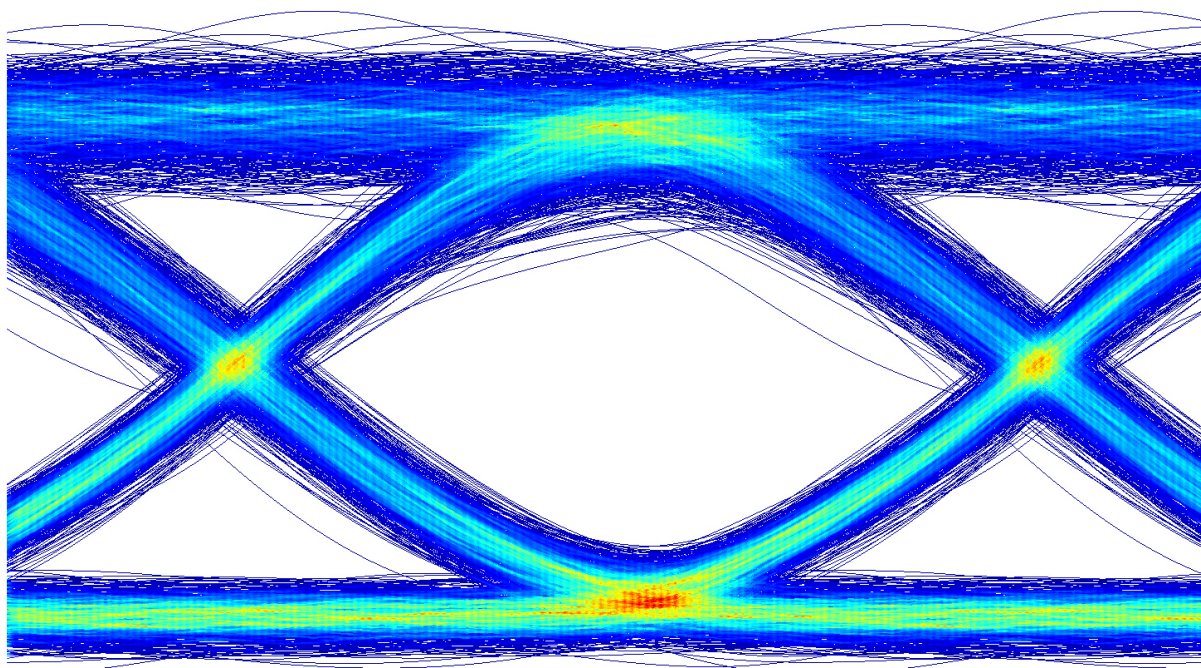


ІІТМО

Я.Н. Ковач, А.В. Кремлева

**ОСНОВЫ ОПТИЧЕСКИХ ПРИЕМО-
ПЕРЕДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ**



Санкт-Петербург

2025

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Я.Н. Ковач, А.В. Кремлева

**ОСНОВЫ ОПТИЧЕСКИХ ПРИЕМО-
ПЕРЕДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ**

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

**РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО
по направлениям подготовки 12.04.05 «Лазерная техника и лазерные технологии»
в качестве учебно-методического пособия для реализации основных
профессиональных образовательных программ высшего образования
магистратуры**

ИТМО

Санкт-Петербург

2025

Ковач Я.Н., Кремлева А.В., Основы оптических приемо-передающих устройств – СПб: Университет ИТМО, 2025. – 40 с.

Рецензент: Сокура Лилия Александровна, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник научно-исследовательского центра перспективных функциональных материалов и лазерных коммуникационных систем Университета ИТМО.

В лабораторных работах, представленных в настоящем учебно-методическом пособии, предназначенном для студентов Университета ИТМО, обучающимся по направлению подготовки 12.04.05 «Лазерная техника и лазерные технологии» в рамках освоения дисциплины «Основы оптических приемо-передающих устройств», предлагается познакомиться с принципами моделирования полупроводниковых устройств. Так, в пособии представлено пошаговое описание работы по расчету зонных диаграмм полупроводниковой структуры, модового состава инжекционного лазерного диода полосковой геометрии и спектров усиления активной области лазера. Дополнительно, в настоящем пособии представлена информация о моделировании схемы передачи данных по волоконному каналу связи, в которой в качестве источника и приемника излучения используются инжекционный лазер и *p-i-n* фотодиод.

ИТМО

ИТМО (Санкт-Петербург) — национальный исследовательский университет, научно-образовательная корпорация. Альма-матер победителей международных соревнований по программированию. Приоритетные направления: ИТ и искусственный интеллект, фотоника, робототехника, квантовые коммуникации, трансляционная медицина, Life Sciences, Art&Science, Science Communication.

Лидер федеральной программы «Приоритет-2030», в рамках которой реализуется программа «Университет открытого кода». С 2022 ИТМО работает в рамках новой модели развития — научно-образовательной корпорации. В ее основе академическая свобода, поддержка начинаний студентов и сотрудников, распределенная система управления, приверженность открытому коду, бизнес-подходы к организации работы. Образование в университете основано на выборе индивидуальной траектории для каждого студента.

ИТМО пять лет подряд — в сотне лучших в области Automation & Control (кибернетика) Шанхайского рейтинга. По версии SuperJob занимает первое место в Петербурге и второе в России по уровню зарплат выпускников в сфере ИТ. Университет в топе международных рейтингов среди российских вузов. Входит в топ-5 российских университетов по качеству приема на бюджетные места. Рекордсмен по поступлению олимпиадников в Петербурге. С 2019 года ИТМО самостоятельно присуждает ученые степени кандидата и доктора наук.

© Университет ИТМО, 2025

© Ковач Я.Н., Кремлева А.В., 2025

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| Введение..... | 4 |
| Лабораторная работа № 1 «Исследование кремниевого <i>p-i-n</i> диода»..... | 5 |
| Лабораторная работа № 2 «Исследование модового состава инжекционного лазера полосковой геометрии» | 9 |
| Лабораторная работа № 3 «Исследование материального усиления активной области на основе квантовых ям» | 15 |
| Лабораторная работа № 4 «Моделирование схемы оптоэлектронного передатчика»..... | 19 |
| Список источников | 25 |
| Приложение А – Интерфейс Ansys Device | 26 |
| Приложение Б – Интерфейс Ansys Mode..... | 29 |
| Приложение В – Интерфейс Ansys Interconnect..... | 32 |
| Приложение Г Пример оформления отчета | 35 |

Введение

В настоящем учебно-методическом пособии представлены лабораторные работы, предлагаемые студентам института перспективных систем передачи данных для изучения основ моделирования электронных и оптоэлектронных компонентов с помощью программного пакета ANSYS.

Набор инструментов ANSYS позволяет проводить комплексное моделирование и анализ устройств фотоники и оптоэлектроники: получаемые результаты в одном из расчетных модулей легко передаются в следующий, в котором итоговая модель расширяется далее. Финальным шагом моделирования в такой парадигме становится получение матрицы S-параметров, которые в требуемой мере описывают устройство оптоэлектронного детектора или генератора.

Таким образом, в последнем из модулей ANSYS становится возможным использовать полученные модели, описанные матрицами S-параметров, в результате чего реализуется расчет конечных устройств: приемопередатчиков, лидаров, сенсоров или фотонных интегральных схем.

Более того, встроенные библиотеки материалов ANSYS включают в себя не только базовый набор классических полупроводников, таких как Si и Ge, но и широкий спектр тройных и четверных соединений элементов A₃B₅ и A₂B₆, что позволяет моделировать любые требуемые гетероструктуры.

Использование ANSYS для моделирования приемо-передающих устройств позволяет минимизировать затраты на создание физических прототипов и сократить время вывода продукта на рынок. Усовершенствованные модули ANSYS позволяют конструкторам создавать модели, откалиброванные в соответствии с экспериментальными результатами и реализовывать лучшие оптоэлектронные компоненты.

Представленные в учебно-методическом пособии лабораторные работы способствуют освоению базовых навыков по созданию моделей электронных и оптоэлектронных компонентов, использованию встроенных баз данных материалов и проектированию приемопередающих устройств. Обучающиеся приобретают навыки по созданию 3D геометрии гетероструктур и конечных оптоэлектронных компонентов, заданию расчетной сетки и обработке полученных результатов.

Настоящее методическое пособие предназначено для развития у обучающихся таких компетенций как «Анализ научно-технической информации по разработке оптоэлектроники, оптических и оптоэлектронных приборов и комплексов» и «Моделирование работы оптоэлектронных приборов на основе физических процессов и явлений» в рамках освоения дисциплины «Основы оптических приемо-передающих устройств».

Лабораторная работа № 1 «Исследование кремниевого $p-i-n$ диода»

1. Цель

Знакомство с программным пакетом ANSYS и его использование для решения инженерных задач. Развитие навыков построения трехмерной модели, знакомство с заданием граничных условий и обработкой полученных результатов. Моделирование структуры кремниевого слоя с диффузионным легированием и анализ изменения зонных диаграмм в зависимости от напряжения смещения.

2. Краткие теоретические сведения

При объединении полупроводниковых материалов с различными типами проводимости получают устройство, которое имеет низкое сопротивление для протекания тока в одном направлении и значительное (в идеальном случае – бесконечно большое) сопротивление в обратном направлении. Следует отметить, что при отсутствии напряжения смещения часть электронов (дырок) перейдет в p -легированную (n -легированную) область и рекомбинирует. Тем самым, на границе p - и n -легированного полупроводникового материала образуется область, свободная от носителей заряда, которую называют обедненной областью [1]. На рисунке 1 представлены оба случая приложенного напряжения смещения.

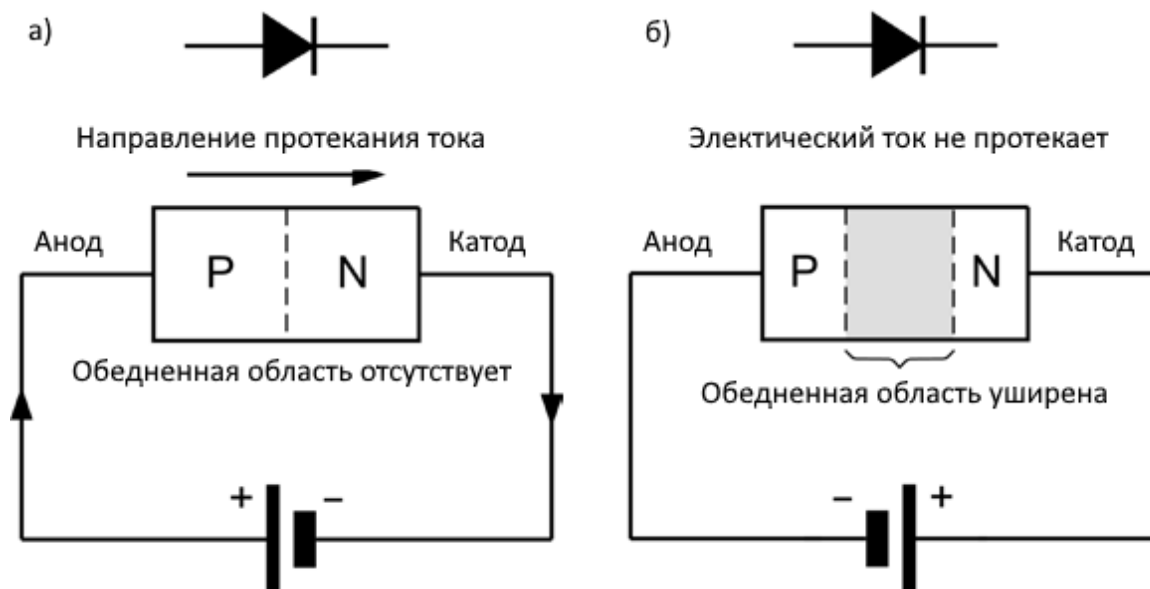


Рисунок 1 – Диод $p-n$ при прямом (а) и обратном (б) смещении [1]

3. Порядок выполнения лабораторной работы

Для исследования характеристик кремниевого *p-i-n* диода обучающимся предлагается выполнить 1D моделирование структуры размером 2×2 мкм.

