

На правах рукописи

УДК 533.9: 537.525

ЛАХИНА МАРИНА АЛЕКСАНДРОВНА

**ДИНАМИКА ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПЛАЗМЕННЫХ  
ВОЛНОВОДАХ С УЧАСТИЕМ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ВОЛН  
ИОНИЗАЦИИ**

Специальность: 01.04.04. – физическая электроника

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Махачкала - 2006

Работа выполнена на кафедре физической электроники физического факультета Дагестанского государственного университета.

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук,  
профессор Ашурбеков Н.А.

**Научный консультант:** кандидат физико-математических наук,  
доцент Омарова Н.О.

**Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук,  
профессор Амиров Р.Х. (ОИВТ РАН)

доктор физико-математических наук,  
профессор Мусаев Г.М. (ДГУ)

**Ведущая организация:** Институт физики ДНЦ РАН

Защита состоится “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2006 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании специализированного совета по защите диссертаций Д212.053.02. при Дагестанском государственном университете по адресу: 367001, г. Махачкала, ул. М.Гаджиева 43<sup>а</sup>.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ДГУ.

Автореферат разослан “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2006 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Курбанисмаилов В.С.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы диссертации

В последние годы в научной литературе широко обсуждаются свойства неравновесной плазмы, получаемой с помощью наносекундных высоковольтных импульсов напряжения. Интерес к такому способу создания низкотемпературной плазмы связан, прежде всего, с возможностью генерации электронных потоков (пучков) в самом газе в процессе электрического пробоя, что позволяет создать плазму пучкового типа [1,2]. Такие системы находят широкое применение в различных плазменных реакторах для накачки газовых лазеров, в источниках излучения, скоростных коммутаторах и в других устройствах сильноточной электроники. Наибольший интерес представляют длинные наносекундные газовые разряды в условиях формирования высокоскоростных волн ионизации (ВВИ). Из-за высоких значений электрического поля фронт ВВИ служит источником высокоэнергетичных электронов, поэтому, такой разряд обладает свойствами, близкими к пучковым разрядам.

В работах ряда зарубежных авторов и Э.И.Асиновского с сотрудниками, Л.М.Василяка, А.Н.Лагарькова, И.М.Руткевича, О.А.Синкевича, С.М.Стариковской исследована динамика наносекундных разрядов в длинных трубках и длинных разрядах, развивающихся в виде ионизирующих волн градиента потенциала [например,3-5].

Пространственно-временная диагностика таких разрядов с наносекундным временным разрешением является весьма сложной задачей, поэтому в большинстве работ регистрировались в основном электрические параметры разряда и оптическое свечение. В последние годы открылась возможность диагностики параметров высокоэнергетичных электронов, генерируемых в таких разрядах, с использованием спектроскопических методов. В основе этих методов лежит явление поляризации атомных состояний при их возбуждении электронными пучками. К настоящему времени достаточно хорошо изучены основные параметры ВВИ в таких разрядах. Выявлены основные закономерности, которым подчиняются скорости волн ионизации, разобраны механизмы и времена их формирования, установлено, зарегистрировано рентгеновское излучение на фронте ВВИ.

Несмотря на значительное число исследований электрических характеристик таких разрядов, в литературе практически отсутствуют работы по изучению процессов формирования, распространения и взаимодействия нескольких ВВИ в плазменных волноводах. Между тем при разработке приложений, например, эффективных активных сред газовых лазеров, источников излучения и наносекундных коммутаторов весьма важными являются механизмы релаксации энергии быстрых

электронов и выявление основных факторов, влияющих на релаксацию заселенностей возбужденных состояний атомов в условиях формирования и распространения нескольких ВВИ. Форма и длительность импульсов излучения в таких системах также определяется механизмами формирования и взаимодействия ВВИ.

Наличие в функции распределения электронов по энергиям анизотропной части, связанной с пучковой составляющей, может привести к поляризации атомных состояний и наведению когерентности в процессах электронного возбуждения атомов. Теоретические исследования в подобных условиях затруднительны как из-за нестационарности и неравновесности плазмы, так и из-за большого числа учитываемых элементарных процессов. Поэтому первоочередной задачей становятся экспериментальные исследования основных параметров разряда в условиях волнового пробоя.

**Настоящая диссертация посвящена** изучению физических процессов формирования, распространения и взаимодействия нескольких, в том числе встречных ВВИ в коаксиальных плазменных волноводах, заполненных инертными газами при средних давлениях.

