

Министерство образования и науки Российской Федерации
 федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт неразрушающего контроля
 Направление подготовки – Электроника и наноэлектроника
 Кафедра промышленной и медицинской электроники

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Моделирование усилителя яркости в режиме пониженного энерговклада в разряд УДК <u>621.375.14:620.179:681.586.7</u>

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1AM51	Кулагин Антон Евгеньевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	С.Н. Торгаев	к. ф.-м. н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ассистент	В.С. Николаенко			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Ю.В. Анищенко	К. Т. Н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ПМЭ	Ф.А. Губарев	к.ф.-м.н., доцент		

Томск – 2017 г.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ*

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
Профессиональные компетенции	
P1	Использовать результаты освоения фундаментальных и прикладных дисциплин ООП магистратуры; понимать основные проблемы в своей предметной области, выбирать методы и средства их решения: демонстрировать навыки работы в научном коллективе, порождать новые идеи;
P2	Анализировать состояние научно-технической проблемы путем подбора, изучения и анализа литературных и патентных источников; определять цели, осуществлять постановку задач проектирования приборов наноэлектроники, схем и устройств различного функционального назначения с использованием современной электронной базы наноэлектроники, подготавливать технические задания на выполнение проектных работ;
P3	Формулировать цели и задачи научных исследований в соответствии с перспективами развития электроники, а так же смежных областей науки и техники, обоснованно выбирать теоретические и экспериментальные методы и средства решения сформулированных задач;
P4	Осваивать принципы планирования и методы автоматизации эксперимента на основе информационно -измерительных комплексов как средства повышения точности и снижения затрат на его проведение, овладевать навыками измерений в реальном времени; разрабатывать физические и математические модели элементов наноэлектроники, компьютерное моделирование исследуемых физических процессов, приборов, схем и устройств, относящихся к профессиональной сфере;
P5	Делать научно-обоснованные выводы по результатам теоретических и экспериментальных исследований, давать рекомендации по совершенствованию устройств и систем, готовить научно-технические отчеты, обзоры, рефераты, публикации по результатам выполненных исследований, доклады на научные конференции и семинары, научные публикации в центральных изданиях и заявки на изобретения;
P6	Работать в качестве преподавателя в образовательных учреждениях среднего профессионального и высшего профессионального образования по учебным дисциплинам предметной области данного направления под руководством профессора, доцента или старшего преподавателя.
Универсальные компетенции	
P7	Совершенствовать и развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень. Самостоятельно приобретать и использовать в практической деятельности новые знания и умения, в том числе в новых областях знаний, непосредственно не связанных со сферой деятельности;
P8	Использовать знания правовых и этических норм при оценке последствий своей профессиональной деятельности, при разработке и осуществлении социально значимых проектов. Участвовать в проведении технико-экономического и функционально-стоимостного анализа рыночной эффективности создаваемого продукта;
P9	Разрабатывать планы и программы инновационной деятельности в подразделении, проявлять инициативу, в том числе в ситуациях риска, брать на себя всю полноту ответственности;
P10	Способность использовать на практике умения и навыки в организации исследовательских и проектных работ и проведению экспериментальных исследований с применением современных средств и методов;

Р11	Обладать способностью к самостоятельному обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной
-----	--

Министерство образования и науки Российской Федерации
 федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт неразрушающего контроля
 Направление подготовки Электроника и наноэлектроника
 Кафедра промышленной и медицинской электроники

УТВЕРЖДАЮ:
 Зав. кафедрой

_____ Ф.А. Губарев
 (Подпись) (Дата)

**ЗАДАНИЕ
 на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
1AM51	Кулагину Антону Евгеньевичу

Тема работы:

Моделирование усилителя яркости в режиме пониженного энергозатрата в разряд	
Утверждена приказом директора ИНК	№ 2943/с от 15.04.16

Срок сдачи студентом выполненной работы:	27.05.2017
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Разработать радиальную модель усилителя яркости на парах меди.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	<ul style="list-style-type: none"> • Разработка модели, описывающей временные и радиальные характеристики усилителя яркости на парах меди • Тестирование модели и сравнение результатов с экспериментальными и теоретическими работами других авторов • Моделирование усилителя яркости в режиме пониженного энергозатрата в разряд • Исследование влияния параметров схемы накачки на характеристики усилителя яркости
Перечень графического материала	В результате моделирования строятся следующие

	графики: <ul style="list-style-type: none"> • Диаграммы тока плазмы и напряжения на газоразрядной трубе • Радиальный профиль средней плотности тока плазмы • Радиальный профиль предимпульсной концентрации ионов • Временные и радиальные зависимости коэффициента усиления активной среды
--	---

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Николаенко В.С., ассистент
Социальная ответственность	Анищенко Ю.В., доцент
Иностранный язык	Мыльникова Т.С., старший преподаватель

Название разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:

Описание математической модели и ее тестирование (Description of the mathematical model and testing it)

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	01.09.2016
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Торгаев Станислав Николаевич	к.ф.-м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1AM51	Кулагин Антон Евгеньевич		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 99 с., 37 рис., 15 табл., 55 источников, 1 прил.