- 3.1 Запустить Ansys DEVICE. Основные используемые элементы интерфейса DEVICE представлены в Приложении А.
- 3.2 Добавить три параллелепипеда, для чего выбрать вкладку «Design», «Rectangle».
- 3.3 Также добавить материалы золота и кремния, нажав на «Electrical and thermal». В появившемся окне требуется выбрать соответствующие материалы в списке слева, после чего добавить их, нажимая кнопку «Create».
- 3.4 Последовательно для каждого из трех созданных объектов изменить название и задать геометрические размеры (параметры каждого объекта доступны по нажатию правой кнопкой мыши «Edit object»):
 - «Metal -», $x = 0$, $x \text{ span} = 2$, $y = 0$, $y \text{ span} = 2$, $z = 0.9$, $z \text{ span} = 0.3$, материал – «Au (Gold)»;
 - «Si», $x = 0$, $x \text{ span} = 2$, $y = 0$, $y \text{ span} = 2$, $z = -1.05$, $z \text{ span} = 3.6$, материал – «Si (Silicon)»;
 - «Metal +», $x = 0$, $x \text{ span} = 2$, $y = 0$, $y \text{ span} = 2$, $z = -3$, $z \text{ span} = 0.3$, материал – «Au (Gold)».
- 3.5 Далее следует внести в модель параметры легирования кремниевого слоя, для чего предлагается добавить три объекта из вкладки «Charge», расположенной на главном экране: равномерное легирование структуры «Constant», для обозначения фонового легирования, и два объекта градиентного легирования – для обозначения легирования в *n* и *p* областях.
- 3.6 В созданных объектах последовательно требуется изменить следующие параметры:
 - У объекта «Constant» изменить название на «p-type const» и задать геометрические размеры, соответствующие всей области кремниевого полупроводника (объект «Si» пункта 3.4), из выпадающего списка выбрать применение ко всей области моделирования – «volume type» = «all domains», выбрать тип легирования «*p*» и задать концентрацию равной $1e+15$;
 - Объекты «Diffusion» переименовать в «n-type» и «p-type» и аналогично задать геометрические размеры, соответствующие всей области кремниевого полупроводника (объект «Si» пункта 3.4), из выпадающего списка выбрать применение только к одному объекту – «volume type» = «solid», после чего выбрать соответствующий кремниевому слою параллелепипед для

параметра «volume solid» = «Si». Для задания параметров диффузии требуется выбрать соответствующий тип легирования из выпадающего списка «dopant type», для *n*-типа выбрать верхнюю границу для диффузии, для *p*-типа – нижнюю (выпадающий список «source face»), для обоих случаев изменить размер ширины перехода «junction width (um)» на 0.1. Концентрацию легирующей примеси в обоих случаях установить равной $1e+17$.

- 3.7 Во вкладке «Charge» также найти и добавить два контакта «Electrical», один из которых следует переименовать как «ground», а второй – «plus».
- 3.8 В параметрах геометрии контакта «ground» выбрать тип поверхности «surface type» = «solid», а в появившемся списке выбрать параллелепипед «Metal -».
- 3.9 В параметрах геометрии контакта «plus» выбрать тип поверхности «surface type» = «solid», а в появившемся списке выбрать параллелепипед «Metal +». Для реализации расчетов при различных значениях напряжения смещения в первой вкладке «General» требуется дополнительно изменить параметр «sweep type» на «range». Далее установить в появившихся полях изменение напряжение от -0.4 до 1 с шагом 0.02 (параметры «range start (V)», «range stop (V)» и «range interval (V)» соответственно).
- 3.10 Финальным этапом построения модели будет внесение объектов-мониторов из вкладки «Charge» для измерения концентрации носителей, зонных диаграмм и протекающего тока: «Charge», «Band» и «Current» соответственно.
- 3.11 Для каждого из созданных объектов нужно задать 1D моделирование вдоль оси *z*, для чего из выпадающего списка «monitor type» выбрать «linear z». Длину исследуемого участка задать равной 3 («z span»), и расположить его центр в координату «z (um)» = - 1.05.
- 3.12 После выполнения всех вышеуказанных действий кремниевая диодная структура готова к расчету – для его запуска на главном экране следует нажать кнопку «Run».
- 3.13 Дополнительно обучающемуся предлагается изменить используемый полупроводниковый материал на альтернативный, например Ge или GaAs, и исследовать каким образом изменяются характеристики моделируемого диода.

4. Обработка результатов

- 4.1 В отчете привести графики концентрации носителей *n*- и *p*-типа при напряжении смещения 0.4, 0.6 и 1.0 вольт.
- 4.2 Для перечисленных в пункте 1 значениях смещения в отчете привести графики зонной диаграммы.
- 4.3 В отчете привести график тока носителей заряда.
- 4.4 Дополнительно в отчете следует привести полученные результаты моделирования при использовании другого полупроводникового материала.

5. Контрольные вопросы

- 5.1 Что такое легирование полупроводникового материала? Какие примеси возможно использовать для легирования кремния?
- 5.2 Какой физический принцип лежит в основе работы *p-n* диода?
- 5.3 Чем отличаются конструкции *p-n* диода от *p-i-n* диода?

Лабораторная работа № 2 «Исследование модового состава инжекционного лазера полосковой геометрии»

1. Цель

Знакомство с программным пакетом ANSYS и его использование для решения инженерных задач. Развитие навыков построения трехмерных объектов и расчетной сетки, анализа полученных результатов. Моделирование предложенной гетероструктуры инжекционного лазера и поиск возможных поперечных мод.

2. Краткие теоретические сведения

В резонаторе лазерного диода в результате интерференции образуются стоячие волны, которыми и называют модами резонатора. Образующиеся моды обычно разделяют на две части, а именно: направленные вдоль оптического резонатора принято называть продольным (в настоящей лабораторной работе это направление z), а перпендикулярные ему – поперечными (направления x и y). Изображение продольных и поперечных мод резонатора представлено на рисунке 2.

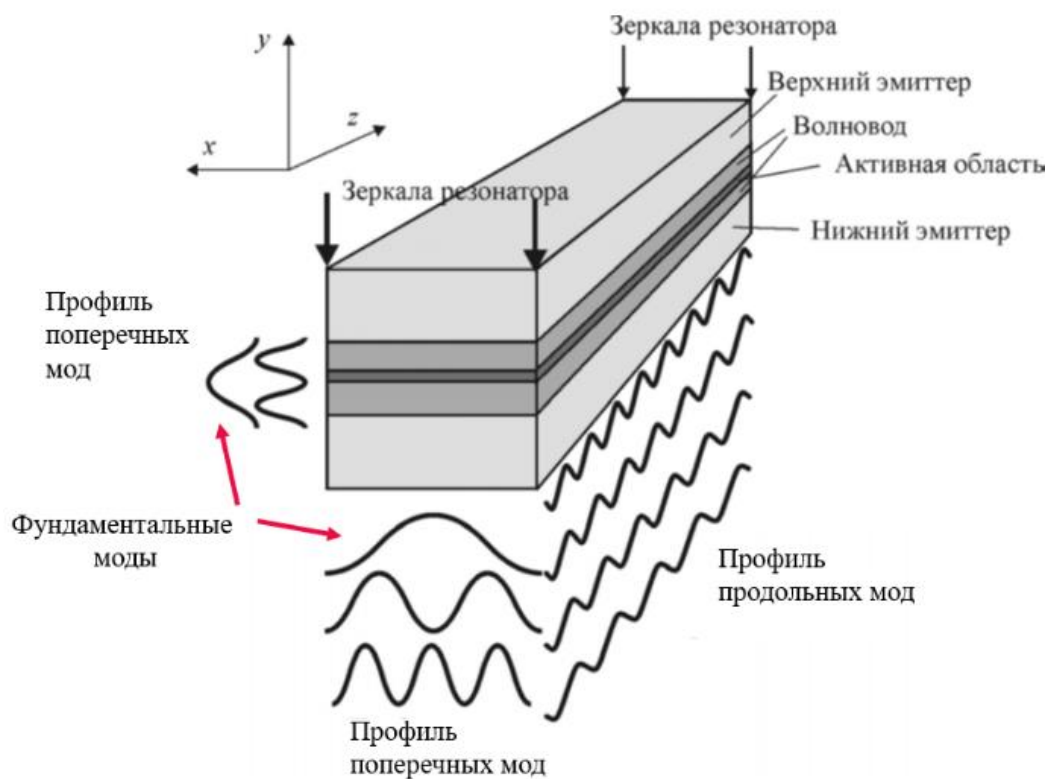


Рисунок 2 – Пример распределения мод в полупроводниковом лазере полосковой геометрии [2]

Распределение поля поперечной моды в значительной степени зависит от самой гетероструктуры лазера, в которой для обеспечения оптического ограничения при помощи различных механизмов реализуют волновод. Целью создания волноводной структуры и локализации поперечной моды является увеличение эффективности полупроводникового лазера – таким образом наибольшая часть оптического излучения находится в активной области лазера, где и происходит вынужденная рекомбинация и, соответственно, усиление.

При рассмотрении волноводной структуры полупроводникового лазерного диода важной характеристикой становятся эффективный показатель преломления и фактор оптического ограничения, которые будут рассмотрены ниже.

Как известно, показатель преломления отражает отношение скорости света в вакууме к скорости распространения света в среде. Эффективный показатель преломления имеет тот же смысл, что и обычный показатель преломления, однако при его расчете учитывается скорость распространения выбранной моды в волноводной структуре.

В свою очередь, фактор оптического ограничения отражает долю моды, расположенную в активной области лазерной гетероструктуры. Таким образом, формула для расчета фактора оптического ограничения в одном из поперечных направлений Γ_0 выглядит следующим образом:

$$\Gamma_i = \frac{\int_d I(y)dy}{\int_L I(y)dy}, \quad (1)$$

где d – толщина активной области, L – толщина гетероструктуры лазерного диода, $I(y)$ – форма поперечного распределения стоячей волны.

Графическое изображение формулы 1 представлено на рисунке 3, где заштрихованной области соответствует интеграл, расположенный в числителе.

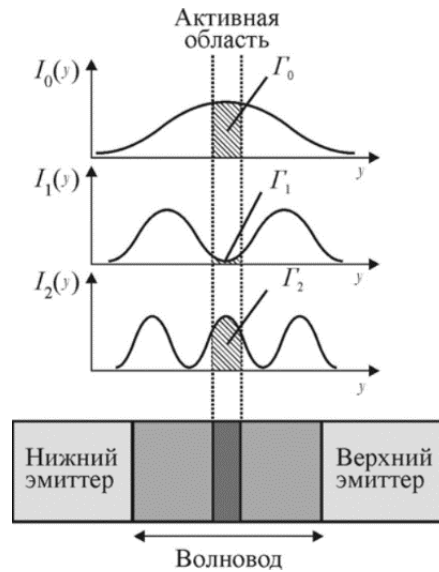


Рисунок 3 – Фактор оптического ограничения для трех поперечных мод лазерного диода [2]

При рассмотрении модового состава полупроводникового лазерного диода также приводят возможные способы достижения одночастотной лазерной генерации: для этого в лазерных структурах реализуют элементы для создания селективных оптических потерь. Так, например, наличие распределённого брэгговского отражателя (РБО) обеспечивает генерацию только на одной продольной моде, когда малые геометрические размеры меза-структуры обеспечивают селекцию фундаментальной поперечной моды. Изображение описанного выше полупроводникового лазера приведено на рисунке 4.

