

На правах рукописи



Курбангаджиева Марьям Багаудиновна

**КИНЕТИКА ОПТИЧЕСКОГО ПРОПУСКАНИЯ НЕОДНОРОДНОЙ
ПЛАЗМЫ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА С
ПОЛЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ В НЕОНЕ**

1.3.6. Оптика

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата физико-математических наук

Казань –2024

Работа выполнена на кафедре физической электроники ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный университет» и в Институте физики им. Х.И. Амирханова ФГБУН «Дагестанский федеральный исследовательский центр РАН»

Научный руководитель: *Ашурбеков Назир Ашурбекович – д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой физической электроники ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный университет»*

Официальные оппоненты: *Василяк Леонид Михайлович - д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН*

Сорокин Дмитрий Алексеевич - к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, зав. лабораторией оптических излучений ФГБУН Институт сильноточной электроники СО РАН

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»**

Защита диссертации состоится «21» ноября 2024 года в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета КФУ.013.4 ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 16а, ауд. 110.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в Научной библиотеке им. Н.И. Лобачевского ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 35.

Сведения о защите, автореферат и диссертация размещены на официальных сайтах ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (<https://vak.minobrnauki.gov.ru>) и ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» (<http://kpfu.ru>).

Автореферат разослан «___» _____ 2024 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета, доктор
физико-математических наук, профессор

1



Д.И. Камалова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В последние годы активно развиваются новые практические приложения плазмы для разработки оптических технологий. Для управления лазерным светом высокой интенсивности разрабатываются компоненты плазмы, на основе которых создаются плазменные зеркала, плазменные поляризаторы, плазменные оптические модуляторы, плазменные линзы и др. В последние годы на основе исследований в этой области сформировались основы нового научного направления, получившего название «плазменная оптика» [1].

Другое активно развивающееся направление оптических приложений плазмы связано с исследованиями квантово-оптических эффектов взаимодействия коротких полихроматических импульсов лазерного излучения с ансамблем поглощающих свет атомов плазмы, когда ширина спектра лазерного излучения значительно превышает однородную и неоднородную ширину спектральных линий поглощения в плазме [2]. Такие исследования лежат в основе другого быстро развивающегося направления, связанного с разработкой методов сверхбыстрой обработки широкополосных оптических сигналов. В последние годы такие исследования выполняются при взаимодействии коротких лазерных импульсов с парами щелочных металлов [например, 3], однако использование для этих целей в качестве квазирезонансной поглощающей среды импульсной плазмы в инертных газах открывает новые возможности. В такой плазме можно формировать одиночные или периодические плазменные структуры, влияющие на пространственное распределение оптических свойств плазменной среды. Это достигается в результате ионизации газа наносекундными высоковольтными импульсами напряжения, когда вблизи высоковольтного электрода генерируется высокоскоростная волна ионизации (ВВИ), фронт которой выступает в роли источника группы высокоэнергетичных электронов [4-7]. Фундаментальным свойством такой плазмы является формирование на фронте ВВИ анизотропной части функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ), и связанным с этим эффектом анизотропии процессов электронного возбуждения атомов. Макроскопически это явление проявляется в виде частичной линейной поляризации спонтанного излучения плазмы ВВИ.

Еще одной особенностью оптических свойств плазмы ВВИ является формирование в плазменной среде плавно-меняющихся пространственных неоднородностей, обусловленных как процессами генерации и распространением быстрых фронтов ионизации газа, так и процессами нелинейного взаимодействия электронных потоков, генерируемых в разряде, с сильными электрическими полями в разряде [8, 9]. Такие плазменные источники характеризуются наличием в среде одиночных или периодических плазменных структур, генерированных быстрыми волнами ионизации.

В этой связи актуальным является всестороннее исследование оптических свойств протяженных плазменных сред, созданных быстрыми волнами ионизации.

Обширную информацию об оптических свойствах неравновесных плазменных сред можно получить путем использования время-разрешенных методов оптической эмиссионной и лазерной абсорбционной спектроскопии. При использовании в оптических методах диагностики лазеров с короткими наносекундными импульсами излучения процесс распространения импульсов лазерного излучения в квазирезонансной плазме могут проявляться ряд квантово-оптических эффектов, без учета которых корректная диагностика неоднородной плазмы невозможна. К настоящему времени, насколько нам известно, в литературе имеется лишь небольшое число работ, посвященных исследованиям отдельных аспектов оптических эффектов взаимодействия импульсов полихроматического лазерного излучения с неоднородной плазмой, генерируемой быстрыми волнами ионизации. Между тем такие исследования могут быть сопряжены с необходимостью учета принципиально новых эффектов, связанных с когерентными процессами квазирезонансного взаимодействия света с ансамблем поглощающих атомов в протяженном плазменном столбе.

Целью настоящей диссертационной работы является исследование кинетики нестационарных оптических спектров пропускания протяженной плазменной среды в неоне с динамическими неоднородностями, обусловленными генерацией и распространением ВВИ.

Объект исследования – протяженная плазменная среда, создаваемая быстрыми волнами ионизации в наносекундном разряде в неоне в диапазоне давлений газа 0.1-30 Торр.

Задачи, решаемые в данной работе:

- экспериментальное исследование пространственно-временной динамики формирования и релаксации неоднородных динамических пространственных структур из возбужденных атомов неона, формируемых быстрыми фронтами ионизации в цилиндрических экранированных трубках и системах с прямоугольным щелевым катодом;
- экспериментальное исследование оптических спектров пропускания и спектральных характеристик процессов взаимодействия коротких полихроматических импульсов лазерного излучения с протяженными ограниченными стенками плавно-неоднородными плазменными средами в неоне;
- построение кинетической модели формирования динамических пространственных структур возбужденных атомов неона в протяженном плазменном столбе, формируемом быстрыми волнами ионизации.

Научная новизна работы:

1. Впервые в неоне в диапазоне давлений газа 0.1-30 Торр выполнен комплекс экспериментальных исследований динамики формирования продольных и поперечных пространственных неоднородностей протяженной

плазменной среды в экранированных цилиндрических трубках, влияющих на неоднородность оптических показателей такой среды. Синхронизованно с движением фронта волны ионизации на разных стадиях развития цилиндрического плазменного столба экспериментально измерены абсолютные значения плотности возбужденных атомов неона на энергетических уровнях с электронной конфигурацией $NeI\ 2p^53s$.

2. Экспериментально и численным моделированием показано, что при давлениях неона около 10 Торр за фронтом волны ионизации формируется область с пониженной плотностью возбужденных атомов неона с размерами около 2-3 мм, а при давлениях неона выше 20 Торр у внутренних поверхностей прямоугольной полости в протяженном полом катоде формируются две плоские плазменные структуры с одновременным образованием минимума плотности возбужденных атомов неона вдоль центра полости в катоде.

