

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 62-933.2, 62-932.4, 533.9

ДИНАМИКА ГАЗА В АКТИВНОЙ СРЕДЕ И НЕСТАБИЛЬНОСТЬ ДРЕЙФА СИГНАЛА ЛАЗЕРНОГО ГИРОСКОПА

Х. Н. Дао, аспирант РГРТУ; daohoainam.ryazan@gmail.com

В. В. Климаков, к.т.н., доцент кафедры ПЭЛ РГРТУ; v.klimakov@mail.ru

А. В. Молчанов, к.т.н., доцент, начальник отделения АО «Московский институт электромеханики и автоматики», г. Москва; a.v.molchanov@mail.ru

М. В. Чиркин, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой ЭП РГРТУ; chirk.mikhail@yandex.ru

Выполнен анализ нестационарных потоков газа в кольцевом гелий-неоновом лазере, приводящих к медленным флуктуациям выходного сигнала лазерного гироскопа.

***Цель работы** – регистрация влияния мощности, рассеиваемой участками разряда, на потоки газа внутри кольцевого резонатора. Предложена методика экспериментальных исследований колебаний плотности газа в активной среде лазера с помощью несимметричной модуляции двухплечевой тлеющей разрядки. Обоснован механизм формирования флуктуаций мощности, рассеиваемой положительным столбом, который заключается в хаотических колебаниях скорости Пеннинг-ионизации, вызванных изменениями потоков посторонних примесей из стенок разрядных каналов в газовую смесь. Реализация такого механизма сопровождается возмущениями потока газа вдоль оптической оси кольцевого резонатора даже в условиях стабилизации электрических токов в плечах разряда и температуры окружающей среды.*

***Ключевые слова:** кольцевой лазер, лазерный гироскоп, неустойчивость дрейфа, двухплечевой разряд, положительный столб, Пеннинг-ионизация.*

DOI: 10.21667/1995-4565-2017-59-1-136-144

Введение

Гироскопы на основе кольцевых гелий-неоновых лазеров являются прецизионными датчиками угловых скоростей в инерциальной навигации [1]. Одной из составляющих случайной погрешности гироскопа, определяющей класс точности навигационной системы, является неустойчивость дрейфа информационного сигнала (неустойчивость сдвига нуля, bias (in)stability), которая вызывает медленные случайные изменения результатов измерений углового положения [2, 3]. Неустойчивость дрейфа гироскопов, равная 0,005°/час, через час автономной работы инерциальной навигационной системы приводит к случайной погрешности определения пространственного положения в один километр [4]. Методика оценки неустойчивости дрейфа с помощью вариации Аллана [5] требует

длительных испытаний и тщательной проверки достоверности полученных данных.

Причиной «сдвига нуля» у лазерного гироскопа является направленное движение возбужденных атомов неона в активной среде кольцевого гелий-неонового лазера под действием газового разряда (эффект Лэнгмюра) [4, 6, 7]. Чтобы уменьшить постоянную составляющую и флуктуации сдвига нуля активная среда создается газовым разрядом в симметричном промежутке, токи в двух идентичных плечах которого направлены навстречу друг другу, а их величины стабилизируются с точностью не хуже 0,1 мкА. Такие меры не исключают неустойчивость генерируемых лазером встречных волн, поскольку перераспределения температурного поля внутри кольцевого лазера сопровождаются газовыми потоками [6]. Таким образом, неустойчивость мощности, рассеиваемой тлеющим разрядом,

создает нестационарную составляющую в сигнале лазерного гироскопа.

Цель работы заключается в создании методики регистрации влияния изменений мощности, рассеиваемой участками двухплечевого разряда, на потоки газа внутри кольцевого резонатора и оценке неустойчивости дрейфа выходного сигнала лазерного гироскопа.