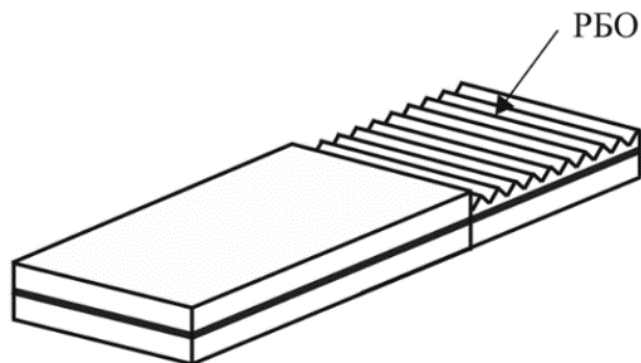


Рисунок 4 – Лазер полосковой геометрии с распределенным Брэгговским отражателем [2]

3. Порядок выполнения лабораторной работы

Для исследования модового состава лазера обучающимся предлагается выполнить моделирование упрощенной гетероструктуры, приведенной в

опубликованной нобелевской лекции Ж.И. Алфёрова, иллюстрация которой приведена на рисунке 5 [3].

- 3.1 Запустить Ansys MODE. Основные используемые элементы интерфейса MODE представлены в Приложении Б.
- 3.2 Добавить 12 объектов «параллелепипед» и задать им геометрические размеры согласно следующей таблице.
- 3.3 Добавить область для расчета «Simulation» - «Eigenmode solver», в ее настройках выбрать двумерную область перпендикулярную оси ординат («2d X normal»). Задать геометрические размеры по оси Y и Z соответственно: «y» = 0, «y span» = 15 мкм, «z» = 3.1 мкм, «z span» = 2.6 мкм.

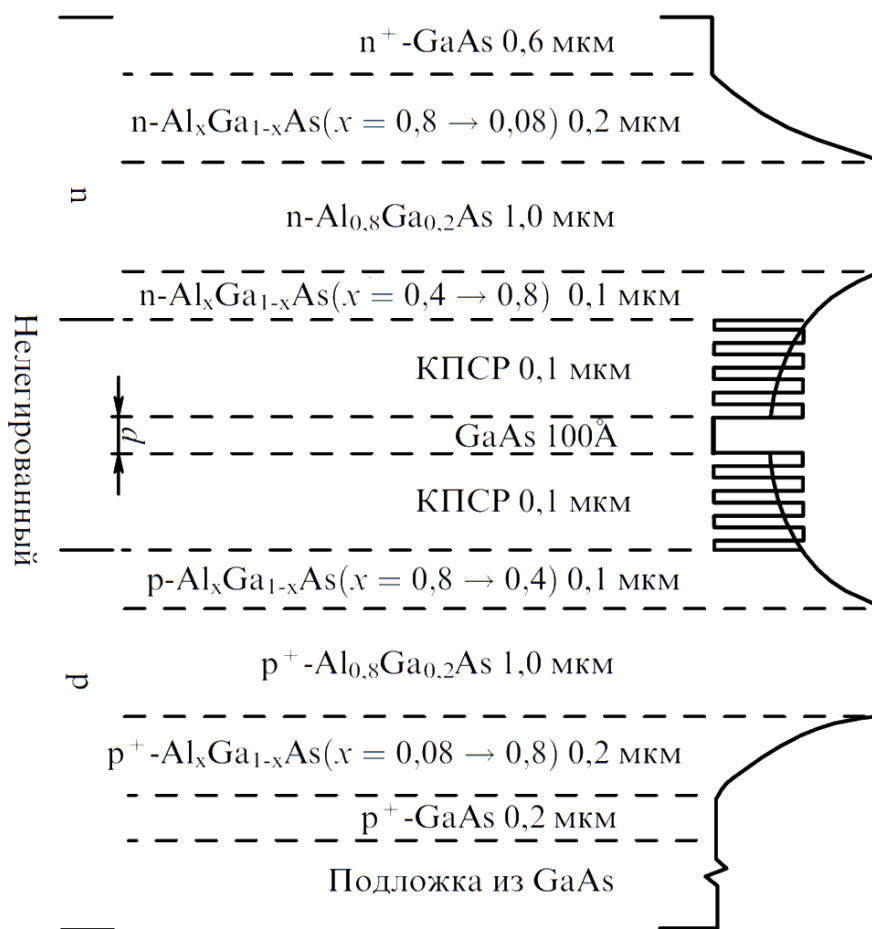


Рисунок 5 – Выращенная методом молекулярно-пучковой эпитаксии структура РО ДГС-лазера с квантовой ямой, ограниченной короткопериодной сверхрешеткой (КПСР) [3]

Таблица 1 – Геометрические размеры слоев

| Название | x, мкм | x span, мкм | y, мкм | y span, мкм | z, мкм | z span, мкм | Материал |
|-------------|-----------|-------------------|-----------|-------------------|-----------|-------------------|--|
| Заращивания | 0 | 100 | 0 | 5 | 4.8 | 0.6 | GaAs |
| Градиентный | 0 | 100 | 0 | 5 | 4.4 | 0.2 | Al _{0.4} Ga _{0.6} As |
| «Барьер» | 0 | 100 | 0 | 5 | 3.8 | 1 | Al _{0.8} Ga _{0.2} As |
| Эмиттер | 0 | 100 | 0 | 10 | 3.25 | 0.1 | Al _{0.6} Ga _{0.4} As |
| КПСР | 0 | 100 | 0 | 10 | 3.15 | 0.1 | Al _{0.1} Ga _{0.9} As |
| АО | 0 | 100 | 0 | 10 | 3.095 | 0.01 | GaAs |
| КПСР | 0 | 100 | 0 | 10 | 3.04 | 0.1 | Al _{0.1} Ga _{0.9} As |
| Эмиттер | 0 | 100 | 0 | 10 | 2.94 | 0.1 | Al _{0.6} Ga _{0.4} As |
| Барьер | 0 | 100 | 0 | 10 | 2.39 | 1 | Al _{0.8} Ga _{0.2} As |
| Градиентный | 0 | 100 | 0 | 10 | 1.79 | 0.2 | Al _{0.4} Ga _{0.6} As |
| Буферный | 0 | 100 | 0 | 10 | 1.59 | 0.2 | GaAs |
| Подложка | 0 | 100 | 0 | 10 | -1.01 | 5 | GaAs |

- 3.4 Добавить расчетную сетку «Simulation» - «Mesh», оставить только уменьшение сетки: по оси Z равное 0.005 и по оси Y равное 0.01, разместить ее в координаты (0, 0, 3.1 мкм) с размерами по оси X, Y и Z, равными 1, 10 и 0.3 мкм соответственно («x span», «y span», «z span»).
- 3.5 Выполнить импорт библиотеки материалов и назначить для каждого объекта соответствующий материал из таблицы 1.
- 3.6 В окне анализа распределения мод рассчитать распределение показателя преломления в структуре нажав кнопку «Mesh structure».
- 3.7 Указать длину волны, равную 0.846 мкм, и количество мод для поиска – 5. Произвести расчет мод вблизи показателя преломления активной области (чекбокс «use max index»).
- 3.8 Выполнение поиска мод производится нажатием кнопки «Calculate modes» или командой “findmodes;” в редакторе скрипта.
- 3.9 Вывести на отдельном графике распределение фундаментальной моды и зафиксировать его. Полученные в ходе расчетов данные расположены в объектах «FDE» – «data», построение требуемого графика возможно нажатием правой кнопкой мыши на интересующий объект «Visualize» – «E».
- 3.10 Далее перестроить полученный график в линейном масштабе, выбрав соответствующую опцию в правом верхнем углу. После этого, в нижнем окне следует для параметра Y выбрать «Plot x axis», а у параметра Z при помощи ползунка или числового значения выбрать положение максимума интенсивности стоячей волны.
- 3.11 К полученному графику добавить график коэффициента преломления структуры, аналогично пункту 3.9 и выбрав пункт «Add

to visualizer», после чего удалить дублирующиеся графики. Экспортировать данные.

- 3.12 Повторить пункты 3.9–3.11 дополнительно для еще двух найденных мод.
- 3.13 Зафиксировать эффективный и групповой показатели преломления для мод.
- 3.14 Дополнительно обучающимся предлагается выполнить поиск научных статей с приведенными в них конструкциями гетероструктур инжекционных лазеров полосковой геометрии. После чего предлагается реализовать построение обнаруженных конструкций лазеров в Ansys MODE и выполнить расчет модового состава, аналогично представленному в настоящей лабораторной работе.
- 3.15 Дополнительно обучающимся предлагается выполнить анализ не только поперечных, но и продольных мод заданного в п. 3.14 инжекционного лазера.

4. Обработка результатов

- 4.1 В отчете привести распределения мод в гетероструктуре инжекционного лазерного диода.
- 4.2 Для всех полученных мод рассчитать фактор поперечного оптического ограничения.
- 4.3 Привести выводы относительно зависимости фактора оптического ограничения от длины волны лазерной генерации.
- 4.4 Привести соображения относительно полученной зависимости эффективного показателя преломления от распределения поля моды в структуре.
- 4.5 Дополнительно в отчете следует привести конструкцию найденного инжекционного лазера и результаты его моделирования.

5. Контрольные вопросы

- 5.1 Каким образом проектируемая структура инжекционного лазера влияет на его модовый состав?
- 5.2 Что такое эффективный показатель преломления?
- 5.3 Что такое фактор оптического ограничения?

Лабораторная работа № 3 «Исследование материального усиления активной области на основе квантовых ям»

1. Цель

Знакомство с программным пакетом ANSYS и его использование для решения инженерных задач. Развитие навыков задания 2D объектов активных областей, анализа полученных результатов. Моделирование активной области инжекционного лазера и расчет спектров ее материального усиления.

2. Краткие теоретические сведения

Как известно, чтобы обеспечить лазерную генерацию, требуется обеспечить достаточное оптическое усиление в активной области, что достигается при создании инверсной заселенности носителей заряда. При этом отметим, что в объемном полупроводниковом материале переходы из более высокого энергетического состояния в более низкое с излучением фотона происходят не между отдельными энергетическими уровнями, а между зоной проводимости и валентной зоной. Таким образом, относительно лазерной генерации на единственной длине волны существуют «паразитные» энергетические переходы – для того, чтобы снизить количество последних, возможно использование различных кванторазмерных структур (рисунок 6).