Ключевые слова: усилитель яркости, математическое моделирование, пониженный энергозатрат.

Объектом исследования является усилитель яркости с активной средой на самоограниченных переходах в парах меди.

Цель работы – разработать математическую модель, описывающую временные и радиальные характеристики усилителя яркости на парах меди, и исследовать с ее помощью влияние энергозатрата в активную среду на работу усилителя.

В процессе исследования проводилась разработка математической модели усилителя яркости на парах меди, тестирование данной модели на основе экспериментальных данных и исследование влияния параметров схемы накачки на работу усилителя.

В результате исследования построена модель усилителя яркости на парах меди в пакете прикладных математических программ Wolfram Mathematica, позволяющая исследовать временные и радиальные характеристики усилителя яркости, в том числе при разных схемах накачки. Адекватность модели была проверена на основе сравнения результатов моделирования с экспериментальными результатами других авторов. С помощью модели было изучено влияние параметров схемы накачки на работу усилителя, а также отдельно исследован слабостационарный режим работы.

Степень внедрения: разработанная модель используется в исследованиях в рамках гранта РФФИ, проект №14-19-00175.

Область применения: исследование физико-химических процессов в активных средах на парах металлов.

В будущем планируется ввести в модель учет добавок, модифицирующих кинетику активной среды.

Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

1. ГОСТ 12.0.003-2015 «ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация»
2. ГОСТ 12.1.040-83 «ССБТ. Лазерная безопасность. Общие положения»
3. ГОСТ 12.1.019-79 (с изм. №1) «ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты»
4. ГОСТ 31581-2012 «Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий»
5. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы»
6. СанПиН 2.2.4.1191-03 «Электромагнитные поля в производственных условиях»
7. СанПиН 5804-91 «Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров»

В данной работе применены следующие термины с соответствующими определениями:

лазерный монитор: устройство для наблюдения в режиме реального времени за процессами в объектах, находящимися за сильной фоновой засветкой.

активная среда: вещество, которое может усиливать проходящее через него излучение благодаря инверсии населенностей энергетических уровней, создаваемой за счет энергии накачки.

Оглавление

Введение	10
1. Моделирование активных сред на парах металлов	12
1.1. Применение активных сред на парах металлов в качестве усилителей яркости	12
1.2. Методы моделирования активных сред на парах металлов	13
1.3. Существующие модели активных сред на парах металлов	15
2. Описание математической модели и ее тестирование	18
2.1. Описание нульмерной модели	19
2.2. Описание радиальной модели	24
2.3. Тестирование радиальной модели	28
3. Результаты моделирования	33
3.1. Моделирование слабotoчного режима работы	33
3.2. Моделирование высоких частот	37
3.3. Влияние параметров электрической схемы на характеристики работы усилителей яркости	40
3.4. Моделирование активной среды с увеличенной длительностью инверсии	49
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	54
4.1. Объект исследования	54
4.2. Цели и задачи	54
4.3. Сильные стороны проекта	55
4.4. Слабые стороны проекта	56
4.5. Возможности для реализации проекта	57
4.6. Угрозы для реализации проекта	58
4.7. Установление соответствий	59
5. Социальная ответственность	66
5.1. Производственная безопасность	67
5.1.1. Анализ опасных и вредных факторов, которые могут возникнуть при эксплуатации объекта исследования	67
5.1.2. Анализ опасных и вредных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований	69
5.1.3. Мероприятия по защите исследователя от действий опасных и вредных факторов	70

5.2. Экологическая безопасность	71
5.3. Безопасность в чрезвычайных состояниях	72
5.4. Организационные мероприятия обеспечения безопасности	73
5.5. Особенности законодательного регулирования проектных решений	74
Заключение	75
Список публикаций студента	76
Список использованных источников	77
Приложение А. Description of mathematical model and testing it	84

Введение

На сегодняшний день активно развиваются области науки, связанные с методами контроля различных процессов. Одним из методов контроля является визуальный контроль процесса. Однако с развитием технологий визуальный контроль многих сложных процессов стандартными средствами стал невозможен. Одной из причин этого является сильная фоновая засветка. Контроль таких процессов требует методов, которые позволяют отделить фоновую засветку от изображения объекта визуализации. С такой задачей справляются лазерные мониторы благодаря узкому спектру их работы. Изображение в таких системах формируется благодаря усилительным свойствам активной среды лазеров. Наиболее перспективными являются активные среды на самоограниченных переходах в парах металлов за счет их большого коэффициента усиления и узкого спектра работы. Среди таких активных сред особо стоит выделить активные среды на парах меди, так как они позволяют получать большой коэффициент усиления при относительно высокой частоте работы.