#### **Цель диссертационной работы:**

- Разработка газоразрядной системы генерации встречных ВВИ; развитие методов комплексной диагностики плазмы наносекундных разрядов, развивающихся в режиме формирования и распространения встречных высокоскоростных волн ионизации;
- Исследование динамики релаксационных процессов в плазменных волноводах в режиме формирования встречных высокоскоростных волн ионизации;
- Исследование кинетики процессов релаксации плазмы наносекундного разряда, развивающегося в режиме генерации, распространения и взаимодействия встречных высокоскоростных волн ионизации.

**Объектами исследования явились** наносекундные электрические разряды в цилиндрических плазменных волноводах в диапазоне давлений газа 1-100 Тор и амплитудах высоковольтных импульсов напряжения до 40 кВ.

В соответствии с целями данной работы были использованы следующие **экспериментальные методы:**

1. Для исследования электродинамических параметров высокоскоростных одиночных и встречных волн ионизации был использован метод емкостных зондов;

2. Концентрация свободных электронов оценивалась по проводимости на основе вольт-амперных характеристик, а также по затуханию ВВИ;
3. Концентрации возбужденных, в том числе метастабильных атомов, измерялись методами реабсорбции оптического излучения и лучеиспускания;
4. Динамика релаксационных процессов исследовалась методами численного моделирования.

**На защиту выносятся:**

1. Разработанная система формирования встречных высокоскоростных волн ионизации в плазменных волноводах, заполненных инертными газами;
2. Закономерности формирования, распространения и взаимодействия встречных высокоскоростных волн ионизации в плазменных волноводах, заполненных инертными газами при средних давлениях;
3. Амплитудные профили, временные характеристики и релаксационные параметры спонтанного излучения в плазменных волноводах в условиях формирования, распространения и взаимодействия встречных ВВИ;
4. Механизмы формирования многоимпульсного режима оптического излучения и характерные времена релаксации в области взаимодействия встречных высокоскоростных волн ионизации; численная модель релаксационных процессов в плазменных волноводах в условиях формирования встречных ВВИ.

**Научная новизна:** В работе впервые:

- разработана система формирования встречных высокоскоростных волн ионизации в коаксиальных плазменных волноводах, заполненных инертными газами; создана автоматизированная система регистрации нестационарных оптических и электрических процессов в режиме реального времени;
- развита методика комплексного исследования наносекундных разрядов развивающихся в режиме формирования двух встречных высокоскоростных волн ионизации, включающая в себя методы емкостных зондов, осциллографирования, оптической и поляризационной спектроскопии;
- экспериментально исследованы закономерности формирования, распространения и взаимодействия уединенных волн ионизации в плазменных волноводах. Обнаружены эффекты гашения и усиления волн ионизации при взаимодействии встречных ВВИ;
- экспериментально исследована динамика формирования оптического излучения в плазменном волноводе в режиме формирования

встречных ВВИ. Установлено, что форма импульсов оптического излучения, их интенсивность и длительность зависят от полярности электрического поля во встречных волнах ионизации.

- Построена численная модель релаксационных процессов в коаксиальных плазменных волноводах в условиях распространения встречных ВВИ.

**Практическая ценность:** Полученные в работе сведения о динамике и механизмах формирования оптического излучения наносекундного разряда, развивающегося в режиме формирования встречных волн ионизации можно использовать при разработке как ионизационных, так и рекомбинационных газовых лазеров, в которых используются плазменно-пучковые разряды, а также других газоразрядных технических устройств.

Развитую в работе методику комплексного исследования наносекундных разрядов в режиме формирования встречных уединенных волн ионизации можно использовать для диагностики мощных продольных наносекундных разрядов в широком диапазоне изменения условий в последних.

**Апробация работы:** Основные результаты работы докладывались на семинарах в ведущих Университетах и Институтах РАН, таких как, ИВТАН, МГУ, ДГУ, а также на конференциях и симпозиумах: на II и III Всероссийских конференциях «Физическая электроника» (Махачкала 2001, 2003), на Всероссийской конференции ВНКСФ-6 (Екатеринбург, 2000), на Международной конференции «Фазовые переходы и нелинейные явления» (Махачкала, 2002), на II Международном конгрессе студентов, молодых ученых и специалистов «Молодежь и наука – третье тысячелетие» (Москва, 2002), на конференции по физике низкотемпературной плазмы (Киев, 2003).