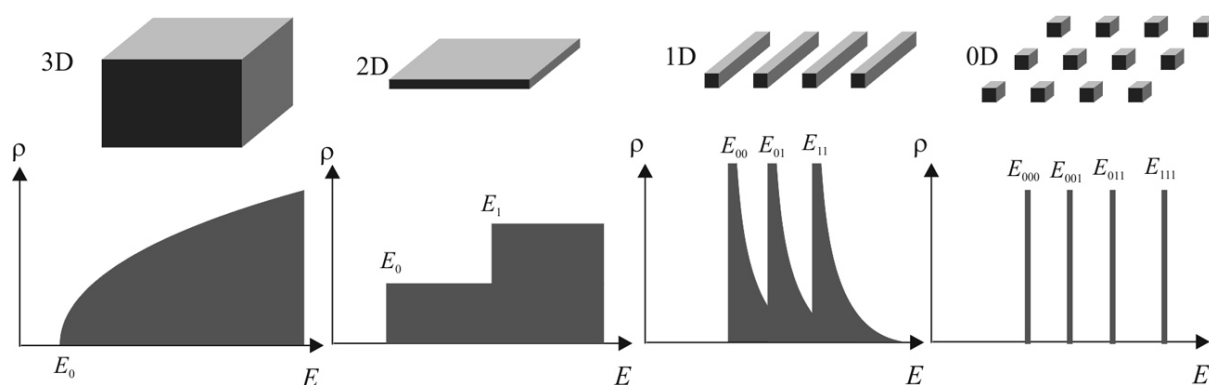


Рисунок 6 – Плотность энергетических состояний для структур различной размерности [2]

Для расчета спектров усиления активной области требуется проведение комплексных вычислений, описание которых в настоящей работе будет опущено. Детальны описания упомянутых расчетов приведены в книге Чоу В.В. и Коха С.В. [Chow, Кос, 1999]. В свою очередь, экспериментально спектр усиления ниже порога генерации возможно оценить согласно методу Хакки–Паоли или при пропускании через

активную область оптического сигнала малой мощности и с узкой спектральной линии излучения.

3. Порядок выполнения лабораторной работы

Для исследования материального усиления активной области на основе квантовых ям обучающимся предлагается выполнить моделирование активной области длинноволнового вертикально-излучающего лазера [5], состоящей из семи $\text{In}_{0.74}\text{Ga}_{0.26}\text{As}$ напряженных КЯ (2.8 нм) разделенных барьерными слоями $\text{In}_{0.53}\text{Al}_{0.20}\text{Ga}_{0.27}\text{As}$ (12 нм).

- 3.1 Запустить Ansys DEVICE. Основные используемые элементы интерфейса DEVICE представлены в Приложении А.
- 3.2 Добавить два материала для квантовой ямы и барьера, для чего выбрать вкладку «Design», «Electrical and thermal».
- 3.3 В появившемся меню выбрать InGaAs, снизу вписать коэффициент x равный 0.74, установить флажок выбора «create semi», подтвердить создание материала при помощи кнопки «create». Переименовать материал в «InGaAs well».
- 3.4 Повторить действия и создать материал AlGaInAs с названием «InAlGaAs barrier» со следующими коэффициентами: $x = 0.2$, $y = 0.27$.
- 3.5 Во вкладке «Design» найти и добавить расчетный модуль MQW.
- 3.6 Через меню, открывающееся по правой кнопке мыши, открыть свойства модуля MQW.
- 3.7 Добавить три слоя и заполнить параметры согласно приведенной ниже таблице, для чего установить чекбокс «override band offset»

Таблица 2 – Параметры слоев активной области

| Номер слоя | Толщина, мкм | Материал | Напряжение |
|------------|--------------|----------------|------------|
| 1 | 0.012 | InGaAs barrier | 0 |
| 2 | 0.0028 | InGaAs well | -0.014 |
| 3 | 0.012 | InGaAs barrier | 0 |

- 3.8 Установить дополнительную толщину верхнего и нижнего слоя равной 0.
- 3.9 Вписать значение эффективного показателя преломления для основной моды, полученной в предыдущей лабораторной работе.
- 3.10 В следующей вкладке «Configuration» задать интересующий диапазон длин волн 185–230 ТГц.

- 3.11 Во вкладке «Parameters» установить значение температуры, равное 293 К.
- 3.12 Во вкладке «Advanced» выбрать граничное условие «pml» (идеально согласованный слой).
- 3.13 Запустить расчет и изучить полученные результаты.
- 3.14 Во вкладке «Optimization and sweeps» добавить параметрическую функцию и открыть ее настройки.
- 3.15 В «Parameters» и «Results» добавить по строчке. В первом случае выбрать параметр модели «temperature» и создать ступенчатое изменение значения от 293 до 393 К с шагом 25 К. Во втором случае в качестве исследуемой функции выбрать «emission». Закрыть окно.
- 3.16 Во вкладке «Optimization and sweeps» запустить расчет. Исследовать полученные результаты, зафиксировать их.
- 3.17 Изменить в расчетном модуле MQW количество квантовых ям до 7 (проще всего это реализовать при помощи кнопки дублирования слоя). Выполнить расчет для температуры 293 К.
- 3.18 Дополнительно обучающимся предлагается выполнить поиск научных статей, в которых упоминается конструкция гетероструктуры активной области инжекционного лазера, произвести моделирование последней и сравнить получаемые спектры усиления с длиной волны лазерной генерации, приведенной в статье.

4. Обработка результатов

- 4.1 В отчете привести спектры материального усиления для различной температуры.
- 4.2 Привести зависимость положения пика материального усиления от температуры.
- 4.3 Привести выводы относительно полученных зависимостей.
- 4.4 Дополнительно в отчете следует привести описание активной области инжекционного лазера из научной литературы и результаты по ее моделированию.

5. Контрольные вопросы

- 5.1 Какие виды активных областей бывают и чем отличаются друг от друга?
- 5.2 Как возможно экспериментально оценить спектр материального усиления инжекционного лазера полосковой геометрии?

- 5.3 Каким образом возможно увеличить материальное усиление инжекционного лазера?
- 5.4 Назовите пороговое условие лазерной генерации.

Лабораторная работа № 4 «Моделирование схемы оптоэлектронного передатчика»

1. Цель

Знакомство с программным пакетом ANSYS и его использование для решения инженерных задач. Развитие навыков создания моделей оптоэлектронных систем, анализа результатов. Исследование качества предложенного оптического канала связи в зависимости от протяженности волоконной линии, а также параметров излучателя.

2. Краткие теоретические сведения

В существующих на текущий момент оптоволоконных приемопередатчиках используются такие оптоэлектронные полупроводниковые приборы, как лазеры и фотодиоды, которые и обеспечивают требуемые преобразования из электрического сигнала в оптический и обратно. Так, характеристики этих двух применяемых полупроводниковых приборов будут ограничивать максимально возможную скорость передачи данных по оптическому каналу связи.

В первую очередь следует отметить также и различные возможности для создания модулированного оптического сигнала: это прямая токовая модуляция лазерного диода или использование отдельного быстродействующего модулятора. Далее, существуют также и различные виды модуляции сигнала, однако в настоящей работе будет рассмотрена только амплитудная модуляция без возвращения к нулю (NRZ, non-return-to-zero).

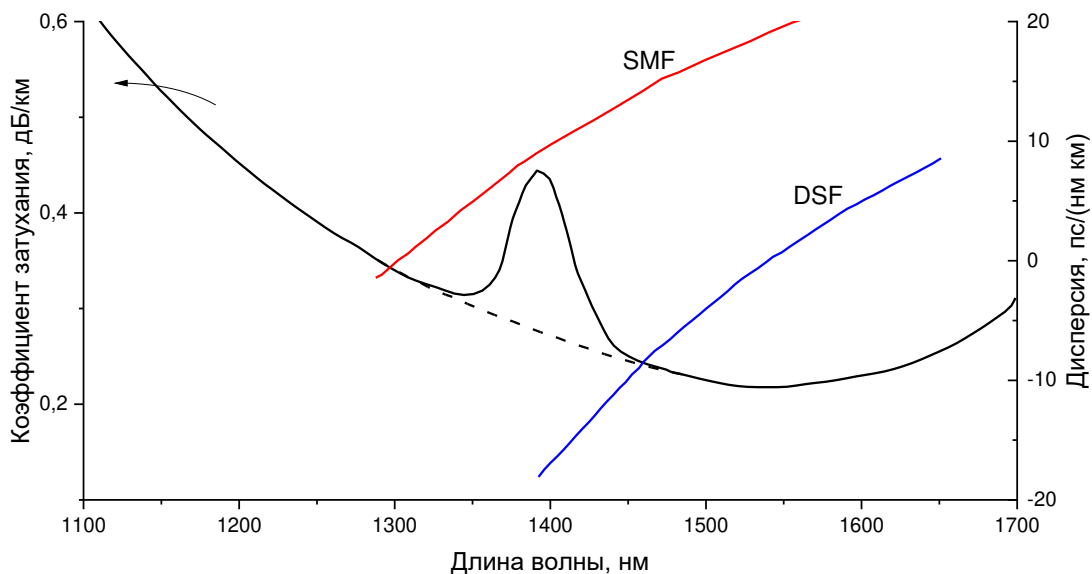


Рисунок 7 – Характеристики дисперсии и затухания одномодовых волокон, адаптировано из [6]

При проектировании оптического канала связи главными параметрами излучателя будут являться длина волны выходного излучения, ширина спектральной линии и оптическая мощность излучения. Известно, что у оптического волокна существует несколько окон прозрачности, где затухание сигнала будет минимальным. Дополнительно также следует учитывать и наличие материальной дисперсии оптического волокна, нулевое значение которой располагается вблизи длины волны 1310 нм – рисунок 7.

Одним из фундаментальных способов, позволяющих оценить качество канала передачи данных, является построение глазковой диаграммы, для чего требуется наложить поступающий сигнал в последовательных тактовых интервалах. Так, например, если мы передаем данные со скоростью 10 Гбит/с, мы знаем, что единичный интервал (UI) каждого бита составляет 0,1 нс. Используя это значение, мы можем «разделить» длинную полученную форму сигнала и исследовать ее по одному единичному интервалу за раз. Поскольку нас также интересуют формы фронтов переходов от одного бита к другому, требуется увеличить окно наблюдения до $2UI$ – изображение 8.

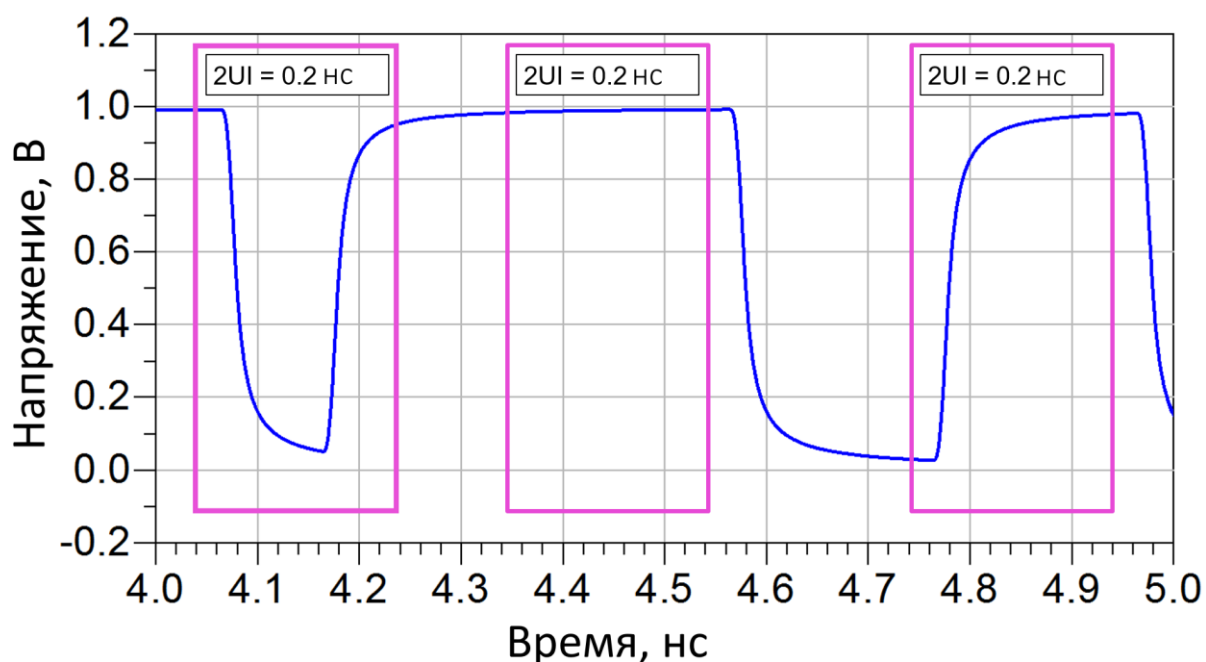


Рисунок 8 – Пример трех временных интервалов полученной модулированного NRZ сигнала [7]

Далее, глазковая диаграмма строится путем наложения этих единичных интервалов друг на друга, что схематично отражено на рисунке 9.