Хотя работы по исследованию лазеров на парах меди имеют давнюю историю, эта тема имеет большие перспективы. Об этом свидетельствует постоянное появление принципиально новых экспериментальных результатов. Кроме того в последние годы интерес в активных средах на парах металлов больше сместился от исследования лазеров на их основе к исследованию усилительных свойств данных сред. В Томске исследованием усилителей яркости на парах меди активно занимаются в Институте оптики атмосферы СО РАН.

Данная работа посвящена моделированию усилителя яркости на парах меди. Особенностью данной модели является то, что она описывает не только временные характеристики активной среды, но и радиальные. Необходимость в изучении радиальных характеристик активной среды вызвана тем, что радиальный профиль коэффициента усиления активной среды сильно влияет на качество изображения. Кроме того учет радиальных эффектов в активной среде

позволяет корректно описывать широкий спектр режимов работы усилителя яркости.

Результаты работы были доложены на международной конференции «Atomic and Molecular Pulsed Lasers» (AMPL) и «International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices» (EDM).

1. Моделирование активных сред на парах металлов

1.1. Применение активных сред на парах металлов в качестве усилителей яркости

В конце последнего века несколько научных групп изучали использование усилителей яркости для активного визуального контроля объектов, в частности при производстве интегральных микросхем. Они использовали активную оптическую систему, называемую лазерный проекционный микроскоп. Основным компонентом лазерного микроскопа был активный элемент лазеров на парах меди, работающий как усилитель яркости на частоте следования импульсов порядка 10 кГц [1].

В начале 2000-х годов развитие новых технологий, основанных на влиянии энергетических потоков на объект, таких как модификация поверхности материала, направленная на улучшение его свойств, создание новых материалов, включая наноструктурированные, процессы сварки и резки и самораспространяющийся высокотемпературный синтез новых материалов, возродило интерес к таким оптическим системам. Прежде всего, упомянутые выше процессы заграждены интенсивной фоновой засветкой, которая не позволяет визуализировать объект и осуществлять контроль быстрых процессов [2-4]. Активная среда лазеров на самоограниченных переходах в парах металлов, работающая как усилитель яркости, дает возможность визуализации таких объектов благодаря высокой спектральной яркости и большому коэффициенту усиления в узком спектральном диапазоне (2–5 пм), причем в разных оптических диапазонах (от ближнего ультрафиолета до ближней инфракрасной зоны). Импульсно-периодический режим излучения делает возможным мониторинг объектов и осуществление диагностики быстрых процессов с временным разрешением, соответствующим частоте следования импульсов [5].

В настоящее время несколько исследовательских групп изучают и применяют усилители яркости на парах меди. Группа профессора Прокошева В.Г. получила важные результаты касательно визуализации процессов

взаимодействия интенсивных потоков энергии с поверхностью [6]. Похожие проблемы изучались доктором Кузнецовым А.П. и профессором Бужинским О.И. с коллегами [7,8].

Результаты по диагностике быстрых процессов в условиях сильной фоновой засветки были получены при использовании усилителя яркости с активной средой на парах бромида меди. Среди таких процессов самораспространяющийся высокотемпературный синтез, коронный разряд в воздухе, процесс получения наночастиц с помощью мощного волоконного лазера и так далее [9-11]. Типичная длительность таких процессов составляет от десятков микросекунд до десятков секунд. Для визуализации таких процессов в режиме реального времени необходима частота следования импульсов излучения (усиления) порядка 100 кГц и более.

1.2. Методы моделирования активных сред на парах металлов

Интерес к активным средам на парах металлов возник еще до того, как они активно стали применяться в качестве усилителей яркости. Первоначально такие среды применялись только в качестве генераторов когерентного излучения (лазеров). Интерес техники к таким системам породил и потребность в моделировании активных сред на парах металлов. Методы моделирования, которые стали применяться, были заимствованы из других областей науки.