**Структура и объем диссертации:** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем диссертации - 146 страниц, включая таблиц - 3, рисунков - 27. Библиография содержит 176 наименований.

**Публикации:** По теме диссертации опубликовано 10 работ. Список основных публикаций приводится в конце автореферата.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, дано краткое описание данной работы.

**Первая глава** посвящена обзору экспериментальных и теоретических исследований импульсно-периодических высоковольтных разрядов. В §1.1 кратко описаны отличительные особенности импульсно-периодических разрядов, развивающихся в режиме формирования и распространения высокоскоростных волн ионизации. Описаны технологические проблемы, возникающие при исследовании свойств таких разрядов. В § 1.2 рассмотрены основные экспериментальные методы исследования наносекундных импульсно-периодических разрядов, развивающихся в режиме распространения ВВИ. В частности, описаны спектроскопические методы исследования оптических свойств наносекундных разрядов, даны области их применимости. В § 1.3 приведены теоретические методы исследования ВВИ и рассмотрены основные теоретические модели их описания.

**Во второй главе** дается описание комплексных методов исследования плазмы наносекундных разрядов, развивающихся в режиме распространения встречных высокоскоростных волн ионизации. Подробно описывается экспериментальная установка, отличительной особенностью которой является возможность генерации встречных высокоскоростных волн ионизации с использованием специального генератора наносекундных импульсов напряжения (ГИН). Генератор высоковольтных импульсов напряжения собран по трансформаторной схеме в коаксиальном исполнении, и генерировал два синхронизованных высоковольтных наносекундных импульса напряжения с амплитудой до 40 кВ. В качестве коммутирующего устройства ГИН использовался керамический тиратрон с водородным наполнением. Формированные таким образом высоковольтные импульсы напряжения одновременно подавались на разные концы плазменного волновода, представляющего из себя разрядную трубку диаметром 8 мм, окруженную металлическим экраном диаметром около 2 см. Электроды были изготовлены в виде полых цилиндров, и позволяли регистрировать оптическое излучения, распространяющееся вдоль плазменного волновода. В такой системе могут одновременно формироваться две ВВИ, схематический вид которых приведен на рис 1.

Для регистрации параметров ВВИ вдоль разрядной трубки (1) размещались несколько емкостных датчиков (5), установленных на определенных расстояниях друг от друга. В качестве регистрирующих приборов использовались двухканальный аналого-цифровой преобразователь (АЦП), подключенный к персональному компьютеру и осциллограф типа Tektronix TDS3032B. Такая система регистрации позволяла проводить измерения в автоматизированном режиме с возможностью записи, накопления и обработки данных на электронных носителях.

Скорость распространения ВВИ определялась путем регистрации сигналов с емкостных датчиков, установленных вдоль плазменного волновода.

Пространственно-временная динамика релаксационных процессов исследовалась по изучению амплитудных профилей отдельных спектральных линий плазмы, регистрируемых как вдоль, так и поперек плазменного волновода. Оптическое излучение поперек трубки исследовалась с помощью оптических датчиков (4), установленных поперек трубки на определенном расстоянии (10 см) друг от друга.