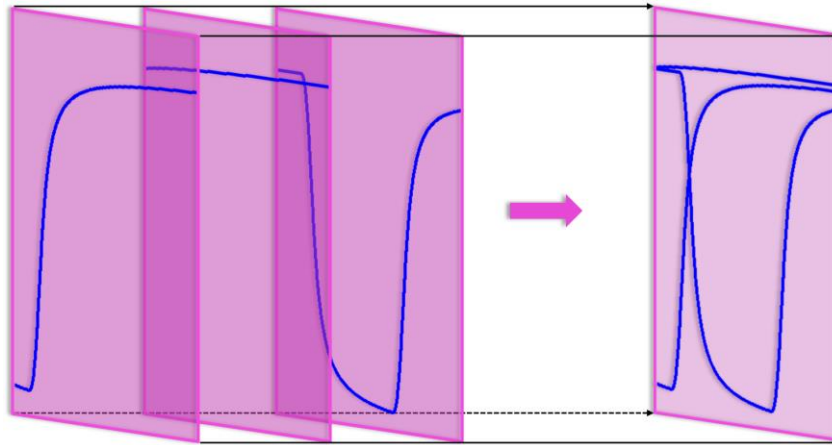


Рисунок 9 – Наложение трех единичных интервалов модулированного сигнала, показанных на рисунке 2 для создания глазковой диаграммы [7]

Так, путем объединения многих временных интервалов формируется глазковая диаграмма; пример экспериментально полученной глазковой диаграммы модулированного оптического сигнала показан на рисунке 10.



Рисунок 10 – Модулированный оптический сигнал и результирующая глазковая диаграмма

3. Порядок выполнения лабораторной работы

- 3.1 Запустить Ansys INTERCONNECT. Основные используемые элементы интерфейса INTERCONNECT представлены в Приложении В.
- 3.2 Добавить источник непрерывного лазерного излучения («CW Laser») и оптический спектроанализатор («OSA» – Optical spectrum analyzer). Искомые элементы располагаются в рабочем окне слева в «Element Library».
- 3.3 Выбрать источник непрерывного лазерного излучения нажатием левой кнопкой мыши и в открывшемся меню параметров установить

ширину спектральной линии («linewidth») равной 150 МГц. Соединить выходной канал этого элемента и входной канал OSA (рисунок 11). Нажать кнопку «Run simulation» – нажатием правой кнопки мыши на «OSA» вызвать меню и выбрать пункт Отобразить результат “Display result”. Сохранить полученный спектр.

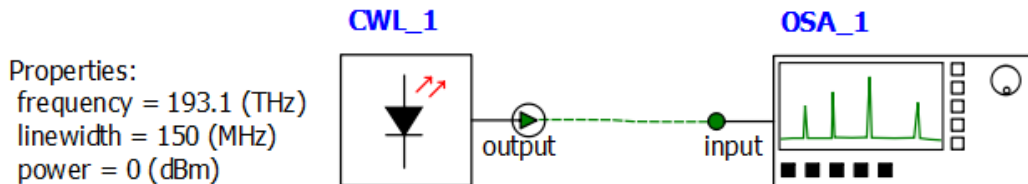


Рисунок 11 – Изображение описанной в п. 3.3 схемы

3.4 Далее в модель добавить генератор псевдослучайной последовательности, генератор амплитудного сигнала без возвращения к нулю и амплитудный модулятор («PRBS Generator», «NRZ pulse Generator» и «Optical Amplitude Modulator» соответственно). Добавить дополнительный элемент для анализа – осциллограф («Oscilloscope») и *p-i-n* фотодиод для конвертации оптического сигнала в электрический. Соединить все элементы согласно рисунку 12.

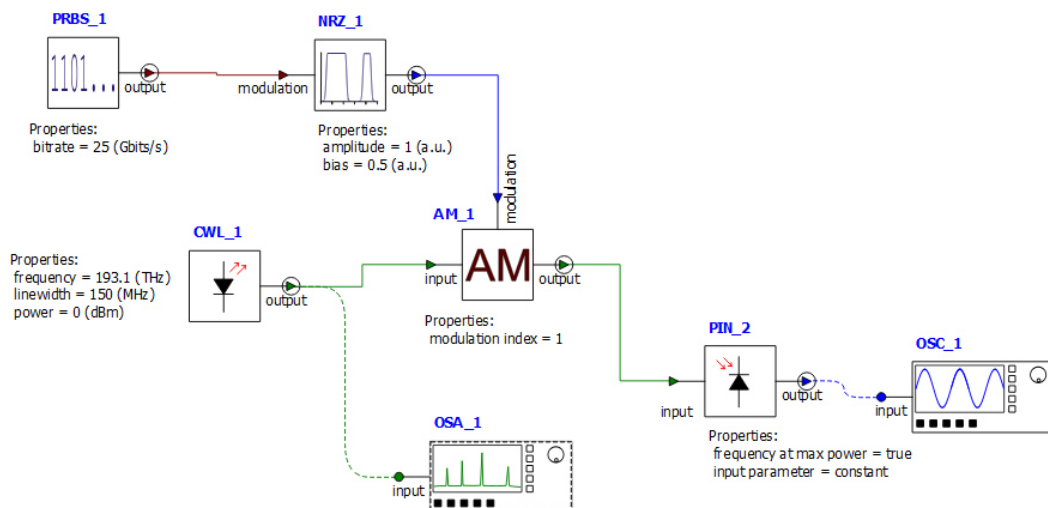


Рисунок 12 – Изображение описанной в п. 3.4 схемы

3.5 Увеличить скорость генерации битовой последовательности у PRBS генератора, установив ее равной 30 Гбит/с. В свойствах NRZ

генератора установить смещение, равное 0.5. Запустить расчет и зафиксировать сигнал с осциллографа.

- 3.6 Добавить в модель оптический аттенюатор («Optical attenuator») и электрический фильтр («LP Bessel Filter») вместе с анализатором глазковой диаграммы («Eye Diagram») – рисунок 13.

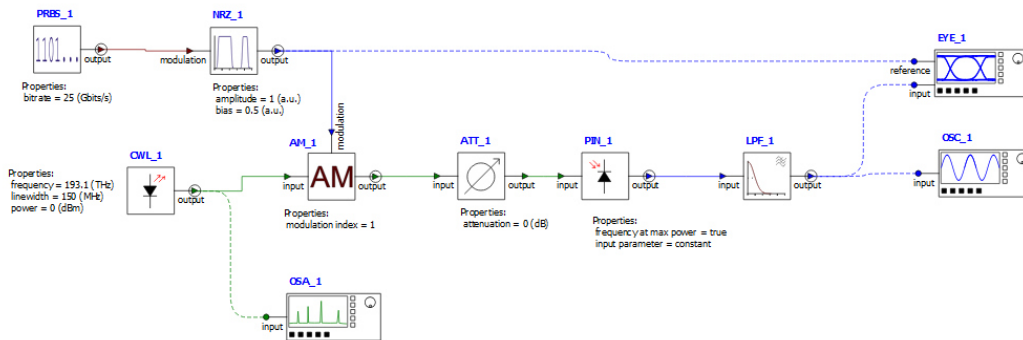


Рисунок 13 – Изображение описанной в п. 3.6 схемы

- 3.7 Запустить расчет и зафиксировать глазковую диаграмму и сигнал с осциллографа.
- 3.8 Повторить расчеты для установленного ослабления оптического аттенюатора, равного 10, 20 и 30 дБ. Зафиксировать полученные диаграммы. Установить ослабление обратно на уровне 10 дБ.
- 3.9 Внести в оптический канал оптическое волокно («Optical Fiber»), установить его длину равной 0.1 км, отключить нелинейные эффекты в волокне (свойство «nonlinear effects» = «false»). Запустить расчет и зафиксировать полученную глазковую диаграмму.
- 3.10 Установить в свойствах всего моделирования (корневой элемент доступен по нажатию левой кнопкой мыши по любому месту пустой области модели) количество элементов 20 000.
- 3.11 С некоторым шагом увеличить длину оптического волокна до 100 км, фиксируя при этом получаемые глазковые диаграммы.
- 3.12 Дополнительно обучающимся предлагается выполнить оптимизацию системы для получения раскрытой глазковой диаграммы при длине передачи сигналов 15 км.

4. Обработка результатов

- 4.1 В отчете привести оптический спектр излучения лазера.
- 4.2 В отчете привести сигнал с осциллографа до и после использования фильтра Бесселя.

- 4.3 В отчете привести глазковые диаграммы для различных значений установленного ослабления на оптическом аттенюаторе и для различной протяженности оптического волокна.
- 4.4 Привести выводы относительно влияния варьируемых характеристик модели на результирующие глазковые диаграммы.
- 4.5 В отчете дополнительно следует привести итоговые значения основных элементов приемопередатчика для получения качественной передачи данных и полученную в результате оптимизации системы глазковую диаграмму.

5. Контрольные вопросы

- 5.1 Каким образом формируется глазковая диаграмма на осциллографе?
- 5.2 Какое влияние оказывает оптическое волокно на качество передаваемого сигнала?
- 5.3 Что такое спектральная ширина линии лазера?