3. Впервые экспериментально исследованы условия формирования асимметрии оптических спектров пропускания неоднородного протяженного плазменного столба в неоне вблизи узких резонансов поглощения. Показано, что при зондировании плазмы короткими полихроматическими импульсами лазерного излучения с фокусирующим сферическим волновым фронтом в спектре пропускания плазмы на одном крыле контура спектрального перехода атомов неона с длиной волны 650 нм наблюдается усиление света с одновременным ослаблением света на другом крыле спектрального контура.

4. Экспериментально установлено, что при увеличении мощности зондирующего разряда многомодового лазера на красителе в оптических спектрах пропускания плазмы наблюдается инвертирование усиления света с длинноволнового крыла на коротковолновое крыло контура спектрального перехода NeI с длиной волны 650 нм, в то время как при зондировании той же плазмы полихроматическим излучением ND:YAG лазера усиление света наблюдается только на длинноволновом крыле спектрального контура. В обоих случаях экспериментально проверено, что спектральная плотность зондирующего лазерного излучения находится ниже порога насыщения для данного спектрального перехода.

5. В оптическом спектре пропускания неоднородного плазменного столба внутри прямоугольной полости протяженного полого катода наблюдается асимметрия относительно резонанса поглощения на спектральном переходе атомов неона с длиной волны 650 нм, в то время как оптический спектр пропускания плазменного столба с низкой степенью неоднородностей между электродами имеет классический симметричный контур.

Положения, выносимые на защиту:

1. При распространении коротких импульсов полихроматического излучения лазера на красителе или ND:YAG лазера в неоднородном протяженном плазменном столбе в неоне вблизи спектрального перехода атомов неона с длиной волны 650 нм наблюдается асимметрия оптического

спектра пропускания с усилением света на одном крыле и одновременным ослаблением света на другом крыле спектрального контура.

2. При увеличении мощности зондирующего излучения многомодового лазера на красителе в оптических спектрах пропускания плазмы наблюдается инвертирование усиления света с длинноволнового крыла на коротковолновое крыло контура для спектрального перехода NeI с длиной волны 650 нм, в то время как при зондировании той же плазмы короткими полихроматическими импульсами ND:YAG лазера усиление света наблюдается только на длинноволновом крыле спектрального контура.

3. При фиксированной мощности зондирующего излучения многомодового лазера на красителе уменьшение давления газа в плазме неона приводит к инвертированию усиления света с коротковолнового крыла на длинноволновое крыло контура для спектрального перехода NeI с длиной волны 650 нм.

4. Максимальная асимметрия оптического спектра пропускания неоднородного протяженного плазменного столба приходится на стадию формирования плазменного столба, когда плотность поглощающих атомов принимает максимальные значения.

5. При давлениях неона около 10 Торр за фронтом волны ионизации в полом катоде формируется область с пониженной плотностью возбужденных атомов неона с размерами около 2-3 мм.

Практическая и научная ценность работы.

Полученные в работе результаты позволяют:

- Регулировать форму импульсов оптического излучения источников света на основе протяженных плазменных сред;
- Регулировать режим оптимального согласования плазменного волновода с коаксиальной передающей линией;
- Способствовать развитию лазерных методов диагностики плавно-неоднородных плазменных сред;
- Способствовать развитию теории когерентного взаимодействия коротких световых импульсов с квазирезонансными плазменными средами.

Обоснованность и достоверность научных результатов работы подтверждается применением нескольких адекватных, независимых методов экспериментального исследования, основанных на прямых измерениях основных характеристик протяженных плазменных сред. Результаты численного моделирования подтверждаются сравнением с соответствующими экспериментальными данными.

Личный вклад автора. Диссертация написана по материалам исследований, выполненных на кафедре физической электроники и НОЦ «Физика плазмы» Дагестанского государственного университета. Основные задачи поставлены научным руководителем Н.А.Ашурбековым.

Все основные результаты, изложенные в данной диссертации, принадлежат автору.

Экспериментальные исследования с высоковольтной техникой выполнены с участием сотрудников НОЦ «Физика плазмы» ДГУ К.О. Иминова, Г.Ш. Шахсинова.

Апробация работы. На разных этапах выполнения работы основные результаты исследований обсуждались на научных семинарах кафедры физической электроники и ежегодных научных сессиях Дагестанского государственного университета, а также были доложены на: The 14th International Conference AMPL – 2019 Pulsed Lasers and Laser applications (Tomsk, 15-20 September 2019). – Tomsk, Russia; XI Всероссийской конференции по физической электронике (ФЭ-2020). – Махачкала; Международной конференции ФизикА.СПб (19–23 октября 2020 г.). Санкт-Петербург, ФТИ им.А.Ф.Иоффе; XV International Conference AMPL – 2021 Pulsed Lasers and Laser applications. – Tomsk, Russia, 2021; The 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE) to be held in October 2–8, 2022. – Tomsk, Russia; XII Всероссийской конференции по физической электронике (ФЭ-2022). – Махачкала (19–22 октября 2022 г.).

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № **20–32–90150** «Экспериментальное исследование нестационарных эффектов взаимодействия коротких импульсов полихроматического лазерного излучения с газоразрядной плазмой в неоне вблизи узких резонансов поглощения», – **конкурс на лучшие проекты фундаментальных научных исследований**, выполняемых молодыми учеными, обучающимися в аспирантуре («Аспиранты»).

Экспериментальные исследования данной работы выполнены с использованием научного оборудования ЦКП «Аналитическая спектроскопия» Дагестанского государственного университета.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка используемой литературы из 65 наименований. Общий объем работы 146 стр., содержит 46 рисунков, 3 таблицы.

Содержание работы

Во введении сформулированы актуальность темы диссертации, цель, основные задачи, новизна выполненных исследований, а также положения, выносимые на защиту; описана структура работы.

В первой главе приведен аналитический обзор литературы, посвященной исследованиям неравновесной импульсных протяженных плазменных сред, создаваемых высоковольтными газовыми разрядами наносекундной длительности. Дается анализ особенностей динамики развития протяженного плазменного столба, связанных с формированием и распространением в газовой среде высокоскоростных волн ионизации (ВВИ). Рассмотрена пространственная структура излучательных характеристик такой плазмы, проанализированы квантово-оптические эффекты

резонансного взаимодействия коротких импульсов лазерного излучения с ансамблем поглощающих свет частиц плазмы.

