

На правах рукописи



Дао Хоай Нам

**ВОЗМУЩЕНИЯ ИОНИЗАЦИОННОГО БАЛАНСА
В ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЕ
КОЛЬЦЕВЫХ ГЕЛИЙ-НЕОНОВЫХ ЛАЗЕРОВ**

Специальность 05.27.02 – Вакуумная и плазменная электроника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань – 2019

Работа выполнена на кафедре «Электронные приборы» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» (ФГБОУ ВО «РГРТУ»), г. Рязань.

Научный руководитель:

Чиркин Михаил Викторович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электронные приборы», ФГБОУ ВО «РГРТУ».

Официальные оппоненты:

Волков Степан Степанович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Автомобильная техника», Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования "Рязанское гвардейское высшее воздушно-десантное ордена Суворова дважды Краснознаменное командное училище имени генерала армии В. Ф. Маргелова" Министерства обороны Российской Федерации, г. Рязань.

Шатилов Сергей Германович, кандидат технических наук, старший программист, Общество с ограниченной ответственностью "Научно-исследовательский центр "БУЛАТ", г. Москва.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва.

Защита состоится «10» сентября 2019 г. в зале ученого совета, аудитория 235, в 11 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.211.03. ФГБОУ ВО «РГРТУ» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1 (<http://www.rsreu.ru/contacts>).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «РГРТУ», а также на сайте <http://www.rsreu.ru/post-graduate/dissertatsii>.

Автореферат разослан «__» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.ф.-м.н., доцент



В.Г. Литвинов

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследований. Симметричный двухплечевой разряд постоянного тока в узких каналах, заполненных смесью гелия и неона, в диапазоне параметров $pR = 100 - 120$ Па·см, $I/R = 0,5 - 1,0$ мА/см, где p – давление газовой смеси, I – ток в плече разряда, R – радиус разрядного канала, применяется для возбуждения активной среды кольцевых лазеров, являющихся чувствительными элементами прецизионных датчиков углов поворота и угловых скоростей. Использование таких датчиков в системах автономной инерциальной навигации предъявляет жесткие требования к стабильности их выходных сигналов. Важным источником ошибок при решении навигационной задачи являются погрешности лазерных гироскопов, вызванные невзаимностью встречных волн, генерируемых кольцевым лазером (Квантовая электроника, 2018, т. 48, № 3, с. 283-289). Одна из причин так называемой токовой невзаимности кольцевого лазерного гироскопа, - дрейф атомов неона в газоразрядной плазме, обусловленный передачей импульса направленного движения при столкновениях атомов с заряженными частицами: эффект Лэнгмюра, резонансная перезарядка, диссоциативная рекомбинация с участием молекулярных ионов.

Использование двухплечевого разряда с искусственной стабилизацией токов позволяет подавить систематическую составляющую погрешности, связанной с токовой невзаимностью («сдвиг нуля» лазерного гироскопа). Однако в выходном сигнале гироскопа присутствует нестационарная составляющая – нестабильность дрейфа, характеризующаяся разбросом отсчетов угловой скорости порядка 10^{-2} °/час. При временах усреднения, превышающих 10 секунд, она становится сопоставима со случайными блужданиями углового положения, обусловленными использованием ошумленной частотной подставки. Нестабильность дрейфа, равная 0,005 °/час, приводит к неопределенности пространственного положения в один километр через час автономной работы навигационной системы. По этой причине столь малая составляющая случайной погрешности играет важную роль при оценке целесообразности применения лазерных гироскопов в инерциальной навигации.

Анализ результатов научных публикаций не позволяет однозначно интерпретировать причины медленных нестационарных

изменений дрейфовых потоков атомов неона в плечах газового разряда в условиях стабилизации токов с точностью не хуже 0,1 мкА. Известно, однако, что в плазме положительного столба возможны изменения ионизационного баланса вследствие изменения скорости Пеннинг-ионизации атомов посторонних примесей при их относительном содержании в газовой смеси $10^{-4} - 10^{-5}$. Данный эффект используется, в частности, для оценки скорости деградации активной среды в кольцевых гелий-неоновых лазерах (патент РФ № 2402833, 2010 г.). Таким образом, возникает необходимость в исследованиях связи медленной нестационарной составляющей, присутствующей в сигнале лазерного гироскопа, с изменениями электрических характеристик разряда постоянного тока, вызванными влиянием скорости реакции Пеннинга на ионизационный баланс в положительном столбе.

Цель настоящей работы заключается в идентификации механизмов возмущений плазмы двухплечевого тлеющего разряда постоянного тока в гелий-неоновой смеси, вызывающих нестабильность сигнала лазерного гироскопа с частотами менее 10^{-1} Гц. Достижение поставленной цели требует решения **следующих задач**:

1. Разработка экспериментальных установок для исследования возмущений плазмы двухплечевого тлеющего разряда в кольцевом гелий-неоновом лазере и их влияния на выходной сигнал лазерного гироскопа.

2. Поиск возможностей для разделения нестационарных составляющих в сигнале лазерного гироскопа, вызванных случайными блужданиями углового положения, и возмущениями ионизационного баланса в газоразрядной плазме, и их реализация в алгоритмах обработки экспериментальных данных.