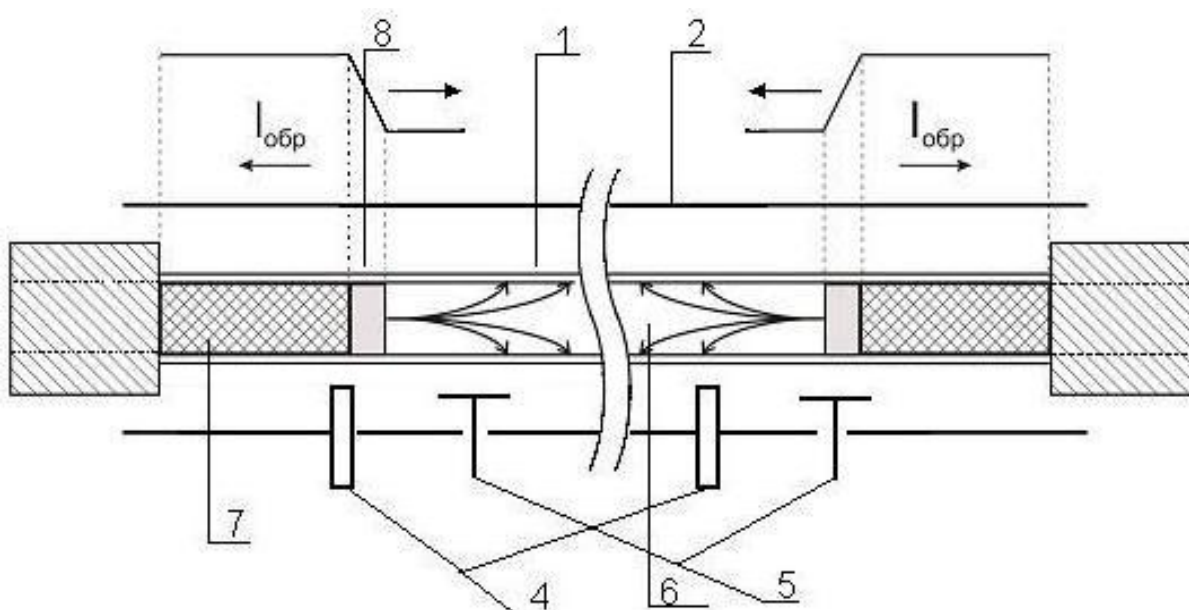


Рис.1 Схема движения ВВИ вдоль разрядной трубки.

1 – разрядная трубка, 2- металлический экран, 3 – высоковольтные электроды, 4 – оптические датчики, 5- емкостные датчики, 6 – силовые линии электрического поля, 7 - столб плазмы, 8 – фронт ВВИ.

Для выделения спектральных линий использован спектрограф типа ДФС-452 с дифракционной решеткой 1200 штр/мм с специально установленной на его выходе щелью с микрометрическим винтом. Световой поток на выходе спектрографа регистрировался с помощью фотоэлектрического умножителя (ФЭУ). В различных областях спектра были использованы ФЭУ типа ФЭУ-98, ФЭУ-87, ФЭУ-115М.

В § 2.3 дан анализ погрешностей, возникающих при экспериментальных исследованиях основных параметров ВВИ.

**Третья глава** посвящена описанию результатов экспериментального исследования наносекундных разрядов, формирующихся в плазменном волноводе встречными высокоскоростными волнами ионизации.



Было реализованы несколько различных режимов электрического пробоя газа в плазменных волноводах высокоскоростными волнами ионизации:

- формирование разряда встречными волнами ионизации одинаковой полярности напряжения;
- формирование разряда встречными волнами ионизации разной полярности;
- формирование разряда одной волной ионизации положительной или отрицательной полярности, когда второй конец плазменного волновода отвязан;
- формирование разряда одной волной ионизации положительной или отрицательной полярности, когда второй конец плазменного волновода закорочен;

В §3.1 приведены результаты экспериментального исследования электрических и электрокинетических характеристик исследуемого разряда в указанных выше режимах формирования ВВИ.

Исследования показали, что скорость распространения ВВИ меняется в пределах ( $2 \cdot 10^8 - 2 \cdot 10^9$ ) см/с в зависимости от давления газа и амплитуды импульсов напряжения. Зависимость скорости ВВИ от давления газа имеет максимум в области давлений газа (12-15) Тор. При фиксированных давлениях газа с увеличением амплитуды напряжения скорость ВВИ растет по линейному закону в исследованном диапазоне амплитуд напряжений.

Систематизация и анализ экспериментальных результатов по электрическим и электрокинетическим характеристикам позволяет сделать следующие выводы:

- При формировании и распространении двух встречных ВВИ одинаковой полярности в центре волновода в области их взаимодействия наблюдается эффект усиления электрического потенциала;

- При формировании и распространении двух встречных ВВИ разной полярности в центре волновода в области их взаимодействия наоборот наблюдается гашение электрического потенциала. Подобный эффект наблюдается при всех исследованных начальных условиях;

- Плотность электронов плазмы с ростом амплитуды импульсов напряжения растет по линейному закону. При фиксированных амплитудах импульсов напряжения зависимость плотности электронов от давления газа проходит через локальный максимум в области давлений газа, где скорость ВВИ максимальна (рис.2).

Результаты экспериментального исследования динамики оптического излучения разряда в области взаимодействия двух уединенных волн ионизации представлены в § 3.2. В работе исследовался временной ход спектральной и интегральной интенсивностей оптического излучения

разряда как вдоль, так и поперек волновода на различных расстояниях от электродов.

