

На правах рукописи



Устинов Сергей Владимирович

**ИОНИЗАЦИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ СИММЕТРИЧНОГО
ДВУХПЛЕЧЕВОГО РАЗРЯДА В КОЛЬЦЕВЫХ
ГЕЛИЙ-НЕОНОВЫХ ЛАЗЕРАХ**

Специальность 2.2.1. Вакуумная и плазменная электроника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2023

Работа выполнена федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина»

Научный руководитель: **Чиркин Михаил Викторович**,
доктор физико-математических наук,
профессор

Официальные
оппоненты: **Кристя Владимир Иванович**, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры МК10 «Высшая математика и физика» Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Калуга

Борисов Анатолий Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Технологии производства приборов и информационных систем управления летательных аппаратов» Московского авиационного института (национального исследовательского университета), г. Москва.

Ведущая организация: АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха», г. Москва.

Защита диссертации состоится «26» сентября 2023 г. в 11 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.2.375.02 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «РГРТУ» и на официальном сайте <http://www.rsreu.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.375.02 доктор физико-математических наук, доцент

Литвинов Владимир Георгиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Работа направлена на повышение эксплуатационной надежности и ресурса кольцевых гелий-неоновых лазеров, используемых в автономных системах инерциальной навигации как прецизионные датчики угловых перемещений, функционирующие в широком диапазоне изменения температуры.

Активная среда кольцевого лазера поддерживается симметричным двухплечевым разрядом постоянного тока в области условий $pr = 100 - 120$ Па·см, $I/r < 10$ мА/см, где p - давление газовой смеси r - радиус разрядного канала, I - сила тока в каждом плече. Режим ухода электронов на стенку канала является промежуточным между амбиполярной и свободной диффузией. Ионизационный баланс поддерживается прямой и ступенчатой ионизацией атомов, а также Пеннинг-ионизацией с участием посторонних примесей (Квантовая электроника. 2015. - Т. 164, №1. - С. 309-310). Развитие технологии изготовления зеркал позволило обеспечить малые потери лазерного излучения в кольцевом резонаторе и возможность в два раза уменьшить рабочий ток разряда, что многократно снижает скорость распыления холодного катода ионной бомбардировкой и увеличивает ресурс лазера. Однако, падающая вольт-амперная характеристика положительного столба и паразитные электрические емкости, шунтирующие балластные резисторы, создают опасность развития неустойчивости и самовозбуждения автоколебаний в электрической цепи, включающей двухплечевую разряд.

Степень разработанности темы исследований. Исследования динамики положительного столба гелий-неонового разряда показывают, что Пеннинг-ионизация метастабильных атомов гелия и неона в случае относительного содержания легко ионизируемых примесей в разрядном канале порядка $10^{-3} - 10^{-4}$ частично компенсирует ионизационную неустойчивость плазмы. Чтобы найти в пространстве параметров положение границы устойчивого газового разряда, необходима модель положительного столба, адекватно отражающая особенности ионизационного баланса в кольцевых гелий-неоновых лазерах. Однако в настоящее время отсутствуют методики, позволяющие количественно определить степень загрязнения гелий-неоновой смеси посторонними примесями, и теоретические модели, адекватно описывающие влияние температуры газа на ионизационный баланс. Известно, что возмущения в положительном столбе, окруженном металлическим экраном, в рассматриваемых условиях распространяются как в активной линии передачи. Проблема анализа устойчивости электрической цепи разряда в кольцевом лазере включает также задачу учета влияния

токов смещения, текущих через оптическую стеклокерамику между разрядным каналом и корпусом прибора.

Цель диссертационной работы - обеспечить устойчивую работу кольцевого лазерного гироскопа в области малых токов разряда ($I/r < 10$ мА/см, I – ток в плече) при длительной эксплуатации в широком диапазоне изменения температуры окружающей среды.

Объект исследования – кольцевой гелий-неоновый лазер с возбуждением активной среды двухплечевым газовым разрядом постоянного тока.

Предмет исследования – диагностика положительного столба разряда в смеси гелия и неона в у кольцевом лазере и граница неустойчивости электрической цепи, включающей симметричный двухплечевой разрядный промежутки.

Задачи исследования.

1. Разработка экспериментальной установки для регистрации линейной реакции двухплечевого тлеющего разряда в кольцевом гелий-неоновом лазере на внешние возмущения при регулируемом изменении температуры окружающей среды.

2. Создание и экспериментальная апробация модели, отражающей влияние температуры и газового состава на ионизационный баланс положительного столба разряда в кольцевом гелий-неоновом лазере.

3. Анализ устойчивости электрической цепи, включающей симметричный двухплечевой разряд, с учетом распределенного характера возмущений в системе «положительный столб – оптическая стеклокерамика – корпус лазерного гироскопа».

4. Исследование зависимостей критического тока развития неустойчивости в электрической цепи симметричного двухплечевого разряда от температуры и газового наполнения кольцевого гелий-неонового лазера.

Научная новизна диссертационной работы.

1. Разработаны экспериментальная установка для регистрации частотной зависимости комплексного сопротивления плазмы в каналах двухплечевого кольцевого лазера в диапазоне 0,1 – 70 кГц с термостабилизацией стеклокерамического моноблока кольцевого лазера в диапазоне температуры -30 ...+85 °С и методика обработки результатов измерений с учетом токов смещения между положительным столбом разряда и корпусом кольцевого лазера.

2. Синтезирована схема замещения положительного столба газового разряда в кольцевом лазере, отражающая разделение процессов в плазме по их инерционности. Экспериментально зарегистрированы

температурные зависимости параметров схемы замещения, позволяющие анализировать устойчивость разряда в кольцевом лазере.