Во второй главе дано описание методики и техники эксперимента. Приводится описание двух типов газоразрядных систем, в которых формируются протяженные плазменные среды в неоне цилиндрической симметрии и пространственной конфигурации, близкой к прямоугольной. Для получения протяженного плазменного столба цилиндрической симметрии в неоне использована стеклянная трубка длиной 50 см, помещенная по всей длине в металлический экран. На концах разрядной трубки установлены полые электроды цилиндрической формы, изготовленные из алюминия. Внутренний диаметр разрядной трубки имел величину около 0.8 см, диаметр металлического экрана – 3 см.

Плазменная среда длиной 5 см и пространственной конфигурацией, близкой к прямоугольной создавалась наносекундным разрядом с щелевым катодом.

Использование двух типов плазменных сред с цилиндрической симметрией и без таковой позволяло экспериментально оценить вклад линзоподобных эффектов от протяженного плазменного столба при исследовании нестационарных оптических спектров пропускания плазменной среды.

В п. 2.1 дано описание методики исследования процессов формирования и распространения ВВИ и фронтов оптического излучения вдоль цилиндрической трубки. В п. 2.2. дано описание методики экспериментального исследования спектра оптического излучения и динамики наработки возбужденных атомов неона с электронной конфигурацией $NeI\ 2p^53s$. Абсолютные значения плотности возбужденных атомов неона измерены методом лазерной абсорбционной спектроскопии с наносекундным временным разрешением.

В п. 2.3 приведено описание методики визуализации пространственно-временной структуры фронтов оптического излучения путем скоростной покадровой фоторегистрации с экспозицией одного кадра около 5 нс.

Методика исследования нестационарных оптических спектров пропускания на различных стадиях формирования протяженного плазменного столба в неоне описана в п. 2.4.

Все экспериментальные исследования выполнены в частотно-периодическом режиме с частотой повторения разряда и лазерных импульсов 100 Гц. Измерения всех электрических и оптических характеристик проводились в цифровом виде с возможностью накопления сигнала за большое число импульсов и обработки результатов измерений в цифровом виде, что позволяло снизить возможные случайные погрешности экспериментальных измерений.

Третья глава посвящена описанию экспериментальных результатов исследования. В работе экспериментально исследованы основные характеристики протяженного плазменного столба наносекундного разряда в

неоне и основные характеристики и закономерности формирования нестационарных оптических спектров пропускания такой плазмы.

В п. 3.1 приведены результаты экспериментального исследования динамики формирования плазменного столба цилиндрической конфигурации в экранированной трубке и плазменного столба с щелевым катодом прямоугольной формы. Реализованы и исследованы четыре режима формирования длинного цилиндрического плазменного столба при формировании и распространении в экранированной трубке ВВИ положительной и отрицательной полярности, а также при формировании и распространении двух встречных волн ионизации одинаковой и противоположной полярности. Показано, что в зависимости от амплитуды импульсов напряжения и давления газа в исследованных условиях скорости ВВИ составляют величину от 5×10^8 до 10^9 см/с.

В п. 3.2 приведены результаты исследования динамики развития поперечной пространственной структуры фронтов оптического излучения в процессе формирования плазменного столба. На рис. 1 представлены характерные картины пространственной структуры фронта оптического излучения в поперечном сечении трубки при низких (около 1 Торр) (а) и средних давлениях неона (выше 20 Торр) (б).

Экспериментально установлено, что наблюдаются два вида пространственных структур фронта излучения: объемная (рис. 1а) и кольцевая (рис. 1б) с максимумом оптического излучения и плотности возбужденных атомов в тонком цилиндрическом слое вблизи внутренней стенки трубки. Аналогичные измерения были выполнены и в плазменном столбе с прямоугольной щелью внутри полости протяженного катода.

Результаты экспериментального исследования спектральных характеристик и динамики наработки плотности возбужденных атомов неона в энергетических состояниях с электронной конфигурацией $NeI\ 2p^53s$ приведены в пп. 3.3 и 3.4.

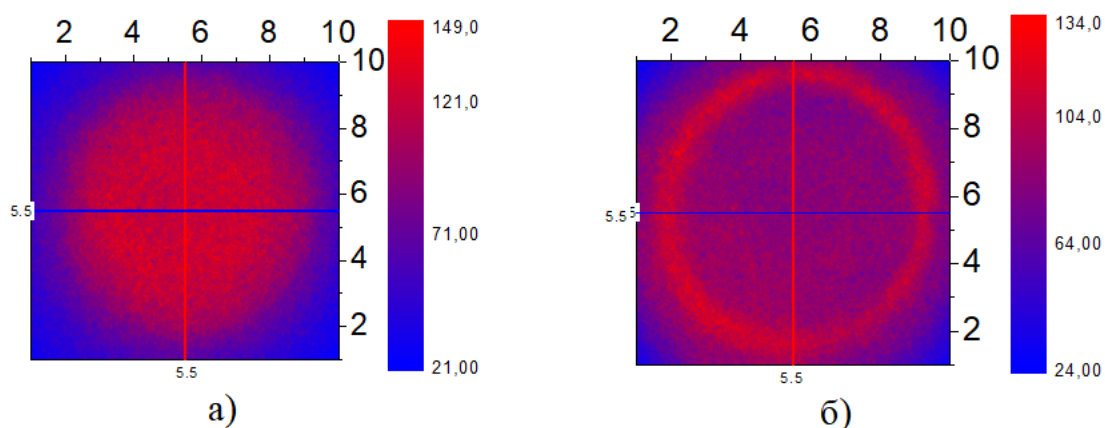


Рис.1. Пространственная структура фронта оптического излучения в поперечном сечении разрядной трубки через 100 нс после старта волны ионизации при давлениях неона 1 Торр (а) и 25 Торр (б). Экспозиция кадра -5 нс. Справа шкала указывает интенсивность излучения в отн.ед.

На рис. 2 приведены характерные зависимости плотности возбужденных атомов неона от времени для двух энергетических уровней в процессе формирования протяженного плазменного столба высокоскоростными волнами ионизации. Эти измерения показали, что на начальных стадиях развития плазменного столба плотность возбужденных атомов на отдельных энергетических уровнях с электронной конфигурацией $NeI\ 2p^53s$ в максимуме растет до величины порядка 10^{12}см^{-3} , а за фронтом волны ионизации монотонно спадает в течение нескольких сотен нс.

Аналогичные измерения были выполнены и для формирования плазменного столба в плазменном столбе с прямоугольной полостью внутри протяженного катода.