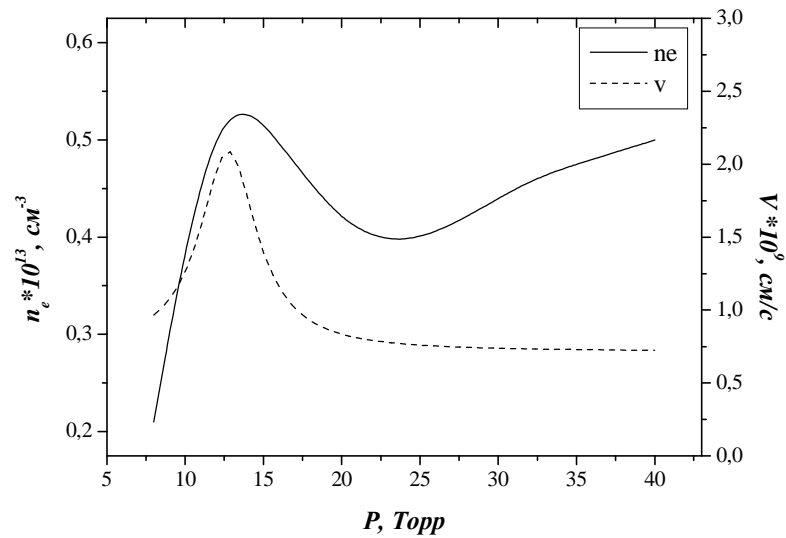
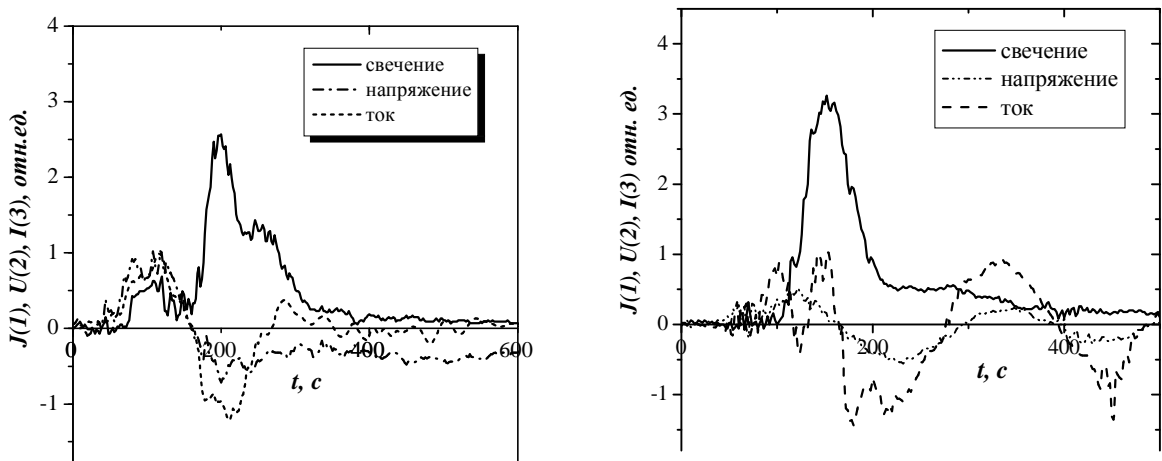


Рис.2. Зависимость концентрации электронов за фронтом волны ионизации и скорости ВВИ положительной полярности от давления газа при амплитуде импульсов напряжения 28 кВ.

Основные исследования были выполнены для спектральных линий  $HeI$  с длинами волн 492.1 нм, 501.5 нм, 388.8 нм, 447.1 нм, 471.3 нм.



а)

б)

Рис. 3. Характерные осциллограммы ВВИ, тока и интенсивности излучения поперек трубки с центрального датчика при формировании двух встречных ВВИ одинаковой (а) и разной (б) полярности напряжений. Давление газа 20 Торр, амплитуда напряжения – 28 кВ.

Систематизация экспериментальных результатов исследования динамики оптического излучения позволяет установить следующие закономерности:

- Форма импульса, интенсивность и длительность оптического излучения существенно зависят от режима формирования и распространения ВВИ в плазменном волноводе. При формировании, распространении и взаимодействии двух встречных ВВИ одинаковой полярности импульс оптического излучения имеет несколько максимумов в зависимости от давления газа и амплитуды импульсов напряжения. При формировании в плазменном волноводе двух встречных ВВИ разной полярности, импульс оптического излучения имеет один максимум с двумя существенно отличающимися характерными временами релаксации. Характерные осциллограммы оптического излучения, соответствующие указанным режимам приведены на рис.3.
- Форма импульса оптического излучения, его амплитудные и временные характеристики существенно зависят от начальных условий в разрядной трубке (от давления и амплитуды импульсов).
- Длительность фронта импульса оптического излучения при формировании и распространении встречных волн ионизации больше, чем при распространении одиночной прямой волны ионизации.
- При распространении встречных волн ионизации форма оптического излучения вдоль разрядной трубки качественно отличается от формы оптического излучения поперек плазменного волновода.