3. Моделирование ионизационного баланса в положительном столбе разряда, являющегося активной средой кольцевого гелий-неонового лазера, и определение причины высокой чувствительности его электрических характеристик к наличию в гелий-неоновой смеси малого содержания посторонних примесей.

4. Определение возмущений напряженности продольного электрического поля в положительном столбе вследствие нестабильности потоков посторонних примесей из стенок моноблока и их связи с нестационарной составляющей в выходном сигнале лазерного гироскопа.

Научная новизна работы:

1. Создана математическая модель положительного столба двухплечевого газового разряда в кольцевом лазере, позволившая

теоретически обосновать высокую чувствительность электрических характеристик разряда к наличию в гелий-неоновой смеси посторонних примесей и рост напряжения поддержания разряда при увеличении температуры газа.

2. Разработана экспериментальная установка для комплексных исследований нестационарных процессов в газоразрядной плазме кольцевого лазера, реализующая в условиях испытаний накопление больших объемов измеренных данных.

3. Экспериментально обоснована связь изменений напряжений поддержания двухплечевого разряда с нестационарной составляющей в выходном сигнале лазерного гироскопа.

4. Идентифицирована причина возмущений ионизационного баланса в двухплечевом разряде при непрерывном функционировании кольцевого гелий-неонового лазера в течение времени от единиц до десятков часов, заключающаяся в изменениях потока примесных атомов из стенок разрядного канала в газовую смесь.

Практическая значимость работы:

1. Разработанная математическая модель плазмы положительного столба, учитывающая Пеннинг-ионизацию, является основой для усовершенствования технологии промышленного производства кольцевых гелий-неоновых лазеров.

2. Обоснованный механизм формирования электрических характеристик положительного столба позволяет разработать схемотехнические решения для поддержания стабильного состояния симметричного двухплечевого разряда в кольцевом гелий-неоновом лазере.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Экспериментально зарегистрированные частотные зависимости комплексного сопротивления положительного столба в диапазоне $0,2 \div 1,0$ кГц содержат информацию об изменениях величины концентрации нейтральных атомов в разрядных каналах кольцевого гелий-неонового лазера при возмущениях условий поддержания двухплечевого разряда.

2. Флуктуации парциального давления посторонних примесей в активной среде кольцевого гелий-неонового лазера возмущают скорость Пеннинг-ионизации и напряженность продольного электрического поля в положительном столбе с коэффициентом передачи $10 \text{ В}/(\text{см} \cdot \text{Па})$.

3. Различие скоростей роста напряжений горения для плеч газового разряда в кольцевом гелий-неоновом лазере вызывает появление нестационарной составляющей в выходном сигнале лазерного гироскопа, достигающей 0,03 %/час в условиях стабилизации токов накачки и подавления шума выходного сигнала в диапазоне частот, превышающих 10^{-2} Гц.

Апробация результатов исследования осуществлена в публикациях, докладах и выступлениях на следующих конференциях: XXV Международной конференции по интегрированным навигационным системам (ICINS), г. Санкт-Петербург – 2018; I Международном научно-техническом форуме «Современные технологии в науке и образовании», г. Рязань – 2018; II Международной научно-технической и научно-методической конференции «Современные технологии в науке и образовании», г. Рязань – 2017; XXI Всероссийской научно-технической конференции «Новые информационные технологии в научных исследованиях», г. Рязань – 2016.

Публикации. По материалам диссертации опубликованы 6 работ, в том числе две статьи – в журналах, входящих в перечень ВАК.

Вклад автора заключается в участии в разработке экспериментальных методов исследования и их осуществлении, в проведении численных расчетов, написании научных статей и их подготовки к публикациям.

Объем и структура диссертации: Диссертация состоит из введения; четырех глав, заключения, списка литературы. Общий объем диссертации 134 страницы, включая 5 таблиц, 56 рисунков. Список использованной литературы содержит 69 наименований.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Изложены основные научные положения, выносимые на защиту и приведены сведения об апробации работы.

Первая глава диссертации представляет собой аналитический обзор публикаций, в которых приведены исследования нестационарных процессов в активной среде кольцевого резонатора и рассмотрены теоретические объяснения механизмов появления невзаимности встречных волн.

Показано что более глубокое понимание природы невзаимности встречных волн, генерируемых кольцевым лазером, создает необходимые условия для повышения точности измерения угловой скорости с помощью лазерного гироскопа и является предпосылкой для создания навигационных систем первого класса точности.

Обзор литературы завершается конкретизацией задач диссертационной работы.

Во второй главе диссертационной работы описана разработанная экспериментальная установка (рисунок 1), для комплексных исследований характеристик двухплечевого тлеющего разряда постоянного тока в кольцевом лазере и регистрации нестационарных составляющих в выходном сигнале лазерного гироскопа. Дополнительно приведена методика экспериментальных исследований, направленных на регистрацию зависимости комплексного сопротивления положительного столба в условиях асимметричной модуляции напряжения на одном из анодов в зависимости от изменений температуры моноблока кольцевого лазера. Комплексное сопротивление положительного столба измерено в диапазоне частот $0,2 \div 70$ кГц.