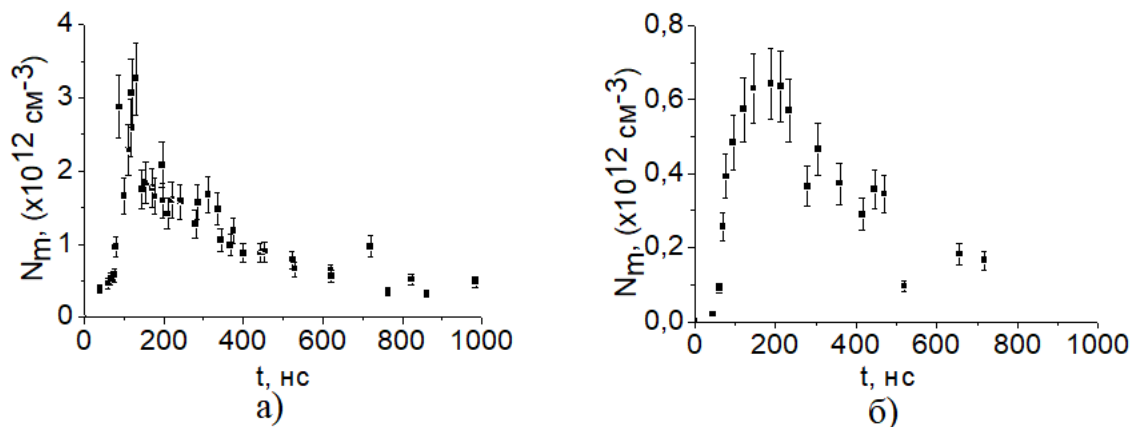


Рис.2. Зависимость от времени плотности возбужденных атомов $2p^53s^3P_1$ (NeI) (а) и $2p^53s^3P_0$ (NeI) (б) вдоль центра трубки при формировании плазмы в неоне двумя встречными волнами ионизации разной полярности (амплитуда импульсов напряжения 14 кВ, давление газа 10 Торр).

Далее в пп. 3.5 и 3.6 приведены результаты экспериментального исследования закономерностей формирования оптических спектров пропускания неоднородного протяженного плазменного столба путем зондирования плазмы наносекундными импульсами полихроматического лазерного излучения. Были исследованы оптические спектры пропускания плазменного столба на различных стадиях формирования ВВИ путем зондирования неоднородного плазменного столба наносекундными лазерными импульсами излучения под различными малыми углами по отношению к оси трубки. При неоднородной поперечной структуре фронта оптического излучения плазменного столба изменение точки входа и выхода лазерного излучения в цилиндрическую трубку приводит к изменению знака градиента плотности поглощающих атомов на пути распространения лазерного излучения.

Для зондирования плазмы были использованы два типа полихроматического лазерного излучения: полихроматическое многочастотное излучение лазера на красителе, и полихроматическое излучение третьей гармоники ND:YAG лазера с параметрическим преобразованием света. Зондирующее излучение обоих типов лазеров имело

фокусирующий сферический волновой фронт с радиусом кривизны около 5 м, при этом диаметр пучка излучения лазера на красителе имел величину около 1 мм, а диаметр пучка ND:YAG лазера – около 2 мм.

Экспериментально были обнаружены и исследованы следующие закономерности формирования оптических спектров пропускания импульсного неоднородного плазменного столба в неоне вблизи резонансной частоты спектральных линий поглощения:

- при зондировании плазменного столба вдоль центра трубки или вдоль границы параллельно оси трубки формируются классические симметричные спектры пропускания вблизи спектральных линий поглощения атомов неона (рис. 3);

- при зондировании плазменного столба импульсами полихроматического излучения лазера на красителе под углом к оси цилиндрического плазменного столба вблизи резонанса спектральной линии поглощения атомов неона с длиной волны 650.65 нм на длинноволновом крыле спектрального контура наблюдается усиление света и формируется асимметричный контур поглощения (рис. 4);

- при увеличении мощности зондирующего лазерного излучения усиление света в оптическом спектре пропускания вблизи спектральной линии поглощения атомов неона с длиной волны 650.65 нм наблюдалось на коротковолновом крыле спектральной линии (рис. 5а), однако для той же мощности лазерного излучения при уменьшении давления неона на два порядка (до примерно 0.1 Торр) происходит инвертирование усиления света на другое крыло спектральной линии (рис. 5б);

- для плазменного столба поперечного разряда с щелевым катодом прямоугольной формы внутри полости катода выполняются те же закономерности в оптических спектрах пропускания плазмы, что и для цилиндрического плазменного столба.

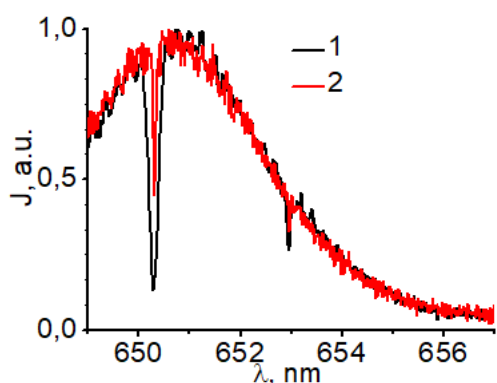


Рис. 3. Профиль оптических спектров пропускания цилиндрического плазменного столба в неоне вблизи двух спектральных линий NeI с длинами волн 650.65 нм и 653.2 нм, измеренные при зондировании плазмы вдоль внутренней стенки (1) и вдоль центра (2) трубки.

Для оценки возможного влияния оптических эффектов, связанных с многочастотной (многомодовой) генерацией лазера на красителе, на спектры пропускания плазменного столба, отдельно был выполнен цикл исследований при зондировании плазменного столба полихроматическим излучением ND:YAG лазера. Для зондирования плазмы была выбрана

минимальная мощность генерации данного лазера; кроме того, плазму зондировали только частью излучения лазера (примерно 4 %), отраженного от плоской стеклянной пластики, установленной под углом к направлению распространения лазерного излучения.

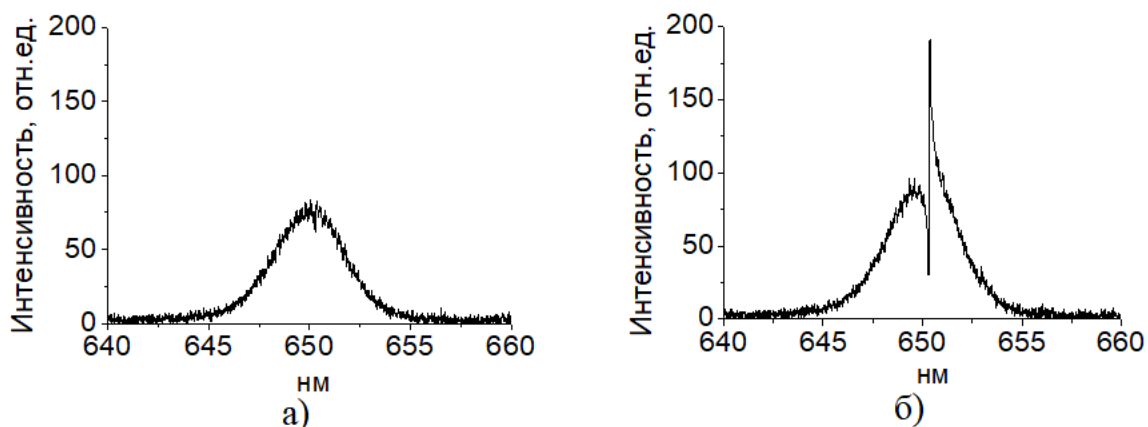


Рис.4. Оптические спектры пропускания плазмы в неоне при давлении газа 20 Торр, амплитуде импульсов напряжения 14 кВ вблизи спектральной линии поглощения 650,6 нм при задержках между фронтом ВВИ и лазерным импульсом 10 нс (а), 70 нс (б). Точка входа лазерного пучка в трубку находится в центре, а выхода – ближе к внутренней поверхности трубки.