Выполнены детальные исследования зависимости интенсивности и временных параметров оптического излучения от давления газа и амплитуды напряжения. В частности, установлено, что максимум интенсивности излучения при формировании двух встречных ВВИ разной полярности достигается при более высоких давлениях газа, чем в режиме формирования и распространения одной ВВИ.

**Четвертая глава** посвящена анализу механизмов формирования оптических и электрокинетических свойств плазмы на фронте, за фронтом и в области взаимодействия ВВИ. В §4.1 проанализированы релаксационные процессы, происходящие в наносекундном разряде в плазменном волноводе, развивающемся в режиме формирования одиночных и встречных ВВИ. Методами численного моделирования исследована роль основных процессов, участвующих в заселении возбужденных состояний атомов гелия с главным квантовым числом  $n=2$ , 3 и 4 в условиях формирования в плазменном волноводе встречных ВВИ. С целью выявления роли высокоскоростных волн ионизации в кинетике плазмы, в уравнении баланса средней энергии электронов было добавлено слагаемое, определяющее нагрев электронной компоненты за счет электрического поля во фронте волны ионизации.

Для случая двух встречных ВВИ напряженность электрического поля представлена как сумма двух компонент, описывающих две встречные волны:

$$E(x,t) = E_{01} \cdot \exp\left(-\frac{(x-v_0 \cdot t)^2}{x_0^2}\right) + E_{02} \cdot \exp\left(-\frac{((l-x)-v_0 \cdot t)^2}{x_0^2}\right).$$

Здесь  $x$  и  $l$  – координата вдоль плазменного волновода и его длина соответственно,  $x_0$  – длительность фронта ВВИ,  $v_0$  – скорость ВВИ.

Динамика релаксационных процессов исследовалась путем решения системы скоростных дифференциальных уравнений для плотности электронов и их средней энергии, плотности возбужденных, в том числе метастабильных атомов при различных режимах формирования ВВИ. Численное моделирование проводилось для центральных областей плазменного волновода диаметром разрядной трубки 0.8 см. В описании кинетики гелиевой плазмы учитывались следующие компоненты: He, He<sup>+</sup>, He<sub>2</sub><sup>+</sup>, He\*(n=2), He\*(n=3,4). В уравнении для средней энергии электронов учитывались упругие и неупругие потери энергии, а также диффузионные потери на стенки разрядной трубки.

На рис.4 приведен характерный вид релаксации заселенностей метастабильных состояний атомов гелия, моделированный для случая формирования в плазменном волноводе двух встречных ВВИ.

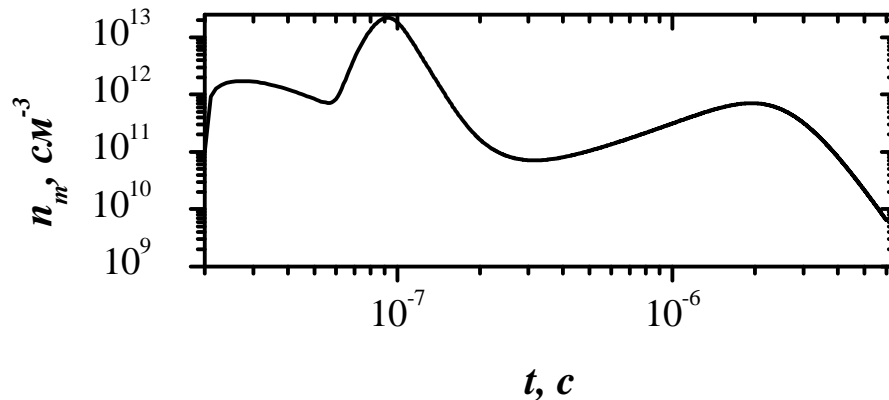


Рис.4. Результаты численного моделирования заселенностей метастабильных состояний атомов He(2<sup>3</sup>S) на расстоянии 20 см от электродов в условиях формирования и распространения двух встречных ВВИ. Давление 20 Тор, амплитуда импульса напряжения 28 кВ.