В качестве объекта исследований используется лазерный гироскоп, активным элементом которого является кольцевой гелий-неоновый лазер. Гироскоп размещен на массивном основании, закрепленном на виброизолирующем фундаменте в помещении со стабильной температурой окружающей среды. Для поддержания газового разряда в кольцевом лазере аноды $A_{1,2}$ и холодный катод К соединены с источником напряжения. Стабилизаторы 2, 3 обеспечивают поддержание силы тока в каждом из плеч разряда, равной $568,0 \pm 0,1$ мкА.

Регистрация информационного сигнала с лазерного гироскопа осуществляется следующим образом:

- интерференционная картина на выходе смесительной призмы 4 с помощью секционированного фотоприемника преобразуется в электрические сигналы, пропорциональные $\sin\psi$ и $\cos\psi$, где ψ – разность фаз встречных волн, генерируемых кольцевым лазером;
- зарегистрированные квадратурные сигналы оцифрованы и обработаны в блоке обработки первичных сигналов, на выходы которого поступают отсчеты разности фаз встречных волн ψ , амплитуды колебаний угловой скорости кольцевого лазера

относительно корпуса гироскопа ω_d и амплитуд квадратурных сигналов [патент РФ №2571437, 2015 г.];

- отсчеты выходных сигналов записываются на SD-карту с объемом памяти 8 Гб, что позволяет производить непрерывные измерения продолжительностью не менее 50 часов.

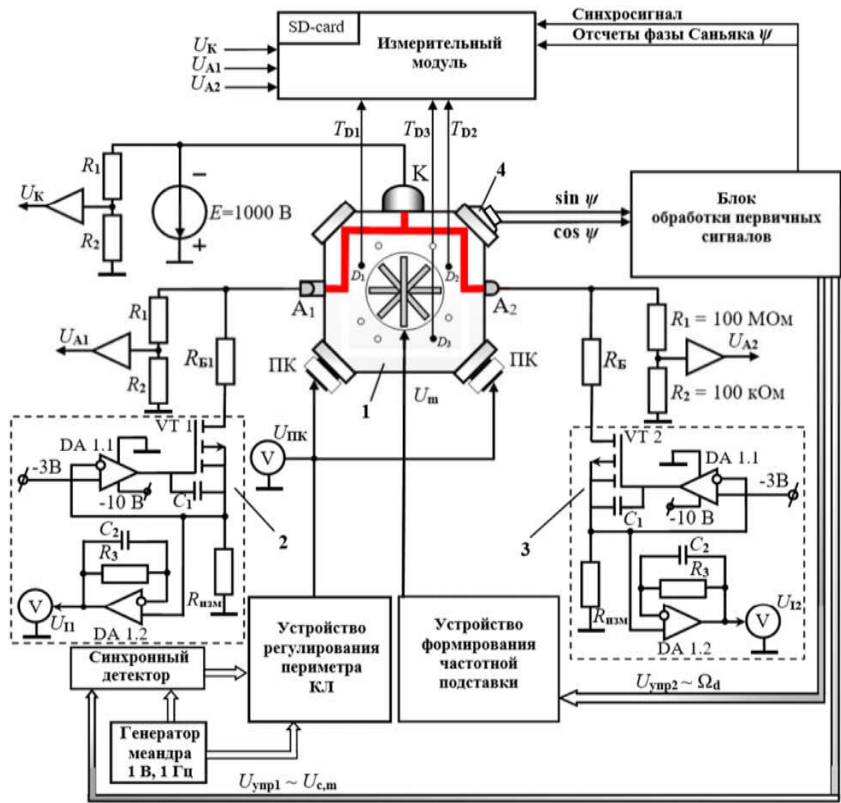


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки с цифровым измерительным модулем: 1 – кольцевой гелий-неоновый лазер, 2, 3 – стабилизаторы токов разряда, 4 – смесительная призма, ПК – пьезопреобразователи для перемещений зеркал резонатора, D_1, D_2, D_3 – температурные датчики, $R_Б, R_{Б1}$ – балластные резисторы, R_1, R_2 – делители напряжений (Основные элементы сервисной электроники лазерного гироскопа, приведены в виде блоков: устройство автоматического регулирования периметра, устройство формирования частотной подставки, блок обработки первичных сигналов)

Регистрация напряжений горения двухплечевого тлеющего разряда осуществляется с помощью измерительного модуля на базе микроконтроллера STM32F103C8T6. Измерение потенциалов катода U_K и анодов U_{A1} , U_{A2} относительно корпуса гироскопа осуществляется с помощью делителей R_1 , R_2 ; токи делителей не превышают 10 мкА. Температуры моноблока кольцевого лазера T_{D1} , T_{D2} , T_{D3} измеряются с помощью цифровых датчиков DS18B20, два из которых расположены в активной, а один – в пассивной области.

Созданная экспериментальная установка позволяет регистрировать и сохранять в цифровой форме последовательности отсчетов угловой скорости, напряжения поддержания двухплечевого тлеющего разряда в кольцевом гелий-неоновом лазере и температуры с термодатчиков D_{1-3} , расположенных внутри отверстий в ситалловом моноблоке.