Одним из методов моделирования являются статистические модели. Они используются для самых разных технических систем, и активные среды не являются исключением. Значительно продвинулись в этом направлении болгарские профессора И. П. Илиев и С. Г. Гочева-Илиева [12]. Преимущественно ими использовался метод многомерных адаптивных регрессионных сплайнов [13]. Однако такой тип моделирования сильно ограничен в своих возможностях. Во-первых, предсказательная способность таких моделей очень мала, то есть она перестает работать для экспериментов с принципиально новыми подходами, по которым не набрана статистика. Кроме того для большой детерминированности модели требуется большая

экспериментальная база. Во-вторых, статистические модели способны описывать только те характеристики активной среды, которые мы можем непосредственно измерить (например, мощность генерации излучения [14]). Однако для исследования работы усилителей яркости на парах металлов важно понимать физику процессов в активной среде, которые приводят к формированию тех или иных энергетических характеристик прибора. Для этого нам нужно знать пространственно-временные зависимости концентраций составляющих плазмы (атомов и ионов активного вещества, буферного газа и так далее). Частично эти зависимости можно измерить (например, в работе [15] они были измерены спектральными методами), но эти измерения связаны с большими техническими трудностями. Поэтому набор большого количества экспериментальных данных по этим характеристикам представляет проблему.

Другим методом моделирования является модель трех состояний (модель Винера-Розенблюта). Изначально эта модель создавалась в биологии для описания популяций и поэтому получила название модель клеточных автоматов [16]. Однако сейчас она используется в самых разных областях науки благодаря своей универсальности. В ее основе лежит предположение о мгновенности переходов атомов между тремя состояниями: состоянием покоя, возбужденным состоянием и промежуточным состоянием, получившее название рефракторного. Главным преимуществом таких моделей являются, очевидно, их простота. Но данный вид моделирования не позволяет моделировать активную среду с достаточной для выполнения поставленных задач подробностью.

Еще одним методом моделирования является кинетическая модель активной среды. Она представляет собой систему дифференциальных уравнений, описывающих кинетику реагентов в активной среде. В случае пространственно-временной модели дифференциальные уравнения представляют собой нелинейные уравнения диффузии и теплопроводности. Кинетическая модель может решаться двумя разными численными методами: методом конечных объемов и разностным методом. Разностный метод является

значительно более быстрым, но не подходит для моделирования систем со сложной геометрией. Основной сложностью при использовании кинетической модели является то, что системы дифференциальных уравнений, описывающих кинетику активной среды, всегда оказываются жесткими. Это существенно усложняет их численное решение. Поэтому учет в пространственно-временной модели более одной пространственной координаты требует использования суперкомпьютеров.

1.3. Существующие модели активных сред на парах металлов

Первыми работами, которые были посвящены численному моделированию характеристик генерации активных сред на парах металлов, являлись [17-21]. В этих работах были рассмотрены механизмы, ограничивающие генерационные характеристики лазеров. Среди таких механизмов отмечались столкновительное перемешивание верхнего и нижнего лазерных уровней, а также ионизация части атомов меди. В последующих работах было показано, что эти механизмы, предложенные в работах [17-20], слабо влияют на частотно-энергетические характеристики лазеров на парах металлов. В работе [21] Смиланский исследовал возможность значительного столкновительного возбуждения метастабильного нижнего лазерного уровня. В работе [19] также рассматривались следующие процессы:

- роль буферных газов;
- столкновительное возбуждение нижних метастабильных лазерных уровней;
- процесс рекомбинации в послесвечении;
- возбуждение высоколежащих уровней.

В этих работах также учитывались параметры электрической схемы контура разряда и параметры газоразрядной трубки.

Позднее появились работы по численному исследованию кинетики лазеров на парах металлов, выполняемые в НПО «Астрофизика» [22-28], а также группой M.G. Kushner [29-31]. В работах M.G. Kushner впервые была

рассмотрена работа активного элемента лазера на парах меди большого диаметра и были сделаны попытки проведения численного анализа кинетики лазера на парах хлорида меди. С помощью разработанной под руководством профессора Молодых Э.И. программы МОЛОТ в работах [23-28] были рассчитаны генерационные характеристики лазеров на парах бария, марганца, меди, свинца, золота и европия. В этих работах была рассмотрена накачка, в том числе электронным пучком. Эти работы включали в себя анализ влияния предимпульсных концентраций электронов и атомов меди в метастабильных состояниях на частоту следования импульсов генерации. В работе [20] также проводились расчеты пространственно-временных характеристик излучения короткого лазерного импульса в условиях переменного коэффициента усиления. В работах [32-33], проведенных в ИВТ АН, кинетика активной среды рассматривалась для газоразрядной трубки коаксиальной геометрии. Успехов в численном моделировании достиг также А.Н. Мальцев [34]. Эти модели использовали для решения жестких систем дифференциальных уравнений методы Гира и Рунге-Кутта с автоматическим выбором шага. В упомянутых работах использовались не реальные сечения, а эмпирические формулы. При этом часто использовался ряд подгоночных параметров. Из-за отсутствия надежных данных о сечениях возбуждения атома меди авторы полагали возбуждение метастабильных уровней атома меди в течение импульса возбуждения слабым. Основными допущениями в данных работах являлись:

- использовалось приближение мгновенной ионизации уровней, лежащих выше резонансных, и постоянство температуры электронов во время импульса возбуждения;
- сечения переходов атома меди, в том числе и лазерных, рассчитывались по аппроксимационным формулам (наиболее часто использовалась формула Гризинского) [35].