3. Разработана математическая модель, включающая систему уравнений баланса заряженных частиц и метастабильных атомов неона и гелия в плазме при слабом гармоническом возмущении газового разряда, которая учитывает влияние тока, радиуса разрядного канала, температуры, состава и давления газовой смеси, частоты реакции Пеннинга и позволяет рассчитать частотную зависимость комплексного сопротивления положительного столба.

4. Обнаружен рост отрицательной активной составляющей комплексного сопротивления плазмы для частот, превышающих 50 кГц, в результате увеличения температуры газовой смеси и идентифицирован механизм, препятствующий подавлению ионизационной неустойчивости разряда постоянного тока в кольцевом гелий-неоновом лазере вблизи верхней границы температурного диапазона.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1. Идентификация механизма влияния температуры гелий-неоновой смеси на комплексное сопротивление положительного столба для фиксированного тока разряда при проектировании типоразмерного ряда кольцевых лазеров обеспечивает возможность анализировать риски отказа лазерного гироскопа вследствие возбуждения автоколебаний в электрической цепи двухплечевого разряда.

2. Развитая методика расчета границ области устойчивости электрической цепи, включающей разрядный промежуток, позволяет минимизировать рабочий ток разряда в кольцевом лазере в условиях сохранения эксплуатационной надежности лазерного гироскопа в широком температурном диапазоне.

3. Разработанные модель положительного столба и методика измерения его комплексного сопротивления являются основой для восстановления по экспериментальным данным величины частоты реакции Пеннинга в разрядном канале, количественно характеризующей степень загрязнения посторонними примесями газовой смеси, и регистрации её изменений в процессе работы кольцевого лазера.

Реализация и внедрение.

Результаты диссертации внедрены в ПАО «Московский институт электромеханики и автоматики» для контроля качества электровакуумной обработки при изготовлении кольцевых лазеров для бесплатформенных инерциальных навигационных систем авиационного применения, что позволяет своевременно выявлять отклонения от заданных технологических режимов и увеличить выход продукции, соответствующей установленным требованиям.

Методология и методы исследования.

При решении поставленных задач использованы методы экспериментальных исследований газоразрядной плазмы на основе регистрации её отклика на внешнее гармоническое возмущение, методы моделирования процессов, поддерживающих ионизационный баланс в модулированном положительном столбе. Для моделирования и проведения расчетов и обработки экспериментальных данных на ЭВМ применены пакеты программного обеспечения MathCad, Matlab, ComsolMultiphysics.

Научные положения, выносимые на защиту.

1. Увеличение температуры смеси гелия и неона при фиксированном токе разряда в узком канале при условии $I/r < 10$ мА/см (I – сила тока, r – радиус канала) сопровождается ростом влияния на комплексное сопротивление плазмы релаксации концентрации электронов и подавлением вклада процессов ионизации метастабильных атомов.

2. В кольцевых гелий-неоновых лазерах переход к свободной диффузии электронов при уменьшении отношения силы тока в положительном столбе обеспечивает пространственное усиление электрических возмущений с частотами в сотни килогерц, распространяющихся вдоль разрядных каналов как в активной линии передачи.

3. Критический ток, ограничивающий снизу область устойчивости симметричного двухплечевого разряда постоянного тока в смеси гелия и неона, является монотонно возрастающей функцией температуры газового наполнения, которая увеличивается в два раза при росте температуры от -10°C до $+90^{\circ}\text{C}$.

Достоверность результатов исследования подтверждается соответствием результатов аналитических расчетов, результатов математического моделирования и результатов экспериментов, оценкой точности аналитических расчетов и результатов математического моделирования.

Апробация работы. Осуществлена в публикациях, докладах и выступлениях на следующих конференциях: межвузовской научно-практической конференции «Современная наука глазами молодых ученых: достижения, проблемы, перспективы» г. Рязань – 2014; Международной конференции «Актуальные проблемы современной науки», РГРТУ, г. Рязань, – 2019; XXXII международной конференции конференция памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова, г. Санкт-Петербург – 2020; XVI конференции Всероссийской молодежной научно-инновационной школы «Математика и математическое моделирование» г. Саров – 2022; 51 Международная Тулиновская конференция по Физике Взаимодействия За-

ряженных Частиц с Кристаллами (МТК-51) г. Москва – 2022; XVII конференции Всероссийской молодежной научно-инновационной школы «Математика и математическое моделирование» г. Саров – 2023; 52 Международная Тулиновская конференция по Физике Взаимодействия Заряженных Частиц с Кристаллами (МТК-52) г. Москва – 2023.

Публикации. По материалам диссертации опубликованы 18 работ, в том числе две статьи – в журналах, входящих в перечень ВАК, и получен патент РФ на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения, включает 156 страниц основного текста, содержит 76 рисунков, 5 таблиц и список литературы из 103 наименований. В приложении приведены акты о внедрении результатов работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность темы исследований, сформулированы цель и задачи диссертации, отражены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, сформулированы научные положения, вынесенные на защиту, и приведены сведения об апробации работы.