Глава 3. Для оценки возмущений ионизационного баланса в положительном столбе, вызванных нестационарным потоком посторонних примесей из стенок ситаллового моноблока необходимо создать математическую модель положительного столба. Решение поставленной задачи требует знания кинетических коэффициентов и констант столкновительных процессов для газоразрядной плазмы в гелий-неоновом смеси, для расчета которых необходимо использовать решение кинетического уравнения Больцмана для функции распределения электронов по энергиям:

$$\frac{1}{3} \left(\frac{eE}{N} \right)^2 \frac{\partial}{\partial \varepsilon} \left(\frac{\varepsilon}{\sigma_m} \frac{\partial f}{\partial \varepsilon} \right) + S(f) = 0, \quad (1)$$

где ε - кинетическая энергия электрона, N - концентрация атомов газа, σ_m - транспортное сечение упругого рассеяния электронов на атомах, e – заряд электрона.

Первое слагаемое в левой части уравнения (1) отражает процесс набора энергии электронами в электрическом поле; $S(f)$ - интеграл столкновений электронов с атомами, представляющий собой в рассматриваемом диапазоне условий выражение вида:

$$S(f) = \frac{2m}{M} \frac{\partial [\varepsilon^2 \sigma_m f(\varepsilon)]}{\partial \varepsilon} + \sum_{j=1}^s [(\varepsilon + \varepsilon_j) \sigma_j (\varepsilon + \varepsilon_j) f(\varepsilon + \varepsilon_j) - \varepsilon \sigma_j (\varepsilon) f(\varepsilon)], \quad (2)$$

в котором m , M – массы электрона и атома, соответственно.

Пример рассчитанных функций распределения для двух значений отношения E/p приведен на рисунке 2.

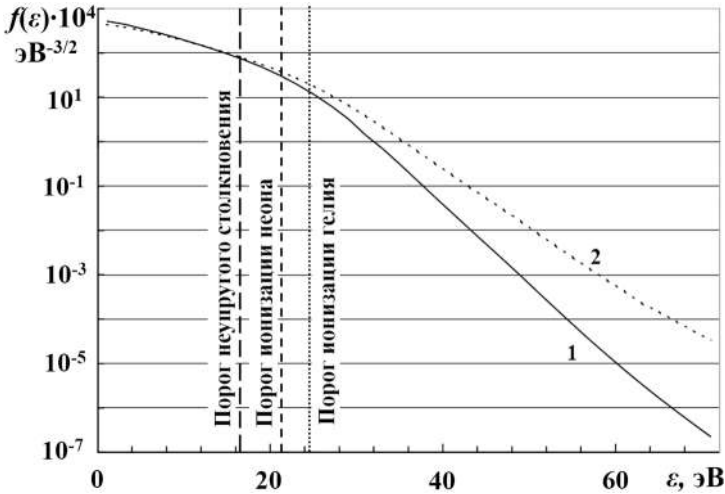


Рисунок 2 – Результаты расчета функции распределения электронов по энергиям в положительном столбе разряда в кольцевом лазере. Величина отношения E/p , В/(см·Торр): 1 – 9,25, 2 – 12,75

Динамику положительного столба описывает математическая модель, включающая уравнения баланса для концентраций электронов N_e и метастабильных атомов $N_{m,j}$, а также соотношение для силы тока I в положительном столбе:

$$v_i N_e + \sum_{j=1}^3 (K_{m,j} N_{m,j}^2 + v_{p,j} N_{m,j} + K_j N_e N_{m,j}) + K_{m,1-2} N_{m1} N_{m2} = \frac{D_e N_e}{\Lambda^2} F \left(\frac{\Lambda}{\Lambda_D} \right), \quad (3)$$

$$v_{1,2} N_e = 2K_{m,1,2} N_{m1,2}^2 + v_{p,1,2} N_{m1,2} + K_{1,2} N_e N_{m1,2} + K_{m,1-2} N_{m1} N_{m2} + K_{1,2-3} N_{m1,2} N_{Ne} + \frac{N_{m1,2}}{\tau_{1,2}}, \quad (4)$$

$$v_3 N_e + (K_{1-3} N_{m1} - K_{2-3} N_{m1}) N_{Ne} = 2K_{m,3} N_{m3}^2 + v_{p,3} N_{m3} + K_3 N_e N_{m3} + \frac{N_{m3}}{\tau_3}, \quad (5)$$

$$I = e \frac{\mu_{e,0}}{N} S N_e E, \quad (6)$$

где $\nu_{1,2,3}$ – частоты возбуждения атомов электронным ударом: 1 – He(2^3S_1), 2 – He(2^1S_0), 3 – He($1s_5$); ν_i – частота ионизации электронным ударом; L – диффузионная длина, L_D – радиус Дебая, $\tau_{1,2,3}$ – диффузионное время жизни атомов; $\nu_{p,1,2,3}$ – частота Пеннинг-ионизации; $K_{1,2,3}$ – константы скорости ступенчатой ионизации; $K_{m,1,2,3}$ – константы скоростей хемоионизации; E – напряженность продольного электрического поля в положительном столбе; e , $\mu_{e,0}/N$ – заряд и подвижность электронов; N_e , $N_{m,j}$ – концентрации электронов и метастабильных атомов.