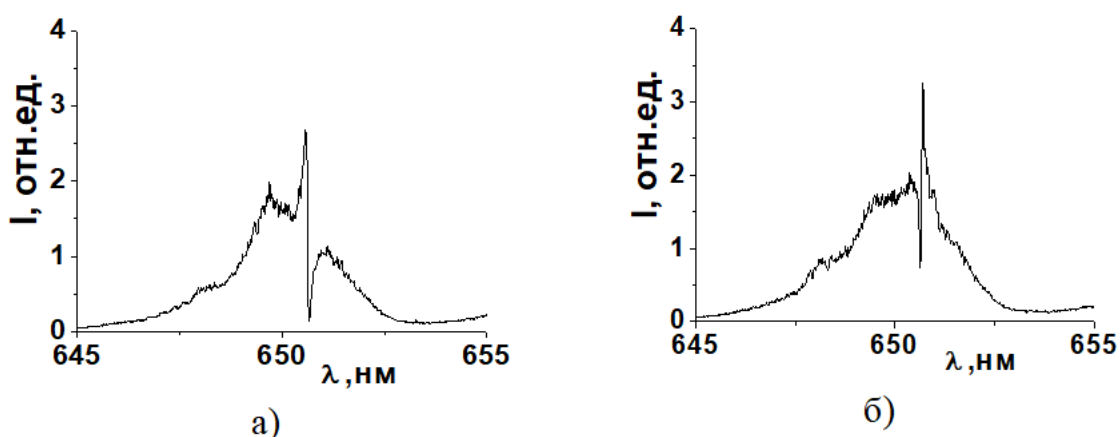


Рис. 5. Оптические спектры пропускания плазмы наносекундного разряда в неоне вблизи спектральной линии 650.6 нм при давлении газа 20 Торр (а) и при давлении газа 0,1 Торр (б). Задержке между импульсами лазера и стартом волны ионизации - около 100 нс, амплитуда импульсов напряжения на электродах разрядной трубки – 14 кВ. Мощность лазера примерно в 10 раз выше, чем в условиях рис.4.

Выполненные таким образом исследования показали, что общие закономерности формирования оптических спектров пропускания плазмы вблизи спектрального перехода атомов неона с длиной волны 650.65 нм оказываются такими же, как и при зондировании плазмы лазером на красителе, однако при зондировании плазмы наносекундными импульсами излучения ND:YAG лазера усиление света наблюдалось только на длинноволновом крыле спектрального контура (рис. 6).

На рис. 6б) представлена спектральная зависимость оптического коэффициента пропускания плазмы вблизи двух спектральных линий атомов неона с длинами волн 650.65 нм и 653.2 нм и примесной спектральной линии водорода H_α .

Таким образом, экспериментально установлены следующие основные закономерности формирования оптических спектров пропускания протяженного неоднородного плазменного столба вблизи спектрального перехода атомов неона с длиной волны 650.65 нм при зондировании плазменного столба полихроматическим лазерным излучением со спектральной шириной, значительно превосходящей однородную и неоднородную ширину спектрального перехода:

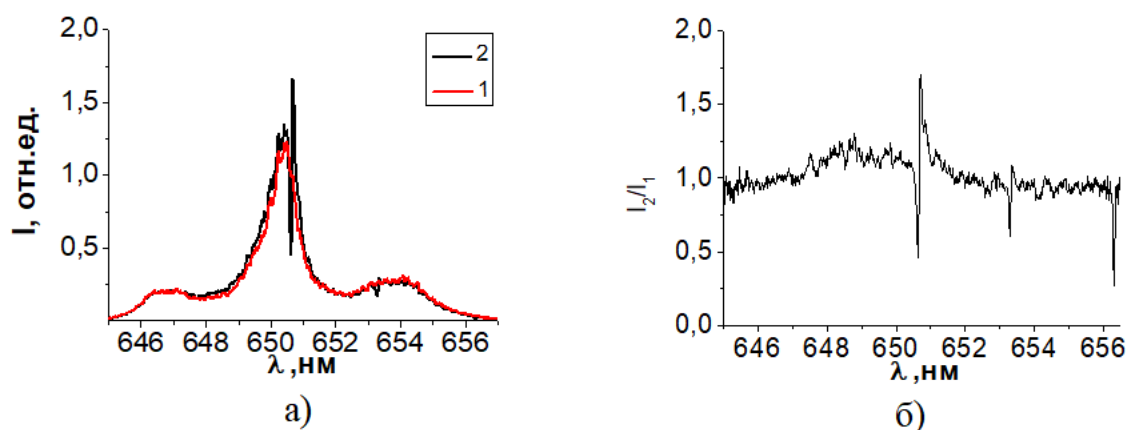


Рис.6. Спектр пропускания (а) и спектральная зависимость оптического коэффициента пропускания (б) плазмы в неоне вблизи спектральных линий NeI с длинами волн 650.65 нм, 653.2 нм и примесной линии H_α (656.28 нм) при давлении неона 25 Торр, амплитуде импульсов напряжения 14 кВ, задержке между импульсом лазера и фронтом ВВИ 60 нс. Кривая 1 соответствует спектру пропускания на выходе разрядной трубки при выключенной плазме, кривая 2 – спектру пропускания при включенной плазме.

1) при зондировании плазменного столба полихроматическим лазерным излучением вдоль центра или параллельно оси симметрии плазменного столба наблюдается классическая симметричная форма спектра пропускания относительно резонансной частоты;

2) при зондировании плавно-неоднородного плазменного столба импульсами полихроматического лазерного излучения с фокусирующим сферическим волновым фронтом наблюдается асимметрия оптического спектра пропускания с усилением света на длинноволновом крыле спектрального перехода. При повышении мощности излучения лазера на красителе наблюдается инвертирование усиления с длинноволнового крыла спектрального контура на коротковолновое крыло;

3) для лазера на красителе при снижении давления газа (плотности атомов в плазме) более чем на два порядка усиление света на одном крыле спектрального перехода сменяется усилением света на другом крыле, в то

время как при зондировании неоднородной плазмы излучением ND:YAG лазера усиление света наблюдается только на длинноволновом крыле спектральной линии неона;

4) максимум эффекта асимметрии оптического спектра пропускания плазменного столба приходится на момент достижения максимума плотности поглощающих атомов;

В четвертой главе представлена кинетическая модель формирования оптических свойств и структуры поперечных неоднородностей плотности возбужденных атомов неона на энергетических уровнях с электронной конфигурацией $2p^53s$ в протяженном плазменном столбе, реализованная в программной среде Comsol Multiphysics, модуль Plasma.