Стоит отметить, что подход с набором варьируемых параметров позволил авторам данных работ добиться неплохого совпадения с экспериментально рассчитанными характеристиками, несмотря на сделанные

допущения, и полученные в этих работах результаты сыграли свою роль в построении физической картины процессов, протекающих в активных элементах лазеров на парах металлов. В нашей работе использовались наиболее достоверные данные о сечениях возбуждения в атоме меди, представленные в работе [36].

Важные результаты в пространственном моделировании активных сред на парах металлов были получены в работе [37]. Авторы разработали аналитическую математическую модель, описывающую как продольные, так и поперечные характеристики активных сред на парах стронция и кальция. Были отмечены некоторые важные особенности активных сред на парах металлов, свойственные также и активным средам на парах меди. Кинетическая численная модель, также описанная в этой работе, работает только с одной радиальной пространственной переменной, так как учет большего количества пространственных координат в численной модели связан с проблемами, описанными в предыдущем разделе.

4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

4.1. Объект исследования

Данная выпускная квалификационная работа посвящена компьютерному моделированию усилителя яркости на основе лазера на парах меди, работающего на длинах волн 510,6 нм (зеленная линия) и 578,2 нм (желтая линия). Модель описывает электрические, плазмохимические процессы в активной среде, а также ее оптические свойства. Построенная модель используется для исследования физических процессов, лежащих в основе функционирования усилителя яркости, и исследования возможности улучшения свойств усилителя яркости на парах меди (повышение частоты работы, коэффициента усилителя и его радиальной и временной однородности и т.д.) за счет схемотехнических решений (модернизации схемы накачки), конструктивных особенностей, использования специфических режимов работы. В дальнейшем планируется использовать результаты работы для создания экспериментальных образцов усилителей яркости с улучшенными характеристиками. Таким образом, планируется использовать построенную компьютерную модель на научно-исследовательском этапе проектирования усилителя яркости. Результаты моделирования должны одновременно повысить эффективность этого этапа и снизить затраты времени и ресурсов на него.

4.2. Цели и задачи

Раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» посвящен определению перспективности научно-исследовательского проекта, которому посвящена эта работа. Целью этого раздела является нахождение приоритетного пути развития проекта, учитывающего его характерные черты и современные реалии.

Оценивать данный проект будем по качественным признакам. Для этого хорошо подходит SWOT-анализ. Он включает в себя описание слабых и сильных сторон проекта (факторов внутренней среды), а также описание

возможностей и угроз для реализации проекта (факторов внешней среды). Задача SWOT-анализа – установить соответствие между факторами внешней и внутренней среды, что позволяет определить, какие факторы внутренней среды позволяет преодолеть трудности в реализации проекта, а также выбрать предпочтительные направления развития проекта на основе полученных результатов анализа.

4.3. Сильные стороны проекта

Для проведения SWOT-анализа перечислим и поясним сильные стороны, присущие данному проекту.

1) Одним из преимуществ компьютерного моделирования является то, что вне зависимости от сложности модели единственными инструментами ее реализации являются компьютер. Поэтому создание и использование такой модели не требует дорогостоящих ресурсов, например, для создания макетов. Затраты на расходные материалы (например, бумага), которые используются при таком виде работы, достаточно малы.

2) Проект по созданию компьютерной модели может быть реализован всего одним человеком. Это связано с тем, что, во-первых, отсутствует необходимость в каком-либо обслуживающем персонале, а во-вторых, объем необходимых исследований и написание программного кода может быть доведено до некоторого законченного состояния одним человеком за сравнительно небольшой срок (несколько месяцев). Более того, даже при максимально возможном разделении труда для данной работы нецелесообразно участие больше, чем трех–четырёх человек.