Важная особенность положительного столба в рассматриваемых условиях заключается в значительном превышении концентрации метастабильных атомов над концентрацией электронов: типичные отношения $N_{m,3}/N_e$ находятся в диапазоне 300 – 400 (рисунок 3). Как результат, относительный вклад хемоионизации в ионизационный баланс, оказывается, существенно выше, чем для разряда в линейных гелий – неоновых лазерах. Эта же причина вызывает высокую чувствительность характеристик рассматриваемого разряда к наличию в канале примесей посторонних газов.

На рисунке 4 представлены результаты расчета напряжения на положительном столбе в зависимости от температуры газа в центре разрядного канала и частоты Пеннинг-ионизации $k_p N_p$.

Концентрация посторонних примесей N_p выбрана в диапазоне, типичном для газовой смеси в гелий-неоновых лазерах, которой соответствует парциальное давление посторонних примесей на уровне 0,1 Па, что не оказывает влияния на коэффициент усиления активной среды лазера. При её изменении на 25% мощность, рассеиваемая положительным столбом, изменится на 10 мВт даже при постоянстве тока и температуры. Регистрация напряжения поддержания разряда в кольцевом лазере обнаружила нерегулярные изменения напряжений между анодами и катодом в пределах 15 В.

Плазма двухплечевого разряда между анодами и катодом заполняет лишь часть каналов, - неравномерное выделение тепла является причиной неоднородности температурного поля внутри ситаллового моноблока. В таких условиях появление флуктуаций мощности δP , рассеиваемой положительным столбом длиной ΔL , возмущает температуру δT на оси разрядного канала. Релаксация давления газа происходит намного быстрее, чем установление

температуры, поэтому колебания концентрации и температуры газа в разрядном канале противофазны. Релаксацию возмущений температуры газа в разрядном канале описывают соотношения:

$$\frac{d\delta T}{dt} + \frac{\delta T}{\tau_T} = \frac{\delta P}{\Delta L S m N_0 c_v}, \quad (7)$$

$$\tau_T = \frac{R^2 m N_0 c_v}{2,405^2 c_p}, \quad \frac{\delta N}{N_0} = -\frac{\delta T}{T_0}, \quad (8)$$

где N_0 , T_0 , δN , δT – стационарные и флуктуационные составляющие концентрации атомов газа и температуры на оси разрядного канала, c_p – коэффициент теплопроводности газовой смеси, S – эффективная площадь поперечного сечения канала, m – масса атома, R – радиус канала, c_v – удельная теплоемкость газа при постоянном объеме.

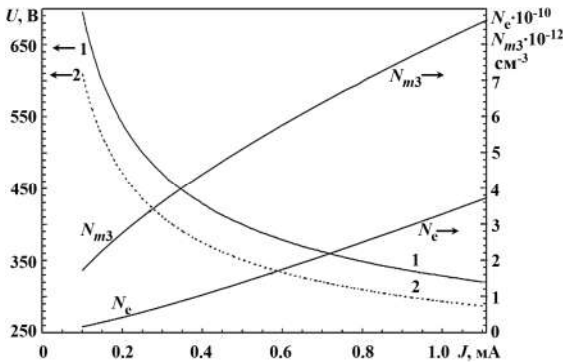


Рисунок 3 – Рассчитанные вольт - амперные характеристики положительного столба. Давление смеси 5,4 Торр, соотношение компонент 16:1, частота реакции Пеннинга, c^{-1} : 1 – 3000, 2 – 10000. Концентрации электронов и метастабильных атомов на оси разрядного канала. Давление 5,4 Торр, 16:1, частота реакции Пеннинга $10^4 c^{-1}$

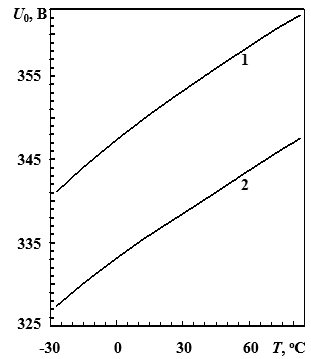


Рисунок 4 – Результаты расчета напряжения на положительном столбе в одном из плеч разряда. Ток разряда 750 мкА, частота Пеннинга-ионизации, c^{-1} : 1 – 10000, 2 – 12500

Оценка с помощью (8) времени релаксации температуры газа внутри разрядного канала τ_T дает величину порядка 10^{-4} с. Температурное поле внутри ситаллового моноблока изменяется намного медленнее: оценка времени распространения возмущений

температуры в слое толщиной 15 мм дает величину, превышающую 400 с. Перепад давлений между анодом и катодом, вызванный эффектом Лэнгмюра, пропорционален отношению силы тока к квадрату концентрации атомов I/N^2 .

В соответствии с соотношениями (7), (8) изменение мощности, рассеиваемой одним из плеч разряда, приведет к различию концентраций и потоков газа в плечах и, как следствие, к невязности встречных волн в кольцевом лазере.

В случае разряда в гелий-неоновом лазере характерные времена RL -цепочек различаются в десятки раз. Близость характерных времен $\tau_{1,2}$ к оценкам времен релаксации концентраций метастабильных атомов и электронов дает основания идентифицировать R_1L_1 -цепочку с вкладом в комплексное сопротивление ионизационных процессов с участием метастабильных атомов, а R_2L_2 -цепочку – с прямой ионизацией атомов электронным ударом.