На рисунке 7 представлены результаты численного моделирования основных характеристик плазменного столба для одного фиксированного момента времени, формируемого положительной ВВИ.

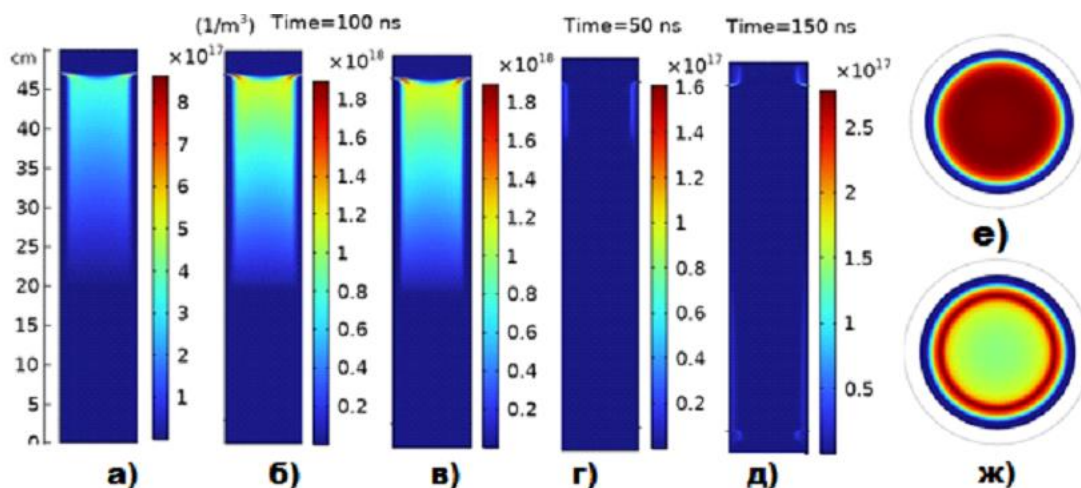


Рис.7. Результаты численного моделирования пространственной структуры параметров плазменного столба для фиксированного момента времени при давлении неона 10 Торр, амплитуде импульсов напряжения 14 кВ. Заземленный электрод расположен на картинках снизу. а) - суммарная плотность возбужденных атомов неона на уровнях с электронной конфигурацией $2p^53s$; б) - плотность ионов неона; в) - плотность электронов; г), д) - плотность пространственного нескомпенсированного заряда в плазменном столбе через 50 и 150 нс; поперечная объемная структура плазменного столба при давлении неона 1 Торр (е) и кольцевая структура при давлении неона 20 Торр (ж).

Результаты расчета показывают, что плазма вдоль трубки формируется в результате перемещения фронта волны ионизации так же, как в эксперименте. Амплитуда фронта волны ионизации затухает по мере распространения вдоль трубки. Перемещение фронта волны ионизации сопровождается формированием на границе диэлектрической стенки нескомпенсированного заряда (рис. 7г), причем такой заряд на диэлектрической стенке формируется раньше, чем на внутренней

поверхности полого электрода (рис. 7д). Поперечная структура фронта возбужденных атомов при давлениях газа 1 Торр (рис. 7е) имеет объемную форму, а при давлениях газа 20 Торр (рис. 7ж) область ионизации преимущественно локализуется вблизи внутренней поверхности трубки. Эти результаты расчета также качественно согласуются с экспериментальными данными (рис. 1).

В п. 4.2 представлены аналогичные результаты численного моделирования основных характеристик плазменного столба, формируемого поперечным разрядом с прямоугольным щелевым катодом. Результаты расчетов показали, что при давлениях неона 20 Торр и выше внутри полости катода вдоль боковых поверхностей формируются два плоских плазменных слоя. Кроме того, расчеты показывают, что фронт большой плотности возбужденных атомов опережает соответствующий фронт большой плотности электронов, а за фронтом волны ионизации формируется провал плотности возбужденных атомов, что также подтверждается результатами экспериментов.

Таким образом, формирование и перемещение фронтов ионизации газа приводит к образованию пространственных упорядоченных структур возбужденных атомов в виде цилиндрических или плоских слоев вдоль границы плазмы с твердой поверхностью, что качественно согласуется с результатами экспериментальных исследований.

В п. 4.3 обсуждается влияние неоднородностей плазменного столба на асимметрию оптических спектров пропускания плазмы. Показано, что с ростом максимальной плотности поглощающих атомов наибольший эффект асимметрии оптических спектров пропускания плазмы соответствует максимальной степени неоднородностей плазмы вдоль направления распространения лазерного излучения.

На рис. 8 представлена динамика изменения величины асимметрии спектра пропускания вблизи спектральной линии с длиной волны 650.65 нм при максимальных и минимальных углах между направлением зондирования плазмы лазерным излучением и осью цилиндрического плазменного столба. С увеличением степени асимметрии одновременно происходит сдвиг длины волны, на которой наблюдается минимум ослабления света на величину примерно 0.014 нм (рис.8а).

Далее, в п. 4.4 рассмотрены возможные механизмы асимметрии оптических спектров пропускания неоднородного плазменного столба вблизи узких резонансов поглощения света. Количественными оценками показано, что в исследуемых условиях выполняются условия когерентного взаимодействия коротких полихроматических световых импульсов с плазмой вблизи спектральных линий поглощения атомов неона. При этом световое поле поляризации среды играет ключевую роль в процессах распространения коротких световых импульсов в квазирезонансной среде. Интерференция светового поля поляризации среды и исходного полихроматического светового поля, зондирующего плазму, может привести к эффектам усиления

света на крыле спектральной линии неона и объяснить асимметрию оптических спектров пропускания неоднородной плазмы.