В первой главе диссертации представлен аналитический обзор публикаций по теме исследования. Представлен анализ проблемы неустойчивости разряда в активной среде гелий-неонового лазера и динамических процессов в плазме разряда, реализующихся при воздействии внешнего модулирующего сигнала. В случае малых возмущений стационарного состояния реактивные свойства положительного столба позволяет описать эквивалентная схема в виде последовательного соединения отрицательного сопротивления и нескольких параллельных RL - цепочек. Рассмотрены методики измерений комплексного сопротивления и особенности автоколебаний в положительном столбе разряда. Выполнен анализ проблемных вопросов динамики низкотемпературной плазмы положительного столба газового разряда, которыми является ионизационная неустойчивость, приводящая к самовозбуждению ионизационно-диффузных волн или к пространственно однородным колебаниям.

Обзор литературы завершается конкретизацией задач, решаемых в диссертации.

Во второй главе описана экспериментальная установка для измерений комплексного сопротивления положительного столба (рисунок 1) методом малых возмущений стационарного состояния электри-

ческой цепи, включающей двухплечевой разрядный промежуток. В качестве объекта исследований использован лазерный гироскоп на основе кольцевого гелий-неонового лазера, активная среда которого поддерживается симметричным двухплечевым разрядом постоянного тока.

Установка позволяет регистрировать частотные зависимости комплексного сопротивления разряда в диапазоне изменения температуры ситаллового моноблока кольцевого лазера $-30\dots+85^{\circ}\text{C}$ с разделением реакций на внешнее возмущение положительного столба и прикатодных областей. Полученные результаты создают условия для анализа процессов, определяющих линейную реакцию положительного столба газового разряда на внешнее модулирующее воздействие.

Моноблоки кольцевых лазеров изготовлены из оптической стеклокерамики СО-115М (ситалла) и наполнены смесью гелия и неона в соотношении 16:1 до давления $720 \div 800$ Па. Разрядные промежутки ограничены медными анодами $A_{1,2}$ и холодным катодом K из алюминия, на поверхности которого сформировано эмиссионное окисное покрытие. Длина положительного столба в каждом из плеч прибора составляет 63 мм, диаметры разрядных каналов - 2,7 мм.

Кольцевой лазер 5, помещен в теплоизолированный объем 6, чтобы проводить измерения при различных температурах моноблока. Корпус 6 размещен на заземленной металлической пластине. Питание прибора осуществляется от регулируемого источника постоянного напряжения 9. Высокое напряжение положительной полярности подается на аноды кольцевого лазера через балластные резисторы R_{b1} и R_{b2} . Модулирующий гармонический сигнал подается на одно из плеч симметричного двухплечевого разряда от генератора (1) через разделительную RC -цепочку. Частота модулирующего сигнала контролируется с помощью частотомера (2). В процессе измерений частота гармонического сигнала изменяется в диапазоне частот $0,2 - 70$ кГц.

В результате анализа схемы электрической цепи (рисунок 2) обоснована возможность выделить экспериментально комплексные сопротивления положительного столба Z и катодной области Z_c . Эквивалентная схема замещения по переменному току электрической цепи разряда включает два комплексных сопротивления положительного столба Z в плечах разряда и комплексное сопротивление Z_c прикатодной области, общей для обоих промежутков. Емкости C_0 - паразитные монтажные емкости между анодами и экраном (металлическим корпусом лазерного гироскопа).

Анализ схемы замещения позволяет, используя регистрируемые в точках 1, 2, 3 значения комплексных амплитуд напряжений U_1 , U_2 и U_3

с учетом разностей фаз $\varphi_{12}, \varphi_{13}$, выделить комплексные сопротивления положительного столба Z и прикатодной области Z_c :

$$Z = \frac{R_c \cdot \dot{U}_1 Z_1 R_d - \dot{U}_3 Z_2 R_a}{R_a \cdot \dot{U}_2 R_d + 2\dot{U}_3 R_c (1 + Z_2 Y)}, \quad (1)$$

где ω – циклическая частота модулирующего напряжения,

$$Z_{1,2} = R_{1,2} + R_{a,d} + (i\omega C_{1,2})^{-1}, \quad Y = R_b^{-1} + i\omega C_0. \quad (2)$$

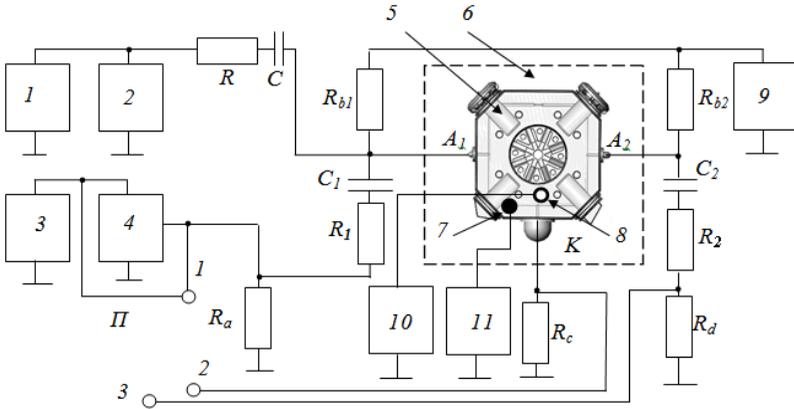


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки: 1 – генератор GFG – 3015, 2 – частотомер ЧЗ-34, 3 – милливольтметр В7-27А/1, 4 – измеритель разности фаз Ф2-16, 5 – кольцевой лазер, 6 – термоизолированный объем, 7 и 8 – термодатчики ТА-300S, 9 – источник высокого напряжения, 10 и 11 – мультиметры цифровые APPA-207, A_1 и A_2 – аноды, K – катод, П – трехпозиционный переключатель; 1, 2, 3 – контрольные точки для измерения переменных напряжений

Учет волнового характера электрических возмущений в системе «положительный столб разряда - металлический корпус», позволяет определить в первом приближении по малому параметру $\omega c|Z| \ll 1$ поправку ΔZ для величины комплексного сопротивления Z , рассчитанного по формуле (1), учитывающую токи смещения, текущие через ситалл:

$$\Delta Z = -2i\omega c l Z \dot{U}_3 R_c \frac{Z_2 + Z + Z_2 Z Y}{\dot{U}_2 R_d + 2\dot{U}_3 R_c (1 + Z_2 Y)}, \quad (3)$$

где c – емкость единицы длины рассматриваемой линии передачи.