Включение колебаний концентрации атомов в анализ уравнений (3) – (5) приводит к поправке для комплексного сопротивления Z положительного столба:

$$w(iv) = \frac{Z_0 - Z}{Z_0} \cong \frac{\alpha}{1 + iv\tau_T} \times \left(1 - \frac{\gamma}{iv}\right), \quad (9)$$

где Z_0 – комплексное сопротивление, рассчитанное для схемы замещения на рисунке 5.

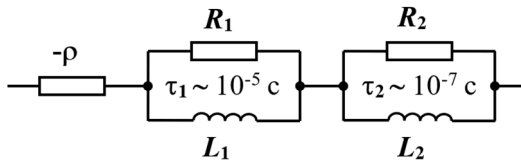


Рисунок 5 – Эквивалентная схема замещения положительного столба по переменному току для диапазона частот 2 – 70 кГц

Первое слагаемое в скобках связано с зависимостью подвижности электронов от плотности газа, а второе – отражает влияние концентрации атомов на ионизационный баланс в положительном столбе:

$$\gamma \cong 2 \frac{\eta_{e,0}}{N_0} - E_0 \frac{dk_i}{d\left(\frac{E}{N}\right)}. \quad (10)$$

Безразмерный параметр α совпадает с низкочастотным пределом коэффициента передачи от переменной составляющей рассеиваемой мощности $\delta P/P_0$ в колебания концентрации атомов $\delta N/N_0$:

$$\alpha = -\frac{\delta N}{\delta P} \times \frac{P_0}{N_0} \Big|_{\nu \rightarrow 0} = \frac{P_0 R^2}{\Delta L S A T_0}. \quad (11)$$

Таблица 1 – Параметры, характеризующие вклад модуляции концентрации атомов газа в комплексное сопротивление положительного столба в плече электрического разряда в кольцевом гелий-неоновом лазере. Ток разряда – 750 мкА

$T, \text{ К}$	$\alpha T_0, \text{ К}$	$\gamma \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$	$\tau_T, \text{ мкс}$
246	9,6	3,1	90
356	7,1	4,5	95

Выводы:

1. Причина отклонений экспериментальных данных от модели комплексного сопротивления положительного столба в виде эквивалентной схемы, включающей инерционные элементы в виде RL -цепочек, заключается в колебаниях концентрации атомов газа, вызванных модуляцией напряжения.

2. Анализ измеренного комплексного сопротивления в диапазоне частот $0,2 \div 70,0$ кГц, позволяет выделить коэффициент передачи от возмущений мощности, рассеиваемой положительным столбом, к колебаниям плотности газа в разрядном канале.

3. Возмущения мощности, рассеиваемой положительным столбом, вызванные флуктуациями скорости выделения посторонних примесей из стенок ситаллового моноблока, способны привести к невзаимности встречных волн в кольцевом лазере. Идентифицированный механизм реализуется даже в условиях стабилизации токов в плечах разряда и при стационарной температуре окружающей среды.

Глава 4 содержит анализ измерений выходного сигнала лазерного гироскопа, работающего в условиях регистрации вертикальной составляющей угловой скорости вращения Земли, и напряжений поддержания разряда в каждом из плеч. Обработка зарегистрированных отсчетов угловой скорости $\langle \Omega \rangle$ осуществлена методом вариации Аллана (рисунок 6). Зависимость содержит

составляющие, типичные для лазерного гироскопа с ошумленной знакопеременной частотной подставкой: шум квантования (обратно пропорциональна первой степени времени усреднения) и угловые случайные блуждания (обратно пропорциональны квадратному корню от времени усреднения).

Рост девиации Аллана при временах усреднения, превышающих 1000 с (кривая 1, рисунок 6), свидетельствует о наличии в выходном сигнале гироскопа «медленной» нестационарной составляющей. Ее наличие связано с изменениями $\langle \Omega \rangle$ на 0,03 %/час в течение первых 8 часов измерений (рисунок 7), о чем свидетельствует отсутствие роста Девиации Аллана (кривая 2, рисунок 6) не учитывающей этот интервал времени.