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Tooley M. *Electronic Circuits*. Routledge, 2015.
2. Жуков А.Е. Основы физики и технологии полупроводниковых лазеров. 4th ed. Издательство Академического университета, 2016.
3. Алферов Ж.И. Двойные гетероструктуры: концепция и применения в физике, электротехнике и технологии // *Успехи физических наук*. 2002. Vol. 172, № 9. P. 1068.
4. Chow W.W., Koch S.W. *Semiconductor-Laser Fundamentals*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1999.
5. Babichev A. V. et al. 6-mW Single-Mode High-Speed 1550-nm Wafer-Fused VCSELs for DWDM Application // *IEEE J Quantum Electron*. 2017. Vol. 53, № 6. P. 1–8.
6. Li M.-J., Nolan D.A. Optical Transmission Fiber Design Evolution // *Journal of Lightwave Technology*. 2008. Vol. 26, № 9. P. 1079–1092.
7. Keysight: Your channel PRBS and the eye [Электронный ресурс] // <https://docs.keysight.com/eesofapps/post-3-your-channel-prbs-and-the-eye-678068286.html>. (дата обращения 20.12.2024)

Приложение А – Интерфейс Ansys Device

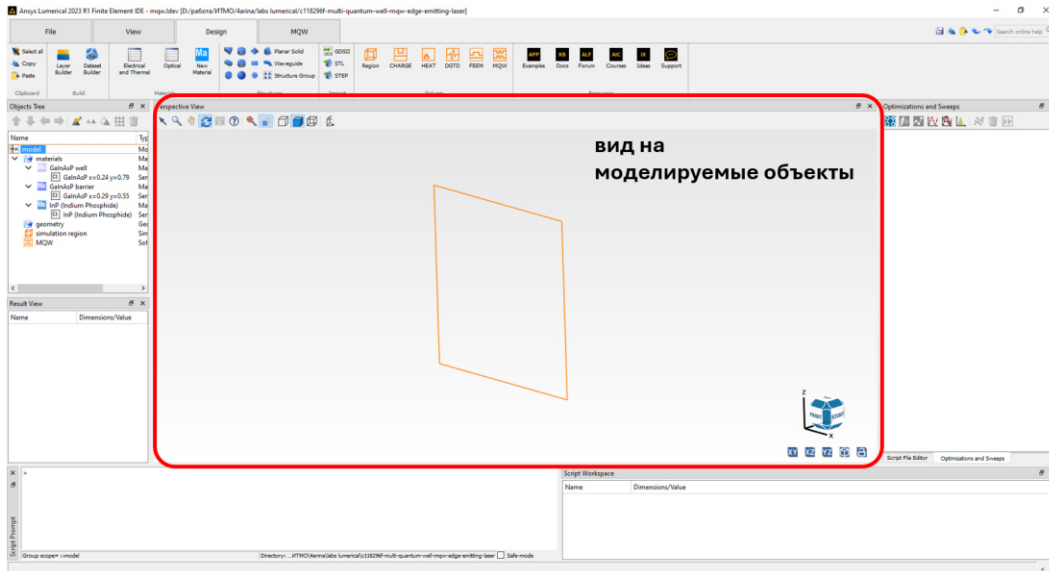


Рисунок А.1 – Основной экран интерфейса Device с выделенной областью моделирования

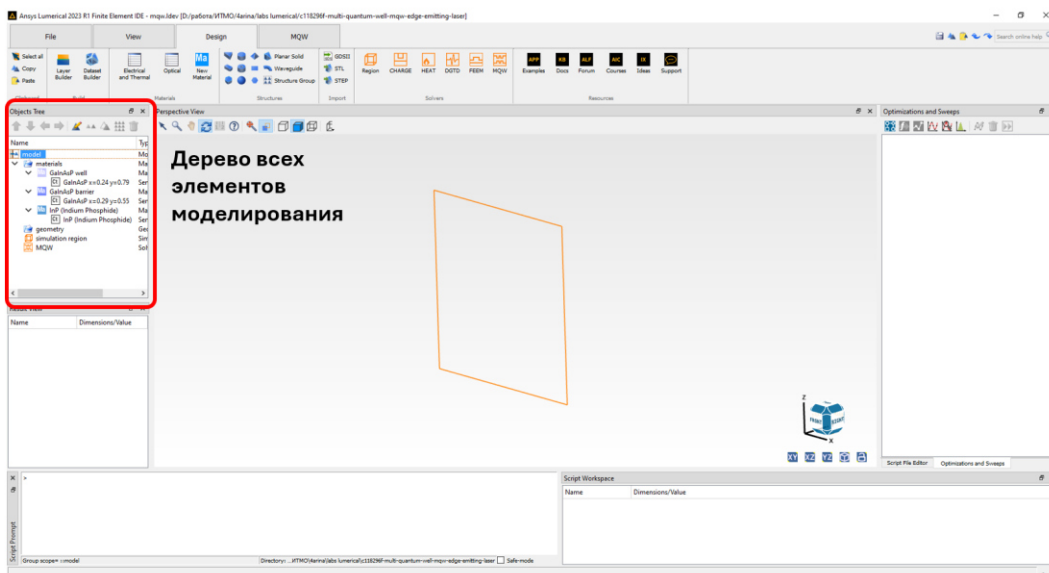


Рисунок А.2 – Основной экран интерфейса Device с выделенной областью дерева основных элементов

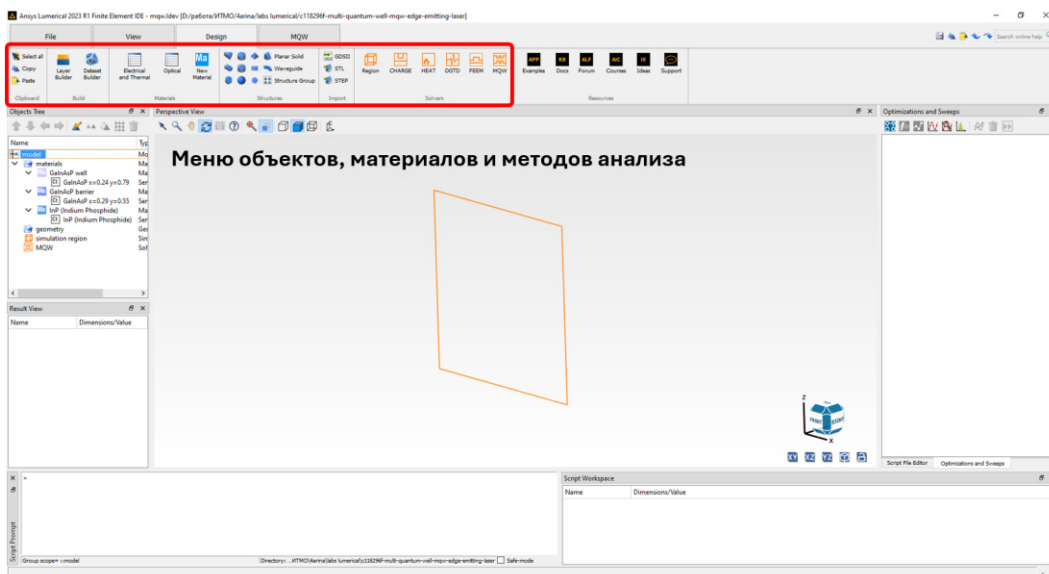


Рисунок А.3 – Основной экран интерфейса Device с выделенным меню объектов

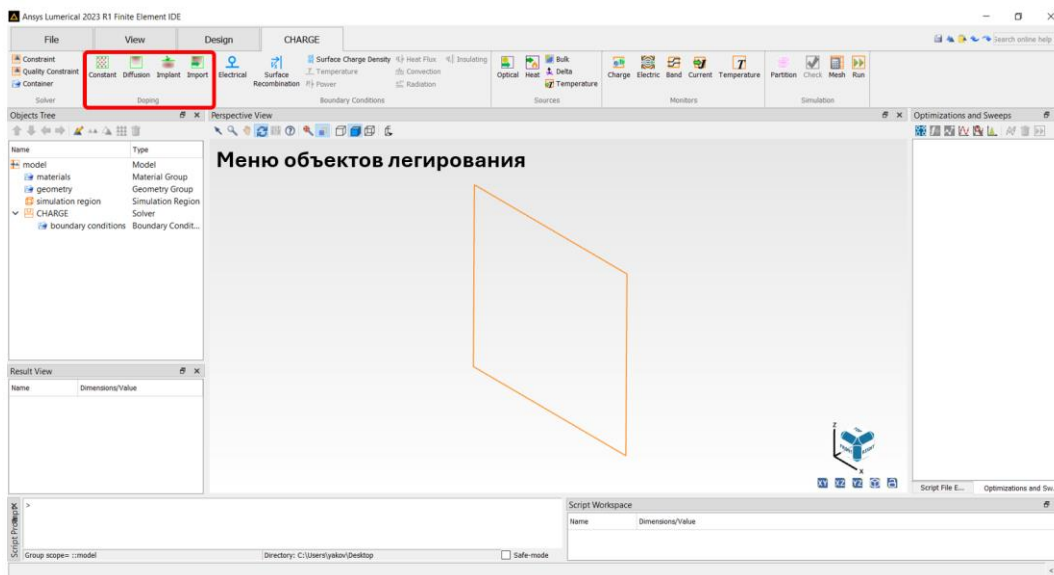


Рисунок А.4 – Основной экран интерфейса Device с выделенным меню объектов легирования