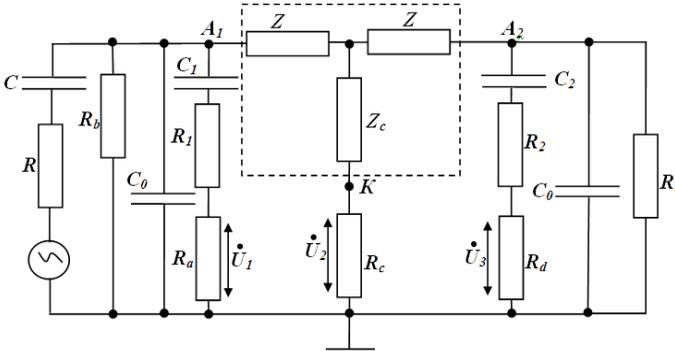


Рисунок 2 – Эквивалентная схема замещения электрической цепи измерительной установки модулируемого разряда для переменного тока: \dot{U}_1 , \dot{U}_2 , \dot{U}_3 – комплексные амплитуды переменных составляющих регистрируемых напряжений, Z – комплексное сопротивление положительного столба одного плеча разряда, Z_c – комплексное сопротивление катодной области разряда, R_b – балластное сопротивление

На рисунке 3 представлены частотные зависимости действительной и мнимой частей комплексного сопротивления положительного столба разряда в кольцевом гелий-неоновом лазере, которые показывают, что на частотах свыше 50 кГц учет поправки ΔZ (кривая 2) позволяет расширить верхнюю границу частотного диапазона измерений. Представленный годограф комплексного сопротивления содержит три участка: первый - для частот менее 2 кГц со сменой знака у реактивной части комплексного сопротивления, второй - от 2 до 50 кГц – рост положительного реактивного сопротивления с тенденцией к насыщению и третий - для частот выше 50 кГц, на котором скорость роста реактивного сопротивления резко увеличивается. Моделирование экспериментально зарегистрированного годографа выполнено с помощью наиболее простой из возможных схем замещения, содержащей последовательно соединенное отрицательное динамическое сопротивление ρ и две RL -цепочки (см. рис. 3,а). Параметры схемы, годограф которой в наименьшей степени отклоняется от экспериментальных значений, найдены с помощью метода наименьших модулей. Каждой параллельной RL -цепочке в этой схеме соответствует физический процесс, влияющий на прохождение тока, причем отношение L/R отражает время релаксации.

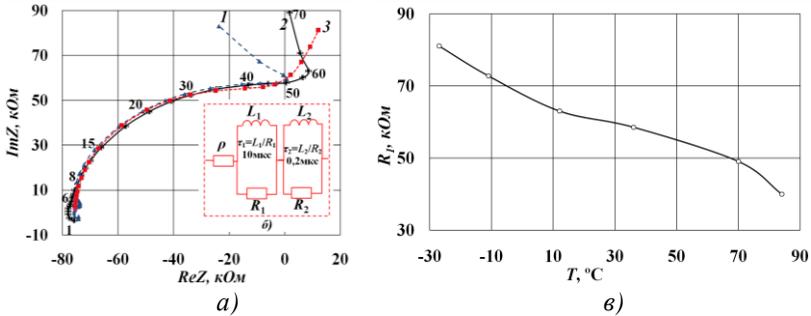


Рисунок 3 - а) – годографы частотных зависимостей комплексного сопротивления положительного столба: 1 – обработка результатов измерений по формуле (1), 2 – учтена поправка (3), б) – схема замещения положительного столба, в) - температурная зависимость сопротивления R_1 в синтезированной схеме замещения. Постоянная составляющая тока разряда – 750 мкА, температура моноблока – 27°C. Около экспериментальных точек указаны частоты модуляции в кГц

Используемая схема замещения отражает вклады двух ионизационных процессов в баланс рождения и гибели заряженных частиц в положительном столбе и разделяет их по инерционности. R_1L_1 -цепочка, описывает процесс с временем релаксации порядка 10 мкс, что близко к временам установления концентрации метастабильных атомов неона и гелия. Процесс, соответствующий R_2L_2 -цепочке с временем 0,2 мкс, характеризует релаксацию концентрации электронов в разрядном канале.

Результаты аналогичных экспериментов, выполненных для всего температурного диапазона, продемонстрировали неизменность постоянных времен релаксации $\tau_{1,2}$ обеих цепочек, сопротивления R_2 и отрицательного динамического сопротивления $\rho = -73 \text{ k}\Omega$ при фиксированном токе. Однако обнаружено лишь монотонное уменьшение сопротивления R_1 с ростом температуры (рис. 3,в). Полученный результат свидетельствует об уменьшении вклада метастабильных атомов в ионизационный баланс плазмы и в ее отрицательное динамическое сопротивление при нагреве газовой смеси.