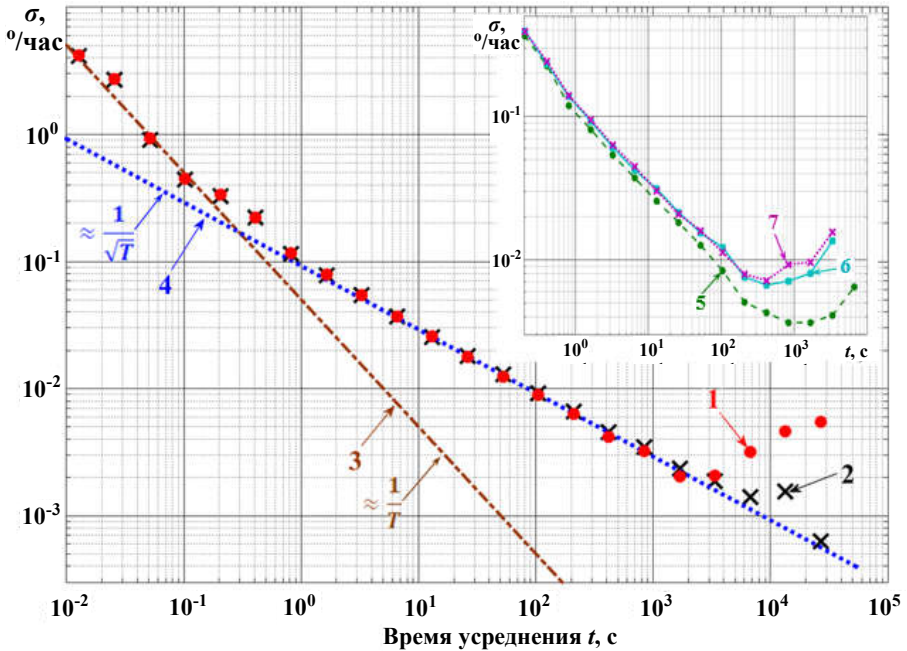


Рисунок 6 – Зависимость девиации Аллана от времени усреднения отсчетов угловой скорости вращения Земли: 1 – запуск № 1, интервал времени 1500 – 150000 с; 2 – запуск № 1, интервал времени 20000 – 150000с; 3 – составляющая, обусловленная шумом квантования; 4 – составляющая, обусловленная угловым случайным уходом; 5 – запуск № 1, интервал времени 1500 – 20000 с; 6 – запуск № 2; 7 – запуск № 3

Для практических применений в инерциальной навигации такая составляющая крайне нежелательна, поскольку является причиной быстрого роста неопределенности пространственного положения при автономном функционировании навигационной системы.

Причины появления описанной выше «медленной» нестационарной составляющей в выходном сигнале гироскопа связаны с изменениями напряжения поддержания разряда (рисунок 8).

Соответствующие зависимости напряжений были зарегистрированы одновременно с выходным сигналом лазерного гироскопа.

Зарегистрированный монотонный рост напряжений происходит в условиях стабилизации токов, одинаковых для обоих плеч разряда. Скорость роста напряжения в плече, расположенном около откатного штенгеля (кривая 1), всегда больше, чем в противоположном (кривая 2). Через четыре часа после зажигания разряда напряжение в плече с анодом – штенгелем A_1 превышает на несколько вольт напряжение в другом плече. У обоих плеч общая прикатодная область: от точки соединения каналов в моноблоке до поверхности холодного катода. Следовательно, причина различия скоростей роста напряжений локализована в участках разряда от анодов до точки соединения каналов.

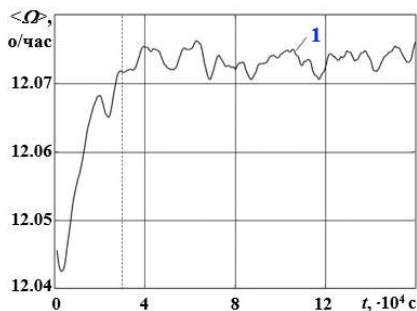


Рисунок 7 – Медленная нестационарная составляющая в отсчетах угловой скорости, выделенная с помощью вейвлет-фильтрации из выходного сигнала лазерного гироскопа

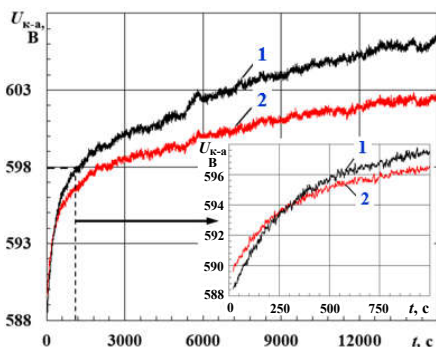


Рисунок 8 – Напряжения поддержания разряда. Плечи разряда: 1 – катод – первый анод (A_1), 2 – катод – второй анод (A_2)

Чтобы интерпретировать наблюдаемый эффект, необходимо учитывать зависимость напряжения на положительном столбе от малых концентраций легко ионизируемых примесей в газовой среде.

Расчет напряженности продольного электрического поля в положительном столбе внутри канала кольцевого гелий-неонового лазера выполнен в главе 3 с помощью решения уравнений баланса для электронов и метастабильных атомов. Отличительной особенностью рассматриваемых условий является очень высокая концентрация метастабильных атомов: только для атомов неона в состоянии $1s_5$ она имеет порядок $5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, что в пятьсот раз превышает концентрацию электронов на оси положительного столба. Последнее обстоятельство приводит к чрезвычайно высокой чувствительности состояния газоразрядной плазмы к наличию в газовой среде малых концентраций легко ионизируемых примесей. Результаты расчета показывают, что уменьшение парциального давления посторонних примесей в газовой среде на 20 % от величины порядка 0.1 Па приводит к увеличению на 4% падения напряжения на положительном столбе. При этом снижение скорости реакции Пеннинга при очищении газа компенсирует рост частоты ионизации атомов прямым электронным ударом, что требует повышенной напряженности электрического поля.