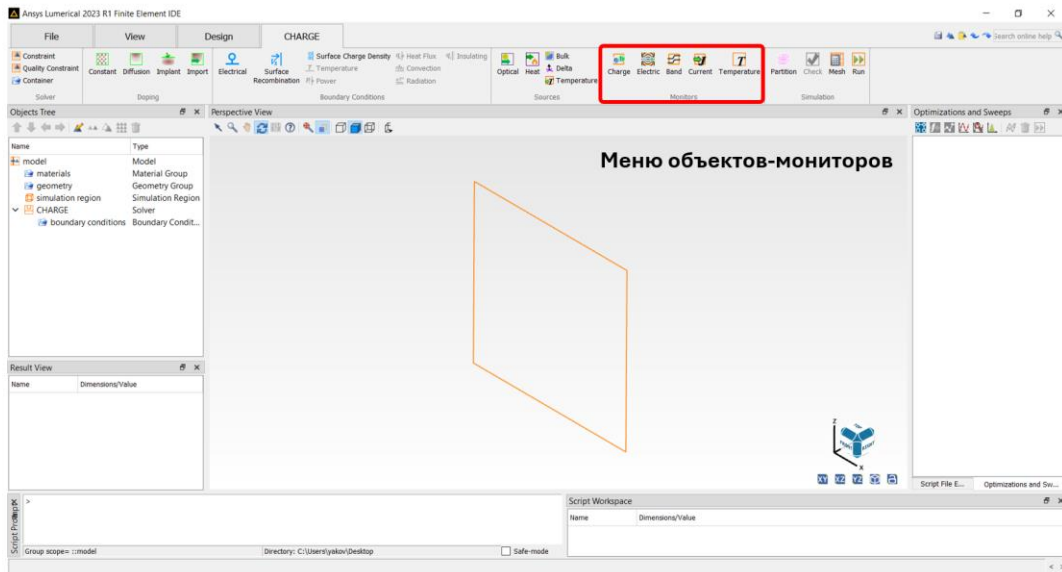


Рисунок А.5 – Основной экран интерфейса Device с выделенным меню мониторов

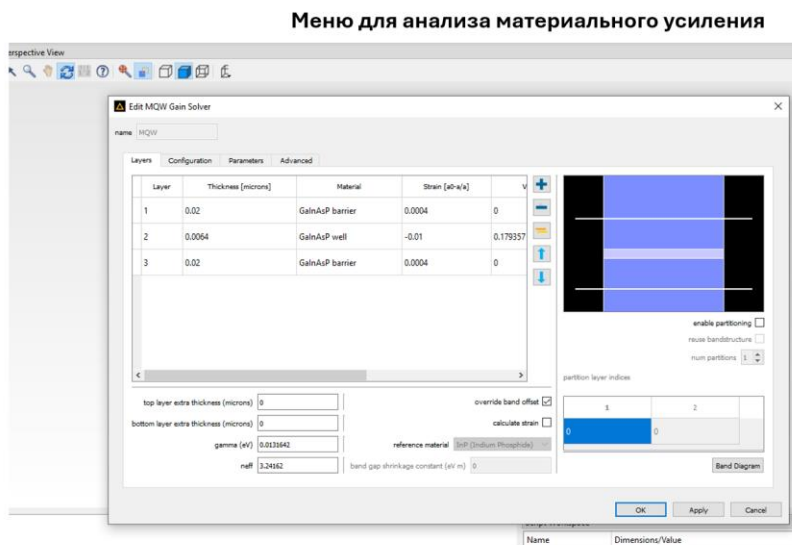


Рисунок А.1 – Основной экран расчетного модуля MQW Gain

Приложение Б – Интерфейс Ansys Mode

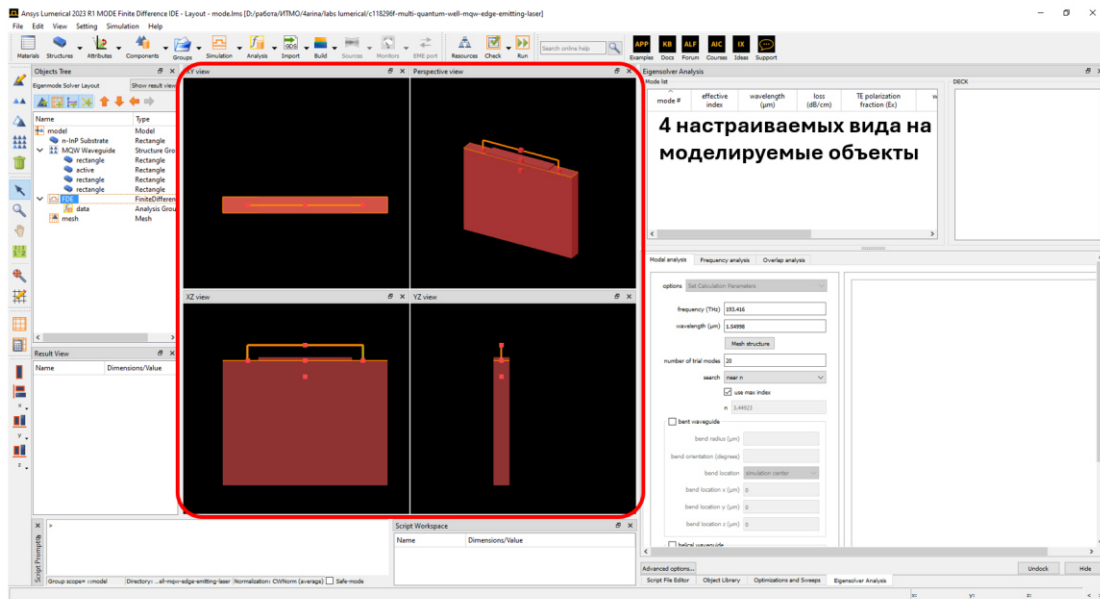


Рисунок Б.1 – Основной экран интерфейса Mode с выделенной областью моделирования

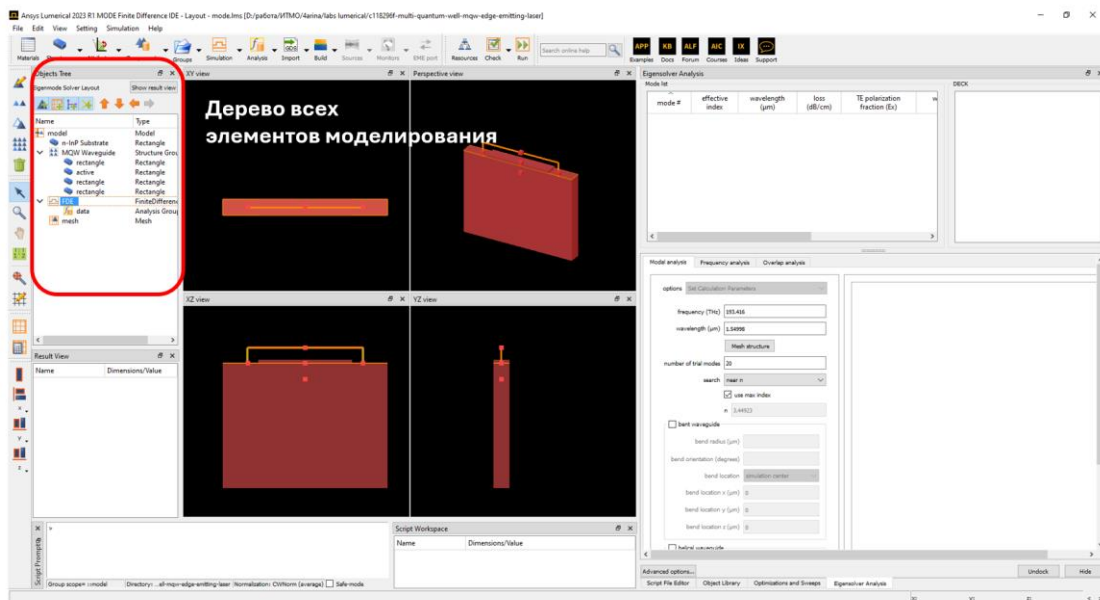


Рисунок Б.2 – Основной экран интерфейса Mode с выделенной областью дерева основных элементов

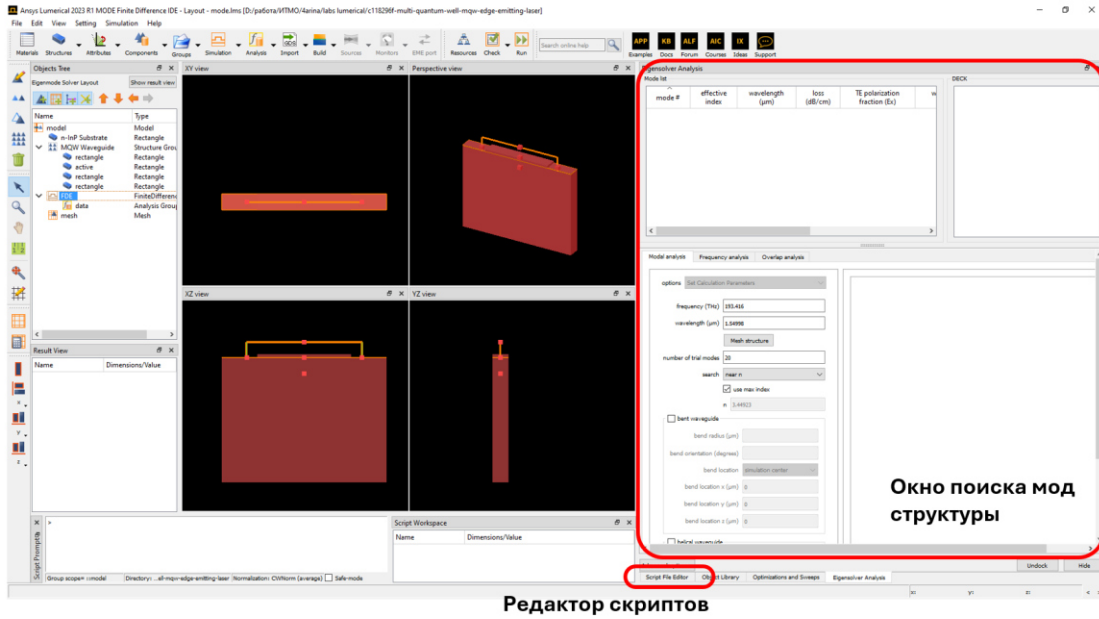


Рисунок Б.3 – Основной экран модуля для расчета оптических мод

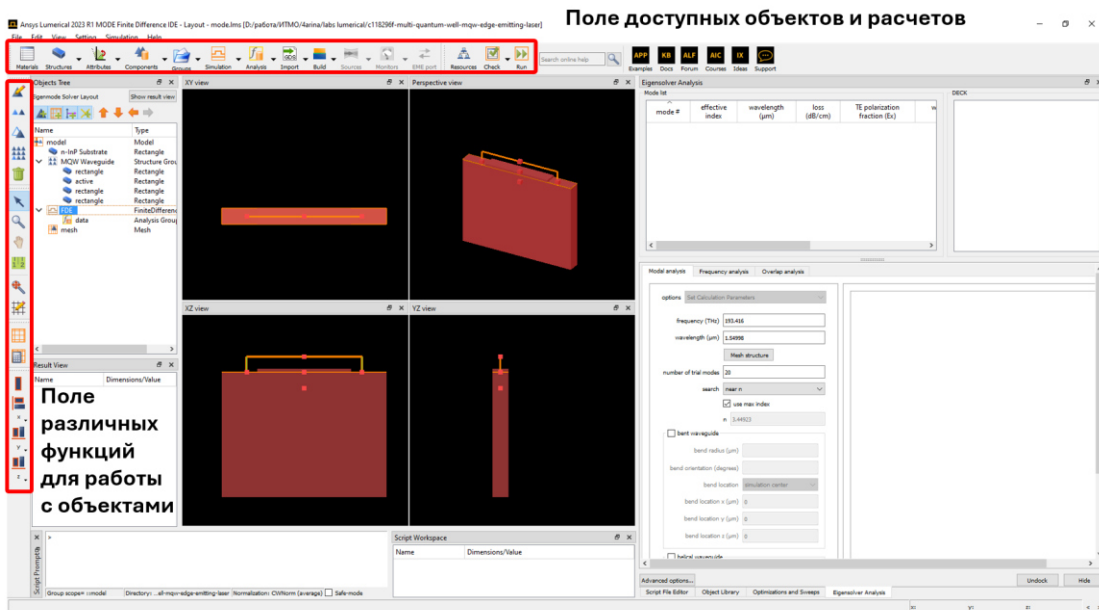


Рисунок Б.4 – Основной экран модуля Mode с выделенными рабочими панелями

База данных материалов

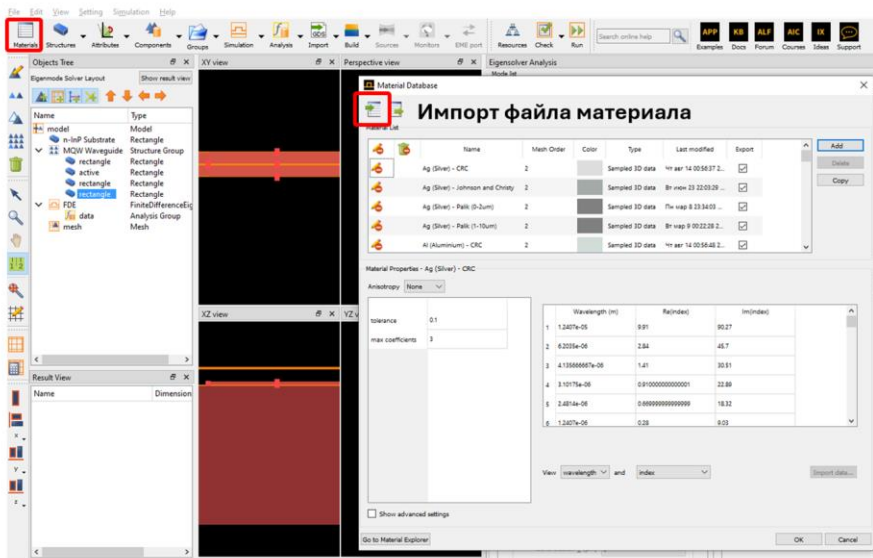


Рисунок Б.5 – Основной экран интерфейса Mode с открытым окном базы данных материалов

Приложение В – Интерфейс Ansys Interconnect



Рисунок В.1 – Основной экран интерфейса Interconnect выделенной областью моделирования