Построенных по экспериментальным данным схем замещения не позволяет количественно определить влияние параметров плазмы на устойчивость разряда. Чтобы выполнить анализ устойчивости разряда для всего перечня варьируемых условий (ток, давление, состав и температура газовой смеси, радиус канала) в широких диапазонах измене-

ния параметров, необходима математическая модель, описывающая положительный столб разряда в кольцевом гелий-неоновом лазере.

В третьей главе представлена разработанная математическая модель газоразрядной плазмы в виде системы уравнений баланса для электронов и метастабильных атомов неона и гелия при слабом гармоническом возмущении разряда, которая позволяет рассчитать частотную зависимость комплексного сопротивления положительного столба.

Первый этап заключается в расчете статических характеристик положительного столба: вольт - амперной характеристики (ВАХ) и зависимостей от условий поддержания разряда концентраций на оси разрядного канала для электронов, метастабильных атомов гелия в состояниях 2^3S_1 и 2^1S_0 и неона в состоянии $1s_5$. На втором этапе вычисляются частотные зависимости комплексного сопротивления положительного столба, знание которых создает возможность для поиска границ области, соответствующей устойчивому стационарному состоянию электрической цепи, включающей симметричный двухплечевой разрядный промежуток.

В уравнениях баланса учтены процессы ионизации и возбуждения атомов прямым электронным ударом, ступенчатая ионизация, ионизация при столкновениях метастабильных атомов, реакция Пеннинга, передача возбуждения при столкновениях метастабильных атомов гелия с атомами неона, поперечная диффузия электронов к стенке разрядного канала. Разделение уравнений баланса для разных метастабильных состояний позволяет учесть, что не все возбужденные атомы неона после каскада оптических переходов окажутся в метастабильном состоянии. Частично атомы неона попадают в резонансные состояния и девозбуждаются с выходом вакуумного УФ излучения.

В рассматриваемых условиях диффузия электронов является переходной от амбиполярной к свободной, в связи с чем для ее описания использована аппроксимация:

$$v_l = \frac{D}{\left(\frac{r}{2,405}\right)^2} \frac{20 + 10\lambda + \lambda^2}{20 + 12\sqrt{1 + \frac{\mu_e}{\mu_i}}\lambda + \left(1 + \frac{\mu_e}{\mu_i}\right)\lambda^2}, \lambda = \sqrt{\left(\frac{eN_e}{\varepsilon_0 T_e}\right)} \cdot \left(\frac{r}{2,405}\right), \quad (4)$$

где μ_i и μ_e подвижности ионов и электронов, D – коэффициент свободной диффузии электронов, λ – отношение диффузионной длины к длине Дебая для электронов, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, e – заряд электрона, T_e , N_e – температура и концентрация электронов, r – радиус разрядного канала.

На рисунке 4 представлены результаты решения стационарных уравнений баланса и построены зависимости частоты ухода электронов на стенки разрядного канала, концентрации электронов, радиуса Дебая и напряженности продольного электрического поля в положительном столбе от температуры газовой смеси. Учтены температурные зависимости констант передачи возбуждения при столкновениях метастабильных атомов гелия с атомами неона вида $\exp(-\Delta/kT)$, где T – температура газа, k – постоянная Больцмана, Δ – разница энергий возбуждения атомов гелия и неона. Рост температуры вызывает уменьшение суммарной концентрации метастабильных атомов и рост напряженности поля. При этом снижается концентрация электронов и, как следствие, увеличивается радиус Дебая. Результаты расчета демонстрируют рост падения напряжения на положительном столбе более чем на 10 В при увеличении температуры от -10°C до $+90^\circ\text{C}$.

Для вычисления комплексного сопротивления положительного столба для заданных стационарных значений параметров плазмы в условиях слабых гармонических возмущений заряженных частиц система уравнений баланса приведена к виду:

$$M(i\omega)\dot{\boldsymbol{\eta}} = \frac{\delta\dot{E}}{E}\boldsymbol{\beta}, \quad \beta_0 = N_e(v_i\hat{v}_i - v_l\hat{v}_l), \quad k=0, \quad \beta_k = N_k v_k \dot{v}_k, \quad k=1,2,3, \quad (5)$$

где v_i, v_k – частоты ионизации и возбуждения атомов гелия и неона прямым электронным ударом, N_e, N_k – стационарные концентрации электронов и метастабильных атомов на оси разрядного канала, \dot{E} – комплексная амплитуда колебаний напряженности электрического поля. Компоненты вектора $\boldsymbol{\eta}$ – комплексные амплитуды колебаний концентраций электронов и метастабильных атомов, значение индекса $k=0$ соответствует электронам, $k=1,2,3$ – метастабильным атомом гелия в состояниях 2^3S_1 и 2^1S_0 и неона в состоянии $1s_5$, соответственно, v_l – частота диффузионного ухода электронов на стенку разрядного канала, символами $\hat{v}_k, \hat{v}_l, \hat{v}_i$ обозначены логарифмические производные соответствующих частот по напряженности продольного электрического поля. Диагональные компоненты матрицы содержат слагаемые, пропорциональные $i\omega\tau_e, i\omega\tau_k, \tau$ – время релаксации соответствующего процесса. Решение системы (5) позволяет выделить частотные зависимости комплексной амплитуды колебаний концентрации электронов $\dot{\eta}_0$ и комплексного сопротивления единицы длины положительного столба z :

$$\frac{\delta\dot{I}}{I} = \frac{\delta\dot{E}}{E} + \frac{\dot{\eta}_0}{N_e}, \quad z = \frac{I}{E} \frac{\delta\dot{E}}{\delta\dot{I}}. \quad (6)$$