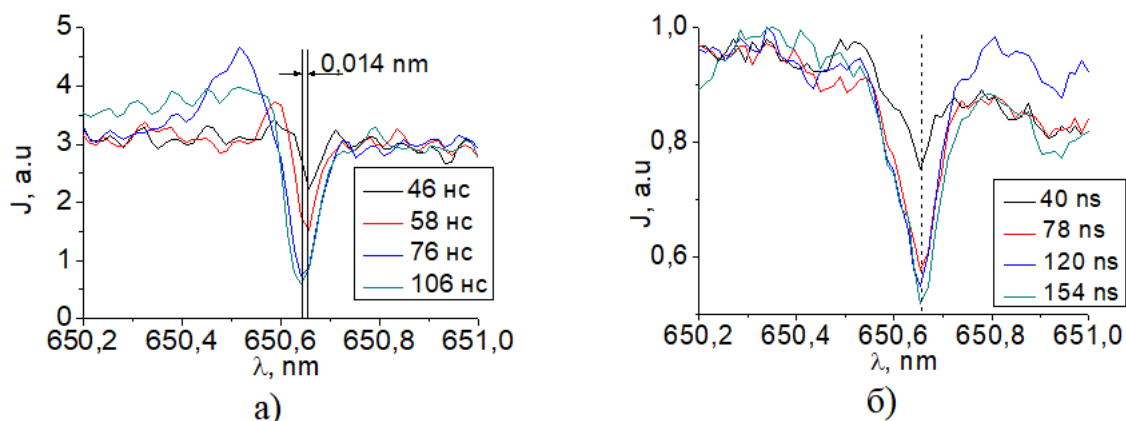


Рис. 8. Динамика изменения оптического спектр пропускания плазменного столба вблизи спектральной линии поглощения NeI с длиной волны 650.6 нм при распространении лазерного излучения под углом к оси разрядной трубки. Временная задержка между зондирующим излучением лазера и разрядом: 1- 46 нс, 2- 58 нс, 3- 76 нс, 4- 106 нс (а) и при минимальных углах, временная задержка между зондирующим излучением лазера и разрядом: 1- 40 нс, 2- 78 нс, 3- 120 нс, 4- 154 нс (б). От кривых 1 к 4 плотность поглощающих атомов растет.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы работы.

Результаты выполненных в данной работе исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. Впервые с наносекундным временным разрешением выполнен комплекс экспериментальных исследований динамики формирования продольных и поперечных пространственных неоднородностей оптических характеристик двух типов протяженных плазменных сред, формируемых быстрыми волнами ионизации. Исследованы особенности формирования пространственной структуры оптического излучения плазменного столба, создаваемого одиночными и встречными быстрыми волнами ионизации газа.
2. В условиях формирования двух встречных быстрых волн ионизации разной полярности синхронизованно с движением фронта ВВИ измерены абсолютные значения плотности возбужденных атомов неона на энергетических уровнях с электронной конфигурацией $NeI\ 2p^53s$. Исследованы особенности формирования спектрального состава оптического излучения плазменного столба, формируемого быстрыми волнами ионизации.
3. Экспериментально и численным исследованием показано, что при давлениях неона около 10 Торр за фронтом поперечной волны ионизации перед щелевым катодом формируется область с пониженной плотностью возбужденных атомов неона с размерами около 2-3 мм, а при давлениях неона выше 20 Торр у внутренних поверхностей прямоугольной полости в

катоде формируются две плоские плазменные структуры с максимумом плотности возбужденных атомов неона.

4. Экспериментально установлено, что при взаимодействии наносекундных импульсов многомодового лазера на красителе или импульсов полихроматического излучения ND:YAG лазера с фокусирующими сферическими волновыми фронтами с протяженным плавно-неоднородным плазменным столбом в неоне наблюдается асимметрия оптического спектра пропускания вблизи спектрального перехода атомов неона с длиной волны 650 нм с усилением света на одном крыле и одновременным ослаблением света на другом крыле контура спектрального перехода.

5. Экспериментально установлено, что при зондировании неоднородного плазменного столба в неоне импульсами многомодового излучения лазера на красителе в оптическом спектре пропускания плазмы наблюдается инвертирование усиления света с длинноволнового крыла на коротковолновое крыло контура спектрального перехода *NeI* с длиной волны 650 нм как при увеличении мощности лазерного излучения, так и при уменьшении давления газа в более, чем сто раз при фиксированной мощности лазерного излучения, в то время как с полихроматическим ND:YAG лазером усиление света в спектре пропускания плазмы наблюдается только на длинноволновом крыле спектрального контура. В обоих случаях экспериментально проверено, что спектральная плотность зондирующего лазерного излучения находится ниже порога насыщения для данного спектрального перехода.

6. В оптическом спектре пропускания неоднородного плазменного столба внутри прямоугольной полости протяженного полого катода наблюдается асимметрия относительно резонанса поглощения на спектральном переходе атомов неона с длиной волны 650 нм, в то время как оптический спектр пропускания плазменного столба с низкой степенью неоднородностей между электродами имеет классический симметричный контур.

7. Построена самосогласованная численная кинетическая модель исследования процессов формирования динамических неоднородных плазменных структур в неоне в ограниченных газоразрядных системах с полыми электродами в интегрированной программной среде Comsol Multiphysics и LisbOn KInetics Boltzmann для решения кинетического уравнения Больцмана в двухчленном приближении при слабой анизотропии функции распределения электронов по энергиям.

Основные результаты работы опубликованы в следующих работах:

1) Статьи в рецензируемых изданиях:

1. Ashurbekov, N.A. Quantum-optical effects of resonant short laser pulse interaction with neon nanosecond discharge plasma in narrow shielded tubes / N.A. Ashurbekov, K.O. Iminov, **M.B. Kurbangadzhieva** and G.Sh. Shakhshinov // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical

Engineering. XIV International Conference on Pulsed Lasers and Laser Applications. - 2019. – Vol. 11322. - 113220H-1.