Причина роста напряжений, для графиков, приведенных на рисунке 8, заключена в самоочищении газовой смеси от посторонних примесей под действием газового разряда. Примеси (H_2O , O_2 , H_2 , CO_2), потенциалы ионизации которых меньше энергий возбуждения метастабильных атомов гелия и неона, растворены в объеме стеклокерамики. Бомбардировка стенок разрядного канала ионами плазмы вызывает выделение примесей в газовое наполнение моноблока, где последние быстро ионизируются в результате столкновений с метастабильными атомами. Ионы примесей под действием электрического поля дрейфуют в положительном столбе к холодному катоду (катафорез), где и связываются.

Выводы:

1. В кольцевом лазере нестационарная составляющая невзаимности встречных волн реализуется в условиях медленного асимметричного роста напряжений поддержания двухплечевого тлеющего разряда. Скорость увеличения напряжения выше в плече, расположенном около откачного штенгеля.

2. Ионизационный баланс в активной среде кольцевого гелий-неонового лазера возмущен потоком посторонних примесей из стенок моноблока. В условиях постоянства тока разряда и температуры окружающей среды коэффициенты передачи от парциального давления примесей в мощность, рассеиваемую положительным столбом, и напряженность продольного электрического поля составляют 0,1 Вт/Па и 10 В/(см·Па), соответственно.

3. Нестабильность потока посторонних примесей из стенок разрядных каналов кольцевого гелий-неонового лазера и вызванные ей изменения концентрации атомов газовой смеси и напряженности электрического поля в положительном столбе приводят к нестабильности дрейфа выходного сигнала лазерного гироскопа.

В заключении подводятся итоги диссертационного исследования, излагаются его основные результаты:

1. Разработаны стенды и методики измерения для долговременных исследований (не менее 50 часов) двухплечевого тлеющего разряда и нестационарных составляющих в выходном сигнале лазерного гироскопа при разных условиях поддержания разряда.

2. Разработаны расчетный и экспериментальный методы оценки характеристик положительного столба разряда в исследованном кольцевом лазере в условиях нестабильного потока посторонних примесей из стенок разрядных каналов в активную среду.

3. Проанализированы частотные зависимости комплексного сопротивления, измеренного в диапазоне частот 0,2 ÷ 70,0 кГц с помощью несимметричной модуляции двухплечевого тлеющего разряда. Полученный результат позволяет выделить коэффициент передачи от возмущений мощности, рассеиваемой положительным столбом, к колебаниям температуры и плотности газа в разрядном канале.

4. Идентифицированы конкурирующие механизмы формирования быстрых атомов неона в активной среде и их вклады в направленный газовый поток вдоль разрядного канала.

5. Количественно описано влияние на ионизационный баланс в гелий-неоновом разряде посторонних примесей в активной среде кольцевого лазера, нестабильность потока которых из стенок ситаллового моноблока вызывает изменения скорости Пеннинг-ионизации и напряженности электрического поля в положительном столбе.

6. Разработана методика обработки данных с использованием методов вариации Аллана и вейвлет-фильтрации, с помощью которой выделена нестационарная составляющая выходного сигнала в пределах 0,03 °/час в течение первых 8 часов после запуска в условиях медленного асимметричного роста напряжений поддержания двухплечевого разряда в кольцевом лазере.

Список опубликованных работ:

1. Дао Х.Н., Климаков В.В., Молчанов А.В., Чиркин М.В. Динамика газа в активной среде и неустойчивости дрейфа сигнала лазерного гироскопа // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2017. № 59. С. 136-144.
2. Дао Х.Н., Климаков В.В., Серебряков А.Е., Мишин В.Ю., Молчанов А.В., Чиркин М.В. Нестационарный ионизационный баланс в двухплечевом разряде и неустойчивость дрейфа лазерного гироскопа // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2018. № 66-2. С. 82-89.
3. A. V. Molchanov, M.V. Chirkin, A.E. Serebryakov, V.V. Klimakov, H.N. Dao, V.Yu. Mishin. The Effect of Slow Fluctuation Processes in the Ring Laser on Laser Gyro Bias Instability // Proceedings of 25-th International Conference on Integrated Navigation Systems. – St Peterburg, 2018. – P. 302 – 305.
4. Дао Х.Н., Серебряков А.Е., Чиркин М.В., Мишин В.Ю., Климаков В.В. Анализ механизмов медленных флуктуаций в лазерном гироскопе. // I Современные технологии в науке и образовании. Сборник трудов международного научно-технического форума: в 11 томах. Под общ. ред. О.В. Миловзорова. Рязань, 2018. С. 76-79.
5. Дао Х.Н., Климаков В.В. Механизмы неустойчивости «сдвига нуля» лазерного гироскопа. // I Современные технологии в науке и образовании. Сборник трудов международной научно-технической конференции. Рязань, 2017. С. 262-265.
6. Дао Х.Н. Математическое моделирование динамики газоразрядных процессов в лазерных гироскопах. // XXI Новые информационные технологии в научных исследованиях. Сборник трудов всероссийской научно-технической конференции. Рязань, 2016. С. 69-71.

Дао Хоай Нам

**ВОЗМУЩЕНИЯ ИОНИЗАЦИОННОГО БАЛАНСА
В ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЕ
КОЛЬЦЕВЫХ ГЕЛИЙ-НЕОНОВЫХ ЛАЗЕРОВ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 03.07.2019. Формат бумаги 60×84 1/16.

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

Тираж 100 экз.

ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический
университет им. В.Ф. Уткина»

390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.