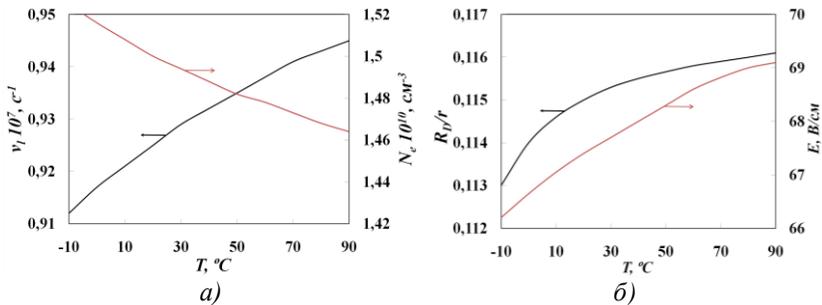


Рисунок 4: а) – зависимости частоты ухода электронов на стенки разрядного канала и концентрации электронов от температуры газовой смеси. Ток в плече разряда 600 мкА, частота реакции Пеннинга $12\ 000\ c^{-1}$; б) – температурные зависимости отношения радиуса Дебая к радиусу разрядного канала и напряженности продольного электрического поля в положительном столбе. Ток в плече разряда 600 мкА, частота реакции Пеннинга $12\ 000\ c^{-1}$

На рисунке 5 представлены результаты моделирования положительного столба разряда в кольцевом гелий-неоновом лазере, возмущенного слабым гармоническим сигналом. Годограф комплексного сопротивления плазмы в диапазоне частот $2 \div 50$ кГц при увеличении температуры газа «сжимается». Эффект отражает монотонное убывание сопротивления R_1 в инерционном элементе, отражающего общий вклад ионизации метастабильных атомов, в схеме замещения, синтезированной по результатам математического моделирования положительного столба. Для частот более 50 кГц при нагреве газа годограф комплексного сопротивления сдвигается влево, в область отрицательных активных сопротивлений, что согласуется с результатами экспериментальных исследований, приведенными в главе 2. Монотонное увеличение степени загрязнения газовой смеси посторонними примесями, вызывающее рост частоты реакции Пеннинга, оказывает компенсирующее влияние и способно стабилизировать стационарное состояние электрической цепи разряда.

На рисунке 6 представлена зависимость от температуры частоты реакции Пеннинга, найденной в результате процедуры оптимизации. Обнаруженное снижение величины частоты Пеннинг-ионизации с ростом температуры и увеличение напряжения на положительном столбе отражает уменьшение загрязнения газовой смеси в разрядном канале посторонними примесями. Таким образом, при постоянном токе разряда температурный рост падения напряжения связан как с уменьше-

нием общего количества метастабильных атомов, так и с уменьшением концентрации посторонних примесей. Обнаруженный эффект специфичен для гелий-неоновой смеси способен вызвать неустойчивость стационарного состояния электрической цепи в результате нагрева газовой смеси и должен учитываться при выборе условий поддержания разряда в кольцевых лазерах.

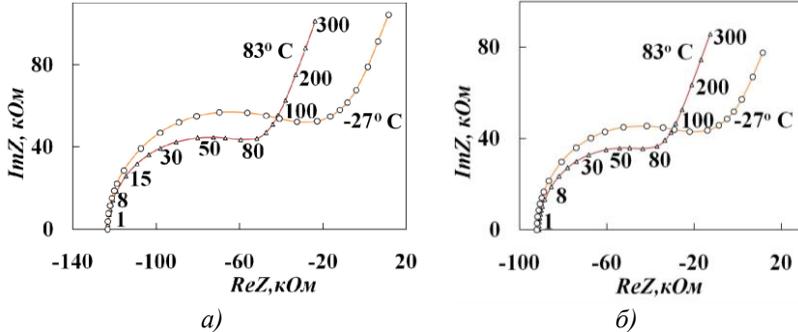


Рисунок 5 – Рассчитанные годографы частотных зависимостей комплексного сопротивления положительного столба разряда. Около точек указаны значения частоты в кГц, около кривых – температура газа в разрядном канале. Частота реакции Пеннинга $14\ 000\ \text{с}^{-1}$. Ток разряда в плече, мкА: а) – 600, б) – 750

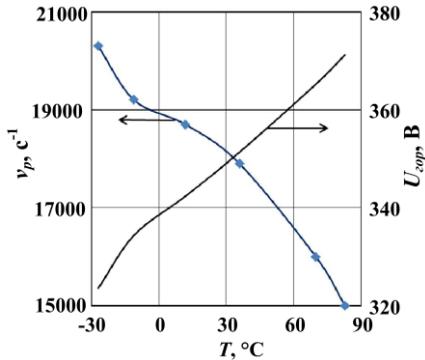


Рисунок 6 - Зависимости от температуры газа частоты реакции Пеннинга, найденной по результатам измерения комплексного сопротивления положительного столба, и соответствующего ей падения напряжения на положительном столбе. Ток в плече разряда 750 мкА

Результаты моделирования ионизационного баланса в плазме использованы в четвертой главе для анализа устойчивости электрической

цепи, включающей двухплечевой разрядный промежуток. Условия устойчивости для электрической цепи с распределенными параметрами найдены с учетом волнового процесса в линии передачи «положительный столб – оптическая стеклокерамика – корпус ЛП». Комплексная постоянная распространения волн в линии передачи связана с распределенными комплексным сопротивлением плазмы z , емкостью c и действительной частью комплексной проводимости диэлектрика y с точностью до слагаемых, пропорциональных первому порядку малых величин $\text{tg}\delta$ и отношения $\text{Re}z/\text{Im}z$ имеет вид:

$$\gamma \approx \sqrt{\omega c \text{Im} z} \left(i + \frac{\text{Re} z}{2 \text{Im} z} + \text{tg} \delta \right), \quad (7)$$

где $\text{tg}\delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь, ω – резонансная частота, мнимая часть комплексной постоянной распространения отражает набег фазы, действительная – пространственное усиление/затухание волны. Последнее слагаемое в правой части (7) соответствует рассеянию энергии из-за токов утечки внутри стеклокерамики. Результаты измерений комплексной диэлектрической проницаемости ситалла показывают, что значение $\text{tg}\delta$ находится в диапазоне $0,01 \div 0,08$; для анализа устойчивости электрической цепи использована аппроксимация частотных зависимостей $\text{tg}\delta$.