Анализ результатов численного моделирования релаксационных процессов позволяет установить следующие закономерности:

1. Кинетика процессов заселения возбужденных состояний атомов в плазменном волноводе зависит как от режима формирования ВВИ, так и от начальных условий в разряде.

2. При формировании в плазменном волноводе двух встречных ВВИ разной полярности в области их взаимодействия наблюдается скачок средней энергии электронов, на временах порядка нескольких десятков наносекунд.

3. На фронте и в области взаимодействия встречных ВВИ кинетика возбужденных атомов определяется в основном процессами прямого и ступенчатого возбуждения. Процессы ступенчатого возбуждения и ионизации являются основными механизмами, ограничивающими максимальную плотность метастабильных атомов.

4. За фронтом ВВИ при плотностях электронов выше  $10^{12} \text{ см}^{-3}$  процессы рекомбинации приводят к формированию дополнительного максимума плотности метастабильных атомов.

В §4.2 проанализированы режимы взаимодействия электронов с фронтом высокоскоростной волны ионизации в цилиндрических волноводах. Установлено, что существует ряд критических параметров, которые определяют режимы формирования высокоэнергетичных электронов в области фронта волны ионизации.

Динамика ВВИ в коаксиальных плазменных волноводах рассмотрена в §4.3. Движения ВВИ рассматривается как распространение электрического потенциала в плазменном волноводе, что дает

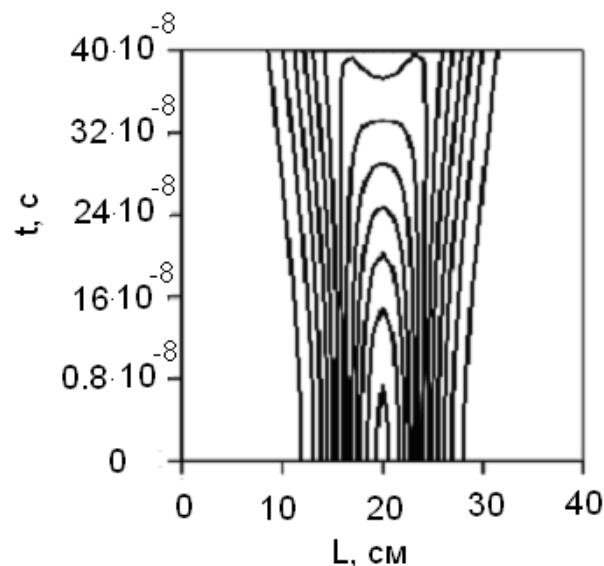


Рис. 7. Контурный срез распределения потенциала в области взаимодействия двух встречных волн ионизации одинаковой полярности.

возможность использования телеграфных уравнений совместно с уравнениями кинетики для качественного описания динамики ВВИ. Такая система уравнений решена методами компьютерного моделирования. В численной модели реализована связь кинетических и телеграфных уравнений, что позволяет при расчете напряжений и токов в системе телеграфных уравнений учитывать кинетические процессы, происходящие

в плазме волновода. Показано, что построенная модель с определенной степенью точности позволяет описать механизмы распространения и взаимодействия встречных волн ионизации. На рис.5 представлена характерная динамика распределения потенциала в области взаимодействия встречных волн ионизации одинаковой полярности, полученная численным моделированием.

Показано, что в области взаимодействия двух встречных ВВИ возможно как ускорение, так и торможение высокоэнергетических электронов.

### **Основные результаты и выводы**

В заключении перечислены основные результаты работы:

1. Разработана и реализована газоразрядная система формирования встречных высокоскоростных волн ионизации в плазменных волноводах, и создана автоматизированная система регистрации нестационарных оптических и электрических процессов в режиме реального времени. Развита методика комплексного исследования наносекундных разрядов, развивающихся в режиме формирования встречных высокоскоростных волн ионизации, включающая в себя методы осциллографирования, емкостных зондов и оптической спектроскопии.

3. Экспериментально исследованы процессы формирования, распространения и взаимодействия встречных ВВИ в коаксиальных плазменных волноводах, заполненных инертными газами при средних давлениях. Обнаружены эффекты гашения и усиления волн ионизации в области их взаимодействия.

4. Экспериментально исследована пространственно-временная динамика формирования оптического излучения в плазменном волноводе в режиме формирования, распространения и взаимодействия двух встречных ВВИ. Установлено, что форма импульсов, интенсивность и длительность оптического излучения зависят от режима формирования ВВИ в плазменном волноводе и согласования генератора высоковольтных импульсов напряжения с плазменным волноводом.