3) Преимуществом данной модели является малое количество входных данных. Многие существующие модели описывают либо только электрические процессы, либо только плазмохимические. При этом недостающая информация черпается непосредственно из эксперимента. Даже в тех моделях, которые являются результатом совместного теоретического описания как электрических, так и плазмохимических процессов, обычно часть данных о

сопротивлении плазмы, о спонтанном излучении и других параметрах плазмы берутся из дополнительных экспериментов, проводимых непосредственно с объектом моделирования. В данной же модели целенаправленно было максимально уменьшено количество входных данных, что было реализовано благодаря большому количеству теоретических расчетов, которые требовали углубленных знаний в отдельных областях знаний. Все это свидетельствует о большой степени универсальности модели со всеми вытекающими из этого преимуществами.

4) Благодаря фундаментальности законов, использовавшихся для составления математического описания работы усилителя яркости, данной модели свойственна предсказательная функция, то есть в рамках этой модели можно получить принципиально новые результаты. Поэтому с помощью этой модели можно предложить и промоделировать новые технические решения, позволяющие получить новые, улучшенные характеристики усилителя яркости.

4.4. Слабые стороны проекта

Рассмотрим слабые стороны, которые свойственны данному проекту.

1) Разработанная модель на данном этапе ее развития не описывает процесс внешнего нагрева газоразрядной трубы. Наряду с проектированием схемы накачки и выбора газового состава активной среды проектирование системы нагрева активной среды усилителя яркости также является важным шагом при его разработке, однако в рамках данной модели эти процессы не рассматриваются.

2) В основе модели лежит многократно численно решаемая система нелинейных жестких дифференциальных уравнений. Хотя теория численного решения таких систем хорошо развита в настоящее время, программы, реализующие эти алгоритмы, достаточно сложны и требуют хорошей оптимизации, чтобы сократить время вычислений, которое может достигать очень больших значений с повышением их сложности. Однако простым решением является написание программы компьютерной модели в пакетах

прикладных математических программ, библиотеки которых включают мощные вычислительные алгоритмы. Такие математические пакеты позволяют значительно упростить техническую работу по созданию модели, благодаря использованию специализированного языка программирования и программного окружения. Отсюда вытекает существенный недостаток, заключающийся в том, что современные мощные математические пакеты имеют очень высокую стоимость. Поэтому затраты на программное обеспечение могут существенно превысить все остальные, если покупать его специально для данного проекта.

3) При проектировании усилителя яркости могут возникнуть проблемы, которые не учитываются созданной моделью. Такие проблемы могут привести к невозможности технической реализации тех решений, которые казались возможными при математическом описании в рамках разработанной модели. Хотя математические модели и позволяют минимизировать затраты на опытные образцы и получить продукт с улучшенными свойствами, ограниченность любого математического описания может привести к тому, что модель приведет к некорректному техническому решению.

4.5. Возможности для реализации проекта

К возможностям для реализации проекта отнесем следующие пункты:

- 1) Томский политехнический университет имеет общеуниверситетскую лицензию на один из лучших современных пакетов прикладных математических программ «Wolfram Mathematica». Этот математический пакет широко используется для математического моделирования процессов в различных областях знаний. Таким образом, в процессе реализации пакета отпадают затраты на покупку лицензионного пакета математических программ.
- 2) В наше время широкое развитие получили так называемые лазерные мониторы. Они находят свое применение в различных областях деятельности, так как они позволяют осуществлять мониторинг процессов в условиях сильной фоновой засветки (например, для мониторинга объектов при сварке или процессов в плазме). Усилителя яркости с активной средой на парах металлов

являются наиболее перспективными для этих целей. Поэтому вместе с развитием лазерных мониторов получает свое актуальность и развитие данного проекта. Поэтому в данной работе делается упор на исследование именно тех характеристик, которые важны для усилителя яркости как части лазерного монитора.

3) В Томске присутствует хорошая экспериментальная база по исследованию активных сред на парах меди. Помимо уже готовых рабочих образцов проводятся новые исследования с созданием опытных образцов (одним из центров такой деятельности является Институт оптики атмосферы). Эту экспериментальную базу можно использовать для развития проекта, а также пользоваться полученными в результате данной работы результатами для создания опытных образцов и готового продукта в дальнейшем.

4.6. Угрозы для реализации проекта

Угрозами для реализации проекта является следующее:

1) Моделирование активных сред на парах металлов является актуальной задачей, поэтому сейчас существует множество различных моделей. Помимо уже известных работ по этой теме проводятся и новые исследования, результатом которых могут стать новые модели или другие способы расчета и описания работы лазеров и усилителей яркости на парах меди, которые имеют преимущества перед существующими. Соответственно такие работы могут составить конкуренцию данному проекту.