Изменяющиеся во времени по гармоническому закону возмущения в линии передачи представляют собой суперпозицию падающей и отраженной от нагрузки волн напряжения вида:

$$U(x) = U_1 e^{-\gamma x} + U_2 e^{\gamma x}, \quad 0 < x < 2l, \quad (8)$$

U_1, U_2 – комплексные амплитуды встречных волн.

Знание комплексной постоянной распространения волны $\gamma(i\omega)$ и использование граничных условий для тока и напряжения позволяет рассчитать коэффициент отражения волны $K(i\omega)$ от нагрузки – параллельной $R_b C_{in}$ -цепочки:

$$K = \frac{\omega c (i + \text{tg} \delta) Z_n - \gamma}{\omega c (i + \text{tg} \delta) Z_n + \gamma}, \quad Z_n = \frac{R_b}{1 + i\omega R_b C_{in}}. \quad (9)$$

Анализ устойчивости активной линии передачи сведен к следующим операциям:

1) Определение фазового условия резонанса в симметрично нагруженной линии передачи - поиск резонансной частоты ω_0 как корня уравнения:

$$2 \cdot \arg K(i\omega_0) - 4 \cdot l \cdot \sqrt{\omega_0 c \text{Im} z(i\omega_0)} = -2\pi q, \quad q = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (10)$$

2) Проверка амплитудного условия самовозбуждения автоколебаний:

$$|K(i\omega_0)| \cdot \exp(-2 \cdot l \cdot \operatorname{Re} \gamma(i\omega_0)) \geq 1. \quad (11)$$

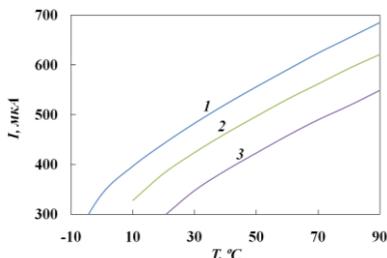


Рисунок 7 – Зависимости критических значений тока разряда от температуры газовой смеси для различных сопротивлений балластных резисторов: R_b , МОм: 1 – 1,0, 2 – 0,5, 3 – 0,3. Частота реакции Пеннинга $16\,000\text{ с}^{-1}$, $C_{in} = 2\text{ пФ}$. Область ниже критической кривой соответствует развивающейся ионизационной неустойчивости

Численное моделирование распределения электрического поля в окрестности анода с помощью программы Comsol Multiphysics позволило найти величину монтажной емкости C_{in} и её температурные зависимости для различных частот переменного напряжения. Величина емкости является монотонно возрастающей функцией температуры газа, находится в диапазоне $1,7 \div 2,0\text{ пФ}$. Результаты расчета границ в пространстве параметров, внутри которых разряд устойчив, отражает рисунок 7. Уменьшение тока в плече и рост температуры приводят к быстрому сжатию области устойчивого разряда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертации:

1. Идентифицированы причины растущих температурных зависимостей продольной составляющей напряженности электрического поля в положительном столбе и критического тока, ограничивающего снизу область устойчивости стационарного состояния электрической цепи. Пересечение критической границы при уменьшении тока сопровождается развитием ионизационной неустойчивости в симметричном двухплечевом разряде и самовозбуждением автоколебаний.

2. Развита модель ионизационных процессов в модулированном положительном столбе разряда в смеси гелия и неона, адекватно описывающая экспериментально обнаруженные изменения частотной зависимости его комплексного сопротивления при росте температуры и степени загрязнения газовой смеси легко ионизируемыми добавками.

3. Моделирование положительного столба с помощью системы уравнений баланса для концентраций электронов и метастабильных

атомов гелия в состояниях 2^3S_1 , 2^1S_0 и неона в состоянии $1s_5$ позволяет определять по измеренной частотной зависимости комплексного сопротивления плазмы частоту Пеннинг-ионизации, характеризующую степень загрязнения посторонними примесями газовой смеси в разрядном канале. Величина частоты реакции Пеннинга определяется в результате минимизации отклонений результатов расчета от зарегистрированных экспериментально значений комплексного сопротивления.

4. Снижение рабочего тока разряда в кольцевых гелий-неоновых лазерах, вызванное необходимостью увеличения ресурса лазерного гироскопа, возможность которого открывает применение высококачественных зеркал в оптическом резонаторе, требует анализа пороговых условий развития неустойчивости в широком диапазоне изменения температуры окружающей среды. Игнорирование данного обстоятельства при проектировании типоразмерного ряда кольцевых лазеров создает риски снижения эксплуатационной надежности вследствие отказов лазерных гироскопов, как при увеличении температуры, так и в результате самоочистки газа под действием электрического разряда.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК России

1. Морозов Д.А., Молчанов А.В., Чиркин М.В., Устинов С.В. Модуляционные исследования газоразрядной плазмы// Вестник РГРТУ. – 2015. – № 54. – С. 115-121.
2. Chirkin M. V., Mishin V. Yu., Serebryakov A. E., Ustinov S. V. Stability of Bilateral Discharge in the Ring Laser// Journal of Surface investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2023. – Vol. 17, No. 3. – P. 612-619.
3. Патент РФ на изобретение «Холодный катод кольцевого лазера» № 2786417 от 21.12.2022, Бюл. №6.