2. Ashurbekov, N.A. Formation of asymmetric optical transmission spectra of a nanosecond discharge in extended shielded tubes upon resonant interaction of short laser pulses with excited neon atoms / N.A. Ashurbekov, K.O. Iminov, G.Sh. Shakhshinov, **M.B. Kurbangadzhieva**, K.M. Rabadanov // Proceedings SPIE. – The International Society for Optical Engineering. XIV International Conference on Atomic and Molecular Pulsed Lasers. – 2021. – Vol. 12086. – 1208617-1.
3. Ashurbekov, N.A. Numerical simulation of a partially anisotropic electron distribution function in a pulsed discharge with a hollow cathode / N.A. Ashurbekov, M.Z. Zakaryaeva, K.M. Rabadanov, K.O. Iminov, **M.B. Kurbangadzhieva**, and A.A. Kudryavtsev // Phys. Plasmas. – 2022. – Т. 29, No 12. – 123905.
4. Ашурбеков, Н.А. Асимметрия оптических спектров пропускания импульсного разряда с протяженным полым катодом при резонансном взаимодействии коротких полихроматических лазерных импульсов с возбужденными атомами неона / Н.А. Ашурбеков, **М.Б. Курбангаджиева**, К.О. Иминов, Г.Ш. Шахсинов, К.М. Рабаданов // Журнал прикладной спектроскопии. – 2022. – Т. 89 . №. 6. – С. 815–819.
Ashurbekov, N.A. Asymmetry of the optical transmission spectra of a pulsed discharge with an extended hollow cathode during at resonance interaction of short polychromatic laser pulses with excited neon atoms / N.A. Ashurbekov, **M.B. Kurbangadzhieva**, K.O. Iminov, G.Sh. Shakhshinov and K.M. Rabadanov // Journal of Applied Spectroscopy. – 2022. – Т. 89. №.6. – pp. 1072–1075.
5. Ashurbekov, N.A. Simulation of the spatio-temporal evolution of the electron energy distribution function in a pulsed hollow-cathode discharge / N.A. Ashurbekov, K.O. Iminov, K.M. Rabadanov, G.Sh. Shakhshinov, M.Z. Zakaryaeva and **M.B. Kurbangadzhieva** // Plasma Science and Technology. – 2023. – Vol. 25, No 3. – 035405.
6. Курбангаджиева, М.Б. Кинетическая модель формирования поперечной пространственной структуры наносекундного разряда в длинных экранированных трубках с полыми электродами / **М.Б. Курбангаджиева**, Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, Г.Ш. Шахсинов, К.М. Рабаданов // Вестник Дагестанского государственного университета. Сер. 1: Естественные науки. – 2023. – Т. 38, №. 2. – С. 14–20.

2) Материалы научных конференций:

1. Ashurbekov, N.A. Quantum optical effects of resonant interaction of short laser pulses with a nanosecond discharge plasma in neon in narrow shielded tubes / N.A. Ashurbekov, K.O. Iminov, **M.B. Kurbangadzhieva** and G.Sh.

Shakhsinov // The 14th International Conference AMPL – 2019 Pulsed Lasers and Laser applications. Tomsk, Russia. – 2019. – P. 123.

2. Ашурбеков Н.А. Нестационарные оптические спектры пропускания неоднородной плазмы наносекундного электрического разряда с щелевым катодом в неоне вблизи узких резонансов поглощения / Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, Г.Ш. Шахсинов, **М.Б. Курбангаджиева**, М.З. Закарьяева // Физика.СПб: тезисы докладов международной конференции 19–23 октября 2020 г. — СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС (ФТИ им.А.Ф.Иоффе). – 2020. – С.259-260.
3. Ashurbekov, N.A. Formation of asymmetric optical transmission spectra of a nanosecond discharge in long shielded discharge tubes at resonance interaction of short laser pulses with excited neon atoms / N.A. Ashurbekov, K.O. Iminov, G.Sh. Shakhsinov, **M.B. Kurbangadzhieva** and K.M. Rabadanov // Abstract of XV International Conference AMPL – 2021 Pulsed Lasers and Laser applications. – Tomsk, Russia. – 2021. – P. 109.
4. Ashurbekov, N.A. The influence of the type of the electron distribution function on the properties of a nanosecond discharge in extended shielded tubes with cylindrical hollow electrodes / N.A. Ashurbekov, K.O. Iminov, G.Sh. Shakhsinov, **M.B. Kurbangadzhieva** and K.M. Rabadanov // 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE). – Tomsk, Russia. – 2022. – P. 140.
5. Ашурбеков, Н.А. Нестационарные оптические спектры пропускания наносекундных разрядов в режиме формирования высокоскоростных волн ионизации в газоразрядной плазме неона вблизи узких резонансов поглощения / Н.А. Ашурбеков, **М.Б. Курбангаджиева**, Г.Ш. Шахсинов // XI Всероссийская конференция по физической электронике. – Махачкала. – 2020. – С. 143.
6. Ашурбеков, Н.А. Кинетическая модель формирования пространственных плазменных структур в наносекундном разряде с полыми электродами в неоне / Н.А. Ашурбеков, **М.Б. Курбангаджиева**, К.М. Рабаданов // Физическая электроника: Материалы XII Всероссийской конференции по физической электронике ФЭ-2022 (19–22 октября 2022 г.). – Махачкала: Издательство ДГУ. – 2022. – С. 125.

3) РИД:

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022613853 «Программа численного моделирования протяженного плазменного реактора с цилиндрическим полым катодом». Заявка № **2022611819 от 10 февраля 2022 г.** Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ **15 марта 2022 г.**

Цитируемая литература

1. Michel, P. Plasma photonics: Manipulating light using plasmas / P. Michel // Technical Report. No. 818220, Lawrence Livermore National Laboratory. – 2021. – 818220.

2. Bagayev, S.N. Resonant nonstationary amplification of polychromatic laser pulses and conical emission in an optically dense ensemble of neon metastable atoms / S.N. Bagayev, V.S. Egorov, I.B. Mekhov et al. // *Physical Review A: Atomic, Molecular, and Optical Physics*. – 2003. – Vol. 68, No 4. – 043812.
3. Багаев, С.Н. Одновременная генерация N когерентных импульсов с различной площадью при самодифракции в парах ^{87}Rb / С.Н. Багаев, И.Б. Мехов, И.А. Чехонин, М.А. Чехонин // *Оптический журнал*. – 2023. – Т. 90, № 5. – С. 41–49.
4. Korolev, Y.D. Low-pressure discharges with hollow cathode and hollow anode and their applications / Y.D. Korolev, N.N. Koval / *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2018. – Vol. 51, № 31. – 323001.
5. Tarasenko, V. F. Runaway electrons in diffuse gas discharges / V.F. Tarasenko // *Plasma Sources Science and Technology*. – 2020. – V. 29. №3. – 034001.
6. Василяк, Л.М. Высокоскоростные волны ионизации при электрическом пробое / Л.М. Василяк, С.В. Костюченко, Н.Н. Кудрявцев, И.В. Филюгин // *УФН*. – 1994. – Т.164. №3. – С. 263-285.
7. Ионих, Ю.З. Электрический пробой в длинных разрядных трубках при пониженном давлении (обзор) // *Физика плазмы*. – 2020. – Т. 46, № 10. – С. 928-960.
8. Ашурбеков, Н.А. Кинетика возбужденных атомов и оптическое излучение при волновом механизме пробоя инертных газов (обзор) / Н.А. Ашурбеков, В.С. Курбанисмаилов, О.А. Омаров, Н.О. Омарова // *ТВТ*. – 2000. – Т.38. №5. – С.823-839.
9. Ашурбеков, Н.А. Оптимизация параметров пеннинговского плазменного лазера на смеси неон-водород продольным наносекундным разрядом / Н.А. Ашурбеков, В.Б. Борисов, В.С. Егоров, В.Р. Кардашов // *Оптика и спектроскопия*. – 1995. – Т. 78, № 6. – С. 999–1003.