5. Экспериментально установлено, что при формировании в плазменном волноводе двух встречных высокоскоростных волн ионизации с одинаковыми потенциалами положительной полярности в области их взаимодействия оптическое излучение имеет несколько максимумов. В то же время, в условиях формирования встречных ВВИ с потенциалами разной полярности импульсы оптического излучения являются одиночными с двумя характерными временами релаксации.

6. Разработана и реализована численная модель релаксационных процессов в плазменном волноводе в области взаимодействия двух встречных ВВИ и установлены основные механизмы заселения возбужденных, в том числе метастабильных состояний атомов. Показано, что в области взаимодействия двух ВВИ кинетику релаксационных процессов и оптического излучения необходимо анализировать с учетом динамики высокоскоростных волн ионизации.

**Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. Погореловская М. А. Анизотропия процессов электронного возбуждения атомов при волновом пробое гелия.// В сб.: Тезисы докладов ВНКСФ-6, направление- Физика плазмы, плазменная техника и технологии. Екатеринбург- Томск. 2000. С.263-264.
2. Погореловская М.А. Оптическое излучение на фронте высокоскоростной волны ионизации в гелии в поперечном магнитном поле. В сб.://Тезисы докладов Всероссийской конференции «Ломоносов»-2001, секция «Физика», М.:2001. С.166-167.
3. Ашурбеков Н.А., Омаров О.А., Омарова Н.О., Погореловская М.А. Динамика ионизационных процессов за фронтом высокоскоростной волны ионизации в гелии.//В сб.: Материалы II Всероссийской конференции «Физическая электроника.». Махачкала, 2001. С.23-29.
4. Погореловская М.А. Оптическое излучение наносекундного разряда при возбуждении газа встречными волнами ионизации.//В сб.: Материалы Второго Международного конгресса: "Молодежь и наука третье тысячелетие". М. 2002, с. 68.
5. Ашурбеков Н.А., Погореловская М.А., Гамзатов А.Г., Омаров О.А. Процессы электронного возбуждения атомных состояний на фронте уединенных нелинейных волн градиента потенциала.//В сб.: Материалы Межд. конф. "Фазовые переходы и нелинейные явления". Махачкала. 2002. С.299-302.
6. Ашурбеков Н.А., Омаров О.А., Омарова Н.О., Погореловская М.А. Оптические свойства наносекундного разряда в режиме формирования встречных высоковольтных.//В сб.: Материалы III Всероссийской конференции «Физическая электроника». Махачкала. 2003.
7. Ашурбеков Н.А., Омаров О.А., Омарова Н.О., Погореловская М.А. Оптическое излучение продольного наносекундного разряда в режиме формирования встречных уединенных волн ионизации. //Изв. РАН, серия физическая. 2003. Т.67, №9. С. 1250-1253.
8. Ашурбеков Н.А., Омаров О.А., Омарова Н.О., Погореловская М.А. Роль высокоэнергетичных электронов в установлении режимов

- релаксации оптического излучения за фронтом высокоскоростной волны ионизации. //Изв. РАН, серия физическая. 2003. Т.67, №9. С. 1237-1240.
9. Ashurbekov N.A., Omarov O.A., Omarova N.O., Pogorelovskaya M.A. Optical irradiation of longitudinal discharge in the mode of solitary counter ionization waves formation.// International conference on physics of low temperature plasma. Kyiv, Ukraine, 2003. P.7.9.128.
10. Ашурбеков Н.А., Омарова Н.О., Шахсинов Г.Ш., Лахина М.А., Рамазанов А.Р. Режимы формирования импульсов оптического излучения во встречных высокоскоростных волнах ионизации. //Вестник ДГУ. 2006. Вып.4. С.34-39.

### **Цитируемая литература**

1. Тарасенко В.Ф., Яковленко С.И.// УФН. 2004. Т.174. № 9. С. 953-971.
2. Бабич Л.П.// УФН. 2005. Т.175. № 10. С. 1069-1091.
3. Асиновский Э.И., Василяк Л.М., Марковец В.В.// ТВТ, 1983. Т.21, №3.С.577-590.
4. Лагарьков А.Н., Руткевич И.М. Волны электрического пробоя в ограниченной плазме.-М. Наука, 1989.- 207 с.
5. Василяк Л.М., Костюченко С.В., Кудрявцев Н.Н., Филюгин И.В.// УФН. 1994. Т.164. №3. С. 263-285.