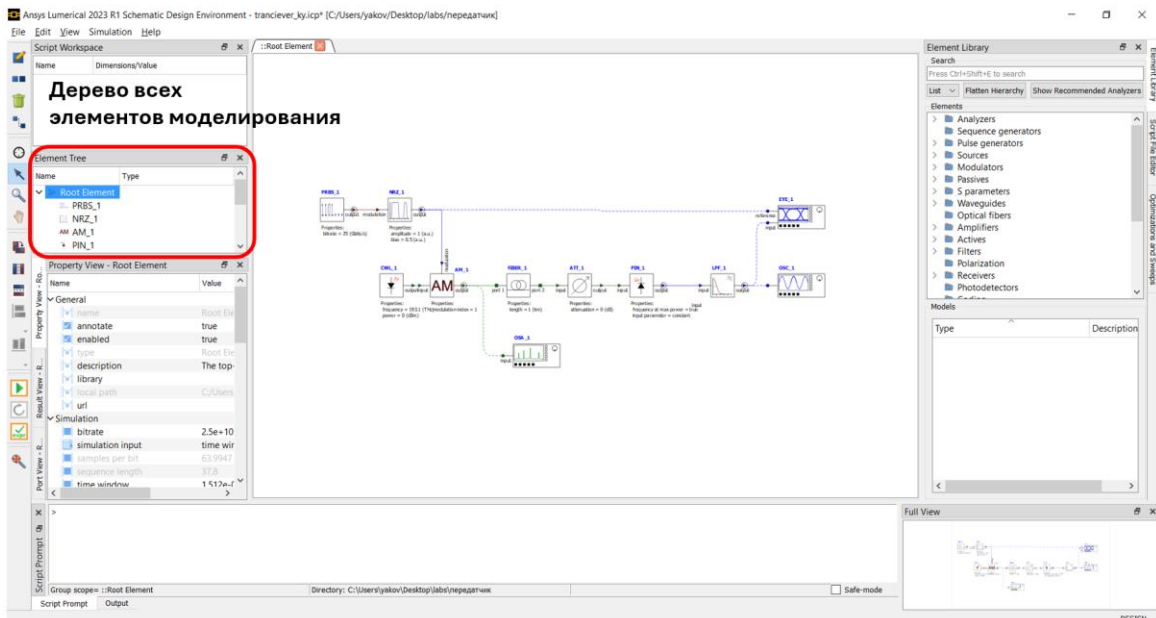


Рисунок В.2 – Основной экран интерфейса Interconnect с выделенной областью дерева основных элементов

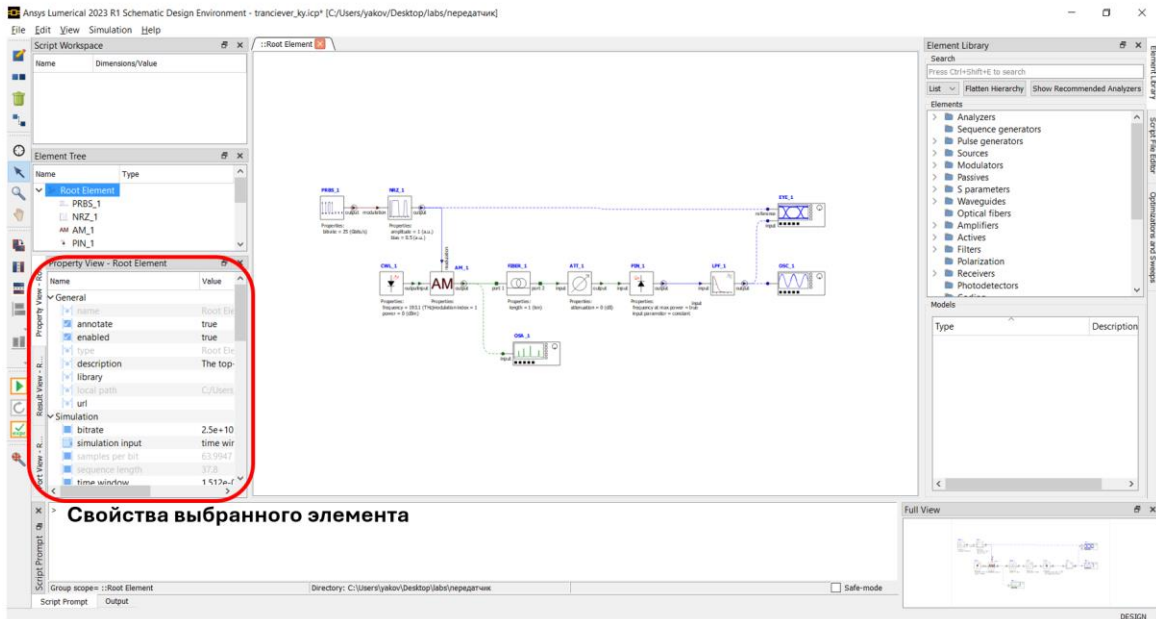


Рисунок В.3 – Основной экран интерфейса Interconnect выделенной областью свойств объекта

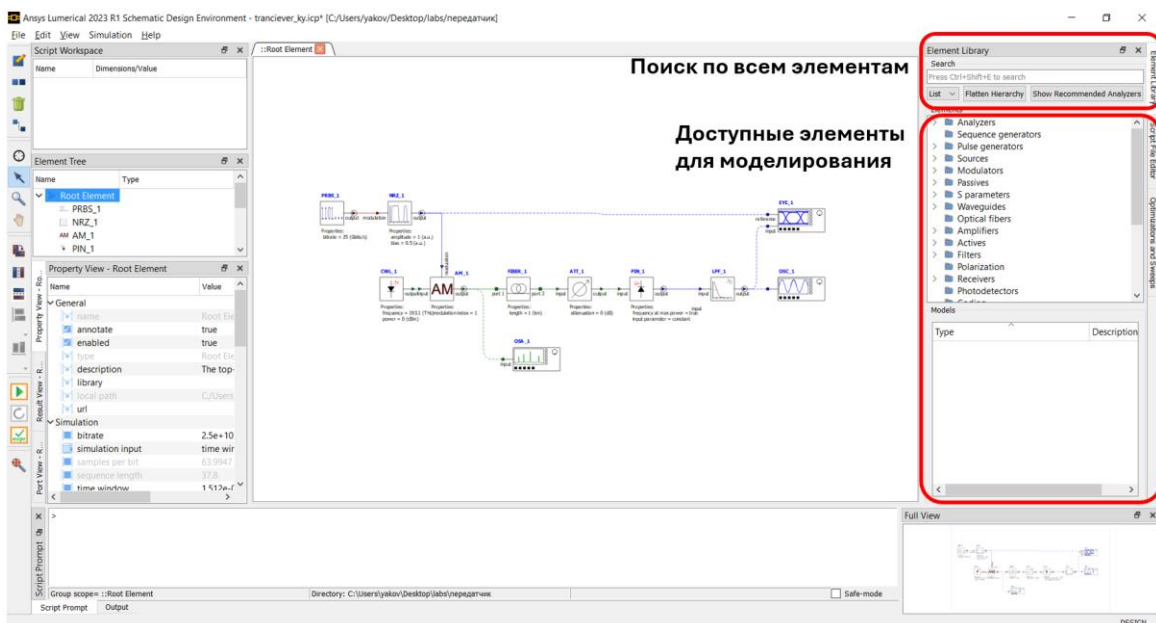


Рисунок В.3 – Основной экран интерфейса Interconnect выделенной областью доступных элементов

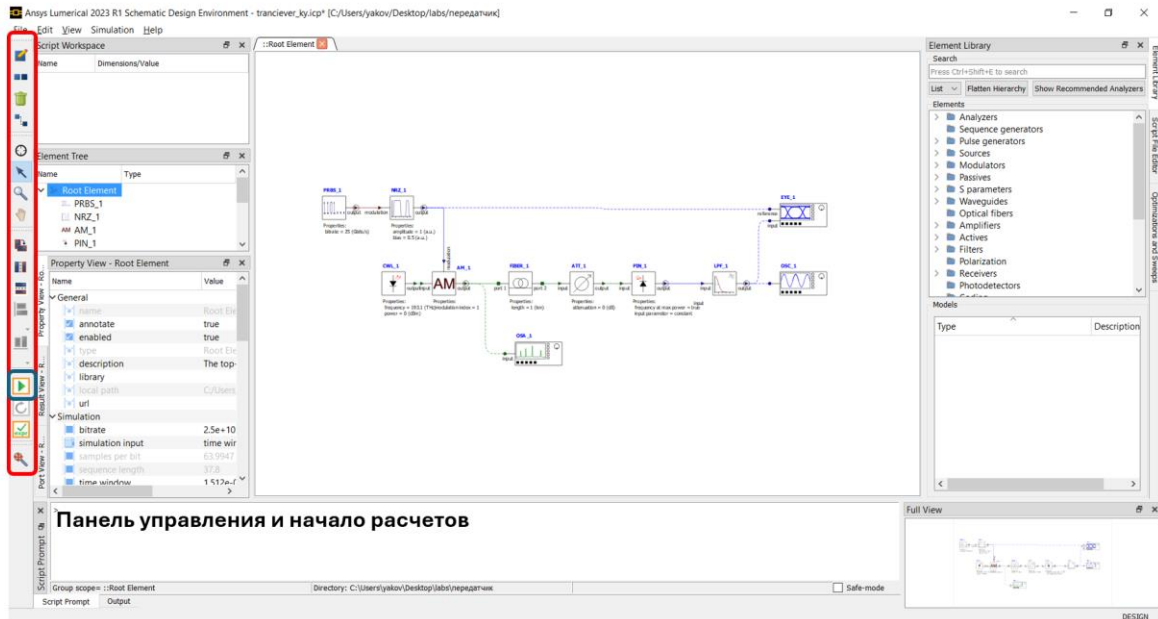


Рисунок В.5 – Основной экран интерфейса Interconnect выделенной панелью управления

Приложение Г
Пример оформления отчета

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский университет ИТМО»**

ОТЧЕТ

О ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ №...

«Название лабораторной работы согласно методическому пособию»

Выполнили:

А.А. Иванов

А.Б. Иванов

А.В. Иванов

Проверил:

А.Г. Иванов

Санкт-Петербург

2025

1. Цель

В соответствии с методическими указаниями к лабораторной работе.

2. Задачи

2.1. ...

Задачи необходимо сформулировать индивидуально или в составе группы, выполняющей лабораторную работу, в соответствии с ожидаемыми результатами выполнения работы. Задачи могут быть как теоретическими (изучить, ознакомиться...), так и практическими (получить, исследовать, рассчитать ...). Каждая поставленная задача должна быть выполнена, а процесс выполнения должен быть описан в разделе «Ход работы».

3. Обзор литературы

3.1. ...

В пунктах раздела «Обзор литературы» должны быть приведены краткие теоретические сведения, поясняющие все пункты из раздела «Задачи», однако приветствуется включение в раздел «Обзор литературы» дополнительных пунктов, содержащих теоретическую информацию, необходимую для выполнения лабораторной работы.

4. Ход работы

4.1. ...

Пункты раздела «Ход работы» должны быть строго согласованы с поставленными ранее задачами. Для теоретически изученных задач, описание которых вошло в раздел «Обзор литературы», в тексте соответствующего пункта раздела «Ход работы» можно ссылаться на пункт «Обзора литературы» БЕЗ необходимости дублирования информации. Допускаются ссылки на рисунки, таблицы, формулы, приведенные в разделе «Обзор литературы» БЕЗ необходимости их дублирования.

5. Заключение

В разделе «Заключение» не следует использовать рисунки и формулы, при необходимости можно ссылаться в соответствующие пункты раздела «Ход работы». Раздел «Заключение» должен содержать краткое описание всех результатов работы с авторскими комментариями для каждого результата. Объем данного раздела должен составлять ориентировочно 500-600 слов.

6. Список использованных источников

На каждый использованный источник должна быть приведена ссылка в разделе «Обзор литературы». Не следует ссылаться на источники в других разделах.

Яков Николаевич Ковач
Арина Валерьевна Кремлева

ОСНОВЫ ОПТИЧЕСКИХ ПРИЕМО- ПЕРЕДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Учебно-методическое пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, литер А