Нестабильность дрейфа лазерного гироскопа и температурное поле в кольцевом лазере

Исследован кольцевой гелий-неоновый лазер с моноблоком из оптической стеклокерамики (ситалла СО-115М), внутри которого высверлены четыре канала диаметром 2,7 мм, длиной 52 мм и четыре цилиндрические полости А – D диаметром 9 мм и высотой 23 мм (рисунок 1). Суммарное давление гелий-неоновой смеси составляет 750 Па, соотношение компонент He:Ne = 16:1. К моноблоку присоединены четыре зеркала кольцевого резонатора, два медных анода А1, А2 и холодный катод из алюминия. Объемы полости внутри катода и полостей А – D на порядок превышают объемы узких каналов. Длины разрядных каналов ΔL от точки их соединения около катода до анодов составляют 63 мм.

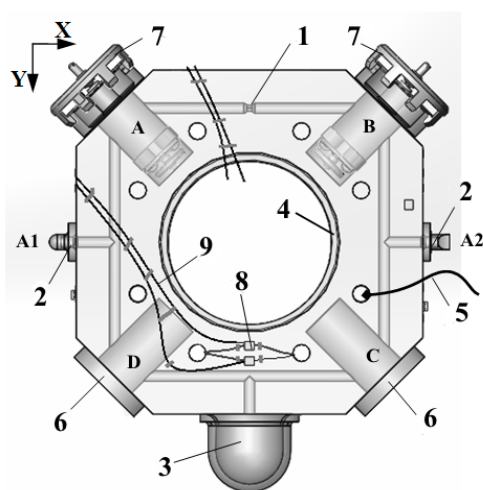


Рисунок 1 – Конструкция исследуемого кольцевого лазера: 1 – диафрагма, 2 – аноды, 3 – холодный катод, 4 – кольцо для крепления виброподвеса, 5 – датчик температуры, 6 – плоские зеркала, 7 – пьезоэлектрические преобразователи, 8 – устройство для зажигания разряда, 9 – проводники

Рисунок 2 иллюстрирует зависимость девиации Аллана σ_{Ω} от времени усреднения отсчетов угловой скорости Ω , выполненных лазерным гироскопом с вибрационной частотной подставкой, чувствительным элементом которого является описанный кольцевой лазер. Вариация Аллана σ_{Ω}^2 получена с помощью обработки отсчетов

угловой скорости по методике, описанной в [5]. Отсчеты были зарегистрированы с частотой механической вибрационной подставки (416 Гц) в течение 16 часов непрерывной работы гироскопа, размещенного на виброизолирующем фундаменте в помещении со стабильной температурой. Прямая 2 соответствует составляющей погрешности, вызванной белым шумом в отсчетах угловой скорости, обратно пропорциональной квадратному корню из времени усреднения. Основная причина шума – обратное рассеяние лазерного излучения в кольцевом резонаторе [7–9]. Кроме белого шума, в выходном сигнале гироскопа обнаружены узкополосные нерегулярные колебания со средними значениями амплитуды и частоты 0,01 °/час и 0,25 мГц, которым соответствует локальный максимум на кривой 1. Участок зависимости, где девиация Аллана не зависит от времени усреднения, типичный в условиях доминирования фликкер-шума [2], в рассматриваемой ситуации не обнаружен. Однако в случае выборки продолжительностью менее трех часов недостаток информации приведет к ошибочной идентификации источника случайной погрешности с фликкер-эффектом (прямая 3).

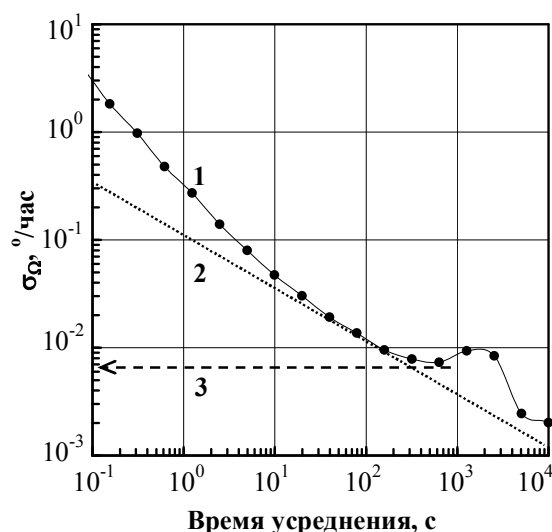


Рисунок 2 – Зависимость девиации Аллана [5] от времени усреднения отсчетов лазерного гироскопа (кривая 1) и её составляющая, обусловленная угловыми случайными уходами (прямая 2). Прямая 3 – оценка долгосрочной неустойчивости

В случае длительной автономной работы инерциальной навигационной системы медленные узкополосные осцилляции отсчетов угловой скорости, присутствующие в сигналах гироскопов, ограничат точность определения пространственного положения. Поэтому необходимо идентифицировать источник флуктуаций газовых потоков в кольцевом резонаторе, вызывающий долгосрочную неустойчивость выходного

сигнала гироскопа, которой соответствует подъем кривой 1 при временах усреднения порядка 1000 с, даже при постоянных токах в плечах разряда и температуре окружающей среды.

Плазма двухплечевого разряда между анодами и катодом заполняет лишь часть каналов, что является причиной неоднородности температурного поля. На рисунке 3 представлены результаты регистрации температурного поля на поверхности моноблока с помощью тепловизионной камеры Gobi 640 при температуре окружающей среды 20°C и токах 750 мкА в каждом плече разряда. Флуктуации мощности δP , рассеиваемой положительным столбом длиной ΔL , приводят к возмущениям температуры δT на оси разрядного канала и вытеснению газа в полости А – D. Релаксация давления газа происходит намного быстрее, чем установление температуры, поэтому колебания концентрации и температуры газа в разрядном канале противофазны.

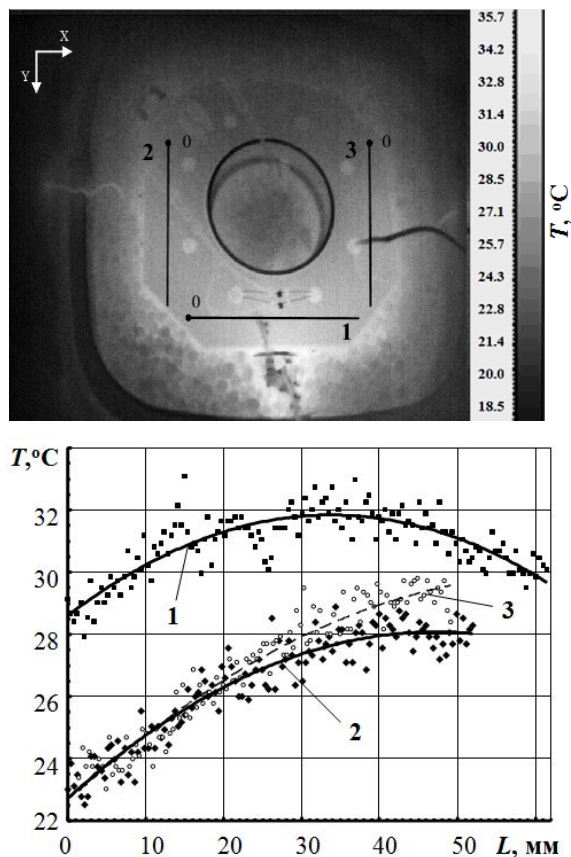


Рисунок 3 – Температурное поле на поверхности моноблока кольцевого лазера и распределения температуры вдоль прямых 1,2,3. (Температура окружающей среды +20 °C)

Релаксацию возмущений температуры газа в разрядном канале описывает уравнение:

$$\frac{d\delta T}{dt} + \frac{\delta T}{\tau_T} = \frac{\delta P}{\Delta L S m N_0 c_v}, \quad (1)$$

$$\tau_T = \frac{r_0^2 m N_0 c_v}{2,405^2 \Lambda}, \quad \frac{\delta N}{N_0} = -\frac{\delta T}{T_0}. \quad (2)$$

где N_0 , T_0 , δN , δT – стационарные и флуктуационные составляющие концентрации атомов газа и температуры на оси разрядного канала, Λ – коэффициент теплопроводности газовой смеси, S – эффективная площадь поперечного сечения канала, m – масса атома, r_0 – радиус канала, c_v – удельная теплоемкость газа при постоянном объеме. Оценка (2) 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 [7], пропорционален отношению силы тока к квадрату концентрации атомов I/N^2 [10]. В соответствии с соотношениями (1), (2) изменение мощности, рассеиваемой одним из плеч разряда, приведет к различию концентраций и потоков газа в плечах и, как следствие, к невязимости встречных волн в кольцевом лазере. Измеренный сдвиг нуля у рассматриваемого лазерного гироскопа $\Delta\Omega/\Delta I$ составляет $20^\circ/(\text{час}\cdot\text{мА})$, где ΔI – разность токов разряда. При одинаковых токах разность потоков газа вследствие флуктуации δN плотности атомов в одном из плеч создает невязимости встречных волн, что эквивалентно вращению кольцевого резонатора с угловой скоростью:

$$\delta\Omega = 40 I_0 \frac{\delta N}{N_0} \quad (^\circ/\text{час}), \quad (3)$$

где I_0 – сила тока (мА) в плече разряда.

Чтобы выполнить количественную оценку $\delta\Omega$ с помощью соотношения (3), необходимо получить информацию о величине коэффициента передачи от колебаний рассеиваемой мощности в колебания концентрации газа. Возможность экспериментального решения этой задачи предоставляет экспериментальная методика несимметричной модуляции двухплечевого разряда гармоническим сигналом, развитая в работе [11], а также модель, основанная на уравнениях баланса электронов и метастабильных атомов [12].

Математическая модель модулированного положительного столба

Динамику положительного столба описывают дифференциальные уравнения баланса для концентраций электронов n_e и метастабильных атомов M , а также соотношение для силы тока I в положительном столбе [13]:

$$\frac{dn_e}{dt} = k_i \left(\frac{E}{N} \right) N n_e + k_s M n_e +$$

$$+ k_m M^2 + k_p N_p M - \eta_e (n_e) \frac{n_e}{N}. \quad (4)$$

$$\frac{dM}{dt} = k_e \left(\frac{E}{N} \right) N n_e - k_s M n_e -$$

$$- 2k_m M^2 - k_p N_p M - \eta_m \frac{M}{N}, \quad (5)$$

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

в которых k_i , k_e – константы скоростей ионизации и возбуждения атомов газа прямым электронным ударом, k_s , k_m , k_p – константы скоростей ступенчатой ионизации, хемоионизации и Пеннинг-ионизации, n_e , M – концентрации электронов и метастабильных атомов, N – концентрация атомов гелия и неона в основном состоянии, N_p – концентрация атомов примесей в газовой смеси, E – напряженность продольного электрического поля в положительном столбе, η_e/N , η_m/N – частоты диффузионных уходов электронов и метастабильных атомов на стенки разрядного канала, e , $\mu_{e,0}/N$ – заряд и подвижность электронов.

На рисунке 4 представлены результаты расчета напряжения на положительном столбе в зависимости от температуры газа в центре разрядного канала и частоты Пеннинг-ионизации $k_p N_p$; при расчете использованы параметры скоростей ионизационных и столкновительных процессов в ионизированном газе, приведенные в [14]. Концентрация посторонних примесей N_p выбрана в диапазоне, типичном для газовой смеси в гелий-неоновых лазерах [15], 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.

В условиях слабого гармонического возмущения концентрации электронов и метастабильных атомов, напряженность поля и ток в (4) – (6) представляют собой суммы стационарных значений и малых добавок, изменяющихся с течением времени по гармоническому закону. После линеаризации вычисляется отношение комплексных амплитуд колебаний напряжения и тока, равное комплексному сопротивлению положительного столба, которое является функцией частоты гармонического возмущения ω [12].

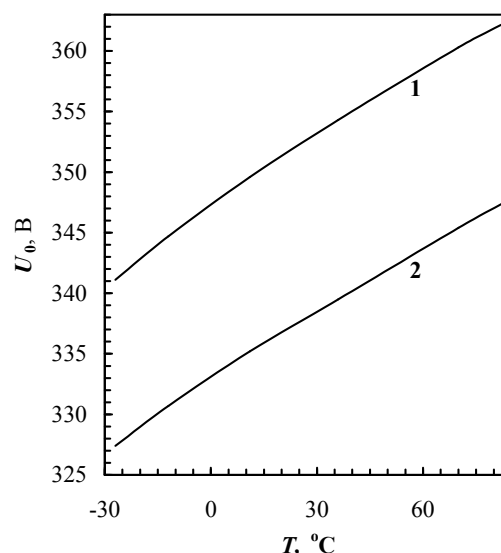


Рисунок 4 – Результаты расчета напряжения на положительном столбе в одном из плеч разряда. Ток разряда 750 мкА, частота Пеннинг-ионизации, с⁻¹: 1 – 10 000, 2 – 12 500

Реализация описанного выше подхода в предположении о постоянстве плотности газа позволяет синтезировать эквивалентную схему замещения положительного столба, изображенную на рисунке 4. Инерционные элементы (RL -цепочки) имитируют процессы релаксации концентраций метастабильных атомов и электронов, а отрицательное динамическое сопротивление $-r$ совпадает с наклоном касательной к падающей статической вольт-амперной характеристике положительного столба. Параметры эквивалентной схемы были найдены в [1] с помощью метода наискорейшего спуска, исходя из требования наилучшего соответствия экспериментально измеренной частотной зависимости комплексного сопротивления.

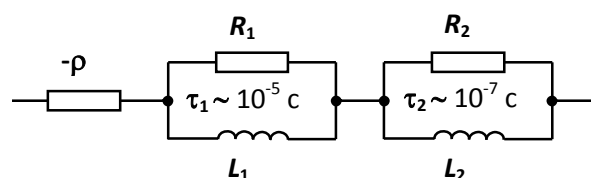


Рисунок 5 – Эквивалентная схема замещения положительного столба по переменному току

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 $R_1 L_1$ -цепочку с вкладом в комплексное сопротивление ионизационных процессов с участием метастабильных атомов, а $R_2 L_2$ -цепочку – с прямой ионизацией атомов электронным ударом.

В работе [11] для частот модуляции менее 2 кГц обнаружены отклонения экспериментальных зависимостей от приведенной выше эквивалентной схемы, которые значительно превышают погрешность измерений. В соответствии с уравнениями (1), (2) модуляция тока разряда и напряжения на положительном столбе сопровождается колебаниями концентрации атомов, которые не были учтены при синтезе данной схемы.

Включение колебаний концентрации атомов в анализ уравнений (4) – (6) приводит к поправке для комплексного сопротивления Z положительного столба:

$$w(i\omega) = \frac{Z_0 - Z}{Z_0} \cong \frac{\alpha}{1 + i\omega\tau_T} \times \left(1 - \frac{\gamma}{i\omega}\right), \quad (7)$$

где Z_0 – комплексное сопротивление, рассчитанное для схемы замещения на рисунке 5. Первое слагаемое в скобках связано с зависимостью подвижности электронов от плотности газа, а второе – отражает влияние концентрации атомов на ионизационный баланс в положительном столбе:

$$\gamma \cong 2 \frac{n_{e,0}}{N_0} - E_0 \frac{dk_i}{d(E/N)}. \quad (8)$$

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

$$\alpha = - \frac{\delta N}{\delta P} \times \