2) Несмотря на все преимущества активных сред на парах меди и других металлов, существует множество других видов активных сред, которые используются в лазерах. Поэтому есть вероятность, что в будущем усилители на парах меди будут вытеснены другими видами. Данный же проект посвящен исключительно моделированию и исследованию усилителей яркости на парах меди. Несмотря на относительную универсальность модели (например, она позволяет также описывать усилители яркости и лазеры на парах меди с модифицированной кинетикой, то есть с добавками в виде, например, водорода

или бромида водорода), она непригодна для описания других типов активных сред (не на парах металлов). Поэтому возможное снижение актуальности таких активных сред повлечет за собой и потерю целесообразности развития данного проекта.

3) Усилители яркости на парах металлов являются довольно дорогими по затратам ресурсов на их создание и имеют маленький КПД. Поэтому довольно сложно найти средства и возможности для их экспериментального исследования и массового коммерческого использования. Так как данные факторы напрямую связаны и с практическим интересом данного проекта, это является его слабой стороной.

4.7. Установление соответствий

Для удобства сгруппируем и пронумеруем факторы внутренней и внешней среды, перечисленные в предыдущих пунктах.

Сильные стороны:

C1) Отсутствие больших денежных затрат на ресурсы

C2) Малое количество человек, необходимых для реализации проекта

C3) Относительная универсальность модели

C4) Возможность предложения новых технических решений на основе моделирования

Слабые стороны:

Сл1) Не решается проблема описания и проектирования системы нагрева газоразрядной трубы

Сл2) Необходимость в дорогом программном обеспечении

Сл3) Возможные сложности практической реализации предлагаемых технических решений

Возможности:

B1) Общеуниверситетская лицензия ТПУ на требуемое программное обеспечение

B2) Перспективность развития лазерных мониторов

В3) Хорошая экспериментальная база в Томске

Угрозы:

У1) Конкуренция со стороны аналогичных проектов

У2) Возможная потеря актуальности активных сред на парах металлов в пользу других видов активных сред

У3) Сложности с практическим применением результатов моделирования

На таблицах 11–14 приведены матрицы соответствий между факторами внутренней и внешней среды. Знак «+» обозначает сильно соответствие, а знак «-» – слабое.

Таблица 11 – Сопоставление сильных сторон и возможностей проекта

		Сильные стороны проекта			
		С1	С2	С3	С4
Возможности проекта	В1	-	-	-	-
	В2	-	-	+	+
	В3	-	-	-	+

Таблица 12 – Сопоставление слабых сторон и возможностей проекта

		Слабые стороны проекта		
		Сл1	Сл2	Сл3
Возможности проекта	В1	-	+	-
	В2	-	-	+
	В3	+	-	+

Таблица 13 – Сопоставление слабых сторон и угроз проекта

	Слабые стороны проекта			
		Сл1	Сл2	Сл3
Угрозы проекта	У1	+	+	+
	У2	-	-	+
	У3	+	-	+

Таблица 14 – Сопоставление сильных сторон и угроз проекта

	Сильные стороны проекта				
		С1	С2	С3	С4
Угрозы проекта	У1	+	+	+	+
	У2	-	-	-	+
	У3	-	-	-	+

В таблице 15 приведем итоговую матрицу SWOT-анализа с указанием факторов внутренней и внешней среды и выявленных соответствий.

Таблица 15 – Итоговая матрица SWOT-анализа

	<p>Сильные стороны: С1) Отсутствие больших денежных затрат на ресурсы С2) Малое количество человек, необходимых для реализации проекта С3) Относительная универсальность модели С4) Возможность предложения новых технических решений на основе моделирования</p>	<p>Слабые стороны: Сл1) Не решается проблема описания и проектирования системы нагрева газоразрядной трубы Сл2) Необходимость в дорогом программном обеспечении Сл3) Возможные сложности практической реализации предлагаемых технических решений</p>
<p>Возможности: В1) Общеуниверситетская лицензия ТПУ на требуемое программное обеспечение В2) Перспективность развития лазерных мониторов В3) Хорошая экспериментальная база в Томске</p>	<p>1) В2С3С4 2) В3С4</p>	<p>1) В1Сл2 2) В2Сл3 3) В3Сл1Сл3</p>
<p>Угрозы: У1) Конкуренция со стороны аналогичных проектов У2) Возможная потеря актуальности активных сред на парах металлов в пользу других видов активных сред У3) Сложности с практическим применением результатов моделирования</p>	<p>1) У1С1С2С3С4 2) У2У3С4</p>	<p>1) У1Сл1Сл2Сл3 2) У2Сл3 3) У3Сл1Сл3</p>

Из проведенного анализа видно, что существуют возможности для преодоления слабых сторон проекта. Также сильные стороны проекта

позволяют преодолеть внешние угрозы для его реализации. Отметим основные выводы, которые должны быть учтены при развитии проекта.