Публикации в других изданиях

4. Мишин В.Ю., Устинов С.В., Чиркин М.В. Устойчивость симметричного двухплечевого разряда постоянного тока в кольцевом гелий-неоновом лазере// Вестник РГРТУ. – 2019. – № 69. – С. 193 – 202.
5. Морозов Д.А., Климаков В.В., Мишин В.Ю., Серебряков А.Е., Чиркин М.В., Устинов С.В. Устойчивость экранированного двухплечевого разряда постоянного тока в кольцевом гелий-неоновом лазере// Радиотехника. – 2020. – т.84, №11(21). – С. 30 – 39
6. Чиркин М.В., Устинов С.В. Модуляционные исследования газоразрядной плазмы// Материалы межвузовской научно-практической конференции современная наука глазами молодых ученых. – 2014. – ч.1. 128 – 134.

7. Чиркин М.В., Устинов С.В. Бесплатформенные инерциальные навигационные системы на лазерных гироскопах// Научный резерв. Рязань. – 2014. – №13 (32). С. 69 – 72.
8. Мишин В.Ю., Устинов С.В., Чиркин М.В. Влияние температуры газа на динамические характеристики плазмы в кольцевом гелий-неоновом лазере, определение порога развития неустойчивости// Материалы IV Всероссийской научно-технической конференции. – 2019. – С. 55 – 62.
9. Устинов С.В., Жустрин М.М., Чиркин М.В. Моделирование динамических характеристик газового разряда в кольцевом лазере// Межвузовский сборник научных трудов. – 2020. – №3. – С. 190 – 199.
10. Климаков В.В., Мишин В.Ю., Серебряков А.Е., Чиркин М.В., Устинов С.В. Неустойчивость газового разряда в кольцевом лазере и эксплуатационная надежность лазерного гироскопа // XXXIII мультиконференция. – Санкт-Петербург, 7-8 октября 2020 г. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». – 2020. – С. 26 - 28.
11. Чиркин М.В., Устинов С.В., Кирьяков В.О. Бесплатформенные навигационные системы// Межвузовский сборник научных трудов. – 2021. – №8. – С. 371 – 374.
12. Чиркин М.В., Устинов С.В., Мишин В.Ю., Кирьяков В.О. Импедансная спектроскопия в кольцевом гелий-неоновом лазере// Межвузовский сборник научных трудов. – 2021. – №8. – С. 374 – 381.
13. Чиркин М.В., Устинов С.В., Мишин В.Ю., Серебряков А.Е. Математическое моделирование положительного столба газовой плазмы кольцевого лазера// Сборник материалов XVI Всероссийской молодежной научно-инновационной школы. – Саров, 5 – 7 апреля 2022 г. С.: СарФТИ НИЯУ МИФИ, 2022. – С. 10 – 11.
14. Чиркин М.В., Устинов С.В., Мишин В.Ю., Серебряков А.Е. Определение неустойчивости газового разряда и эксплуатационной надежности кольцевого гелий-неонового лазера в системе инерциальной навигации// Сборник материалов 51 Международной Тулиновской конференции по Физике Взаимодействия Заряженных Частиц с Кристаллами (МТК-51). – Москва, 24 – 26 мая 2022 г.: МГУ им М.В. Ломоносова, 2022.– С. 173 – 174.
15. Чиркин М.В., Устинов С.В., Зухрабов М.М. Бесплатформенные системы геопозиционирования. Характеристический анализ. // Межвузовский сборник научных трудов. Рязань. – 2022. – №3. – С. 328 – 333.
16. Чиркин М.В., Устинов С.В., Зубец А.П. Особенности применения лазерного гироскопа в авиационной автономной инерциальной навигации// Межвузовский сборник научных трудов. – 2022. – №3. – С. 374 – 381.

17. Чиркин М.В., Устинов С.В., Иваненко Ю.Р., Николин С.В., Волков С.С. Комплексное сопротивление плазмы в кольцевых гелий-неоновых лазерах// Сборник материалов XVII Всероссийской молодежной научно-инновационной школы. – Саров, 5 – 7 апреля 2023 г. С.: СарФТИ НИЯУ МИФИ, 2023.– С. 331 – 332.

18. Чиркин М.В., Устинов С.В., Мишин В.Ю., Серебряков А.Е. Импедансно-резонансная спектроскопия в гелий-неоновых лазерах// Сборник материалов 52 Международной Тулиновской конференции по Физике Взаимодействия Заряженных Частиц с Кристаллами (МТК-52). – Москва, 30 мая – 1 июня 2023 г.: МГУ им М.В. Ломоносова, 2023. – С. 173 – 174.

Устинов Сергей Владимирович

**ИОНИЗАЦИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ СИММЕТРИЧНОГО
ДВУХПЛЕЧЕВОГО РАЗРЯДА В КОЛЬЦЕВЫХ
ГЕЛИЙ-НЕОНОВЫХ ЛАЗЕРАХ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать . . . 2023. Формат бумаги 60 x 84 1/16.

Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0

Тираж 100 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.