравнительных характеристиках с оценкой их эффективности. Обоснованы практические применения предложенных моделей в реальных телекоммуникационных инфраструктурах, и изучены социально-экономические аспекты их применения. В частности, мультиэлектродные конфигурации имеют гораздо более широкий диапазон вариаций входной оптической мощности, с возможностью высокой скорости передачи сигнала. Соответственно, можно снизить стоимость, сложность и энергопотребление системы, просто сохранив ту же инфраструктуру сети и изменив только составляющую преобразования электрического компонента в оптический и исключив использование лазерного источника на стороне абонентского устройства. Создана и запатентована для «ЭВМ» компьютерная программа, имитирующая распространение сигнала через оптические сети доступа, содержащие различные конфигурации SOA / QD-SOA.

## DISSERTATION ABSTRACT

**Hussein Yazbeck**

### **Optimization of functioning of semiconductor optical amplifier as intensity modulator of signals in optical telecommunication systems**

Passive optical networks (PON) have found wide application in the national economy due to the high degree of information protection, noise immunity and high bandwidth. This dissertation is devoted to improving the efficiency of PON, by investigating the effect of various configurations of semiconductor optical amplifiers (SOA) used as intensity modulators and preamplifiers on the transmission of adaptively modulated optical orthogonal frequency division multiplexing (AMOOFDM) signals in intensity modulation and direct detection (IMDD) systems. New ME-SOA models and new ME-QD-SOA models has been developed, compared and their effectiveness was assessed. The practical applications of the proposed models in real telecommunication infrastructures are substantiated, and the socio-economic aspects of their application are studied. In particular, multi-electrode configurations have a much wider range of input optical power variations, with the potential for high signal transmission rates. Accordingly, it is possible to reduce the cost, complexity, and power consumption of the system simply by keeping the same network infrastructure and changing only the electrical to optical conversion component and eliminating the use of a laser source on the subscriber side. A computer program that simulates the signal propagation through optical access networks containing various SOA / QD-SOA configurations has been created and patented in "computer ЭВМ".