Из матрицы SWOT-анализа видно, что сочетание угроз и слабых сторон проекта может привести к невозможности практического применения результатов работы. Об этом свидетельствуют соответствия У3Сл1Сл3, У2Сл3, У1Сл1Сл2Сл3. Эти трудности могут быть преодолены за счет преимуществ данной модели перед другими проектами, высокой конкурентоспособности (У1С1С2С3С4). Также стоит активно использовать возможности, которые есть в Томске для развития проекта и нахождения путей устранения его недостатков (В3Сл1Сл3).

С точки зрения коммерческого спроса перспективность исследования усилителей яркости заключается в их дальнейшем использовании для создания лазерных мониторов, которые способны осуществлять визуальный контроль технологических процессов в условиях сильной фоновой засветки. Сильные стороны данной работы позволяют двигаться в этом направлении (В2С3С4). Таким образом, хорошим вариантом применения разработанной модели является исследование возможностей получения специфических свойств усилителей яркости, которые важны именно для их использования в лазерных мониторах (к таким свойствам относятся, например, повышенная длительность импульса генерации, высокая частота работы и радиальная однородность коэффициента усиления, так как эти параметры влияют разрешающую способность и качество мониторинга объектов).

Список публикаций студента

1. Evtushenko G.S., Torgaev S.N., Trigub M.V., Shiyanov D.V., Evtushenko T.G., Kulagin A.E. High-speed CuBr brightness amplifier beam profile // *Optics Communications*. – 2017. – V. 383. – p. 148-152.
2. Evtushenko G.S., Fedorov V.F., Shiyanov D.V., Fedorov K.V., Torgaev S.N., Kulagin A.E. Low current discharge in copper vapor laser // *Russian Physics Journal*. – 2016. – V. 58. – № 9. – p. 1278-1283.
3. Evtushenko G.S., Trigub M.V., Torgaev S.N., Musorov I.S., Drobchik V.V., Kulagin A.E. High PRF metal vapor brightness amplifiers: research and applications // *WSEAS Transactions on Systems and Control*. – 2016. – V. 11. – p. 266-273.
4. Федоров В.Ф., Шиянов Д.В., Федоров К.В., Евтушенко Г.С., Торгаев С.Н., Кулагин А.Е. Комбинированный слаботочный разряд в лазере на парах меди // *Журнал технической физики*. – 2016. – Т. 86. – № 9. – с. 113-116.
5. Fedorov V.F., Shiyanov D.V., Fedorov K.V., Evtushenko G.S., Torgaev S.N., Kulagin A.E. Combined weak-current discharge in a copper-vapor laser // *Technical Physics*. – 2016. – V. 61. – № 9. – p. 1395-1398.
6. Евтушенко Г.С., Федоров В.Ф., Шиянов Д.В., Федоров К.В., Торгаев С.Н., Кулагин А.Е. Слаботочный разряд в лазере на парах меди // *Известия вузов. Физика*. – 2015. – Т. 58. – № 9. – с. 65-70.
7. Kulagin A.E., Evtushenko G.S., Torgaev S.N., Evtushenko T.G. Low input energy copper vapor laser // *16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM-2015): proceedings, Novosibirsk, 29 June – 3 July 2015*. – New York: IEEE, 2015. – p. 317-320.
8. Torgaev S.N., Kulagin A.E., Evtushenko G.S.. Simulation of Metal Vapor Lasers at Reduced Energy Input // *Atomic and molecular pulsed lasers : The 12th International Conference, September 14-18, 2015, Tomsk, Russia : Abstracts*. — Tomsk: Publishing House of IAO SB RAS, 2015. — p. 14.

9. Кулагин А.Е., Торгаев С.Н. Математическое моделирование процессов в активной среде CuVr-лазера // Современная техника и технологии: сборник трудов XX международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 т., Томск, 14-18 апреля 2014. – Томск: ТПУ, 2014. – Т. 1. – с. 115-116.
10. Кулагин А.Е., Торгаев С.Н., Евтушенко Г.С. Математическое моделирование процессов в плазме CuVr-лазера // Лазеры на парах металлов (ЛПМ - 2014) : сборник трудов симпозиума, Лоо, 22-26 сентября, 2014 г. – Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2014. – с. 54-55.
11. Кулагин А.Е., Торгаев С.Н. Математическое моделирование процессов в плазме CuVr-лазера // Новые информационные технологии в исследовании сложных структур: материалы Десятой российской конференции с международным участием. – Томск: ТГУ, 2014. – с. 29-30.
12. Торгаев С.Н., Кулагин А.Е. Математическая модель CuVr-лазера // Вестник науки Сибири. – 2014. – № 4(14). – с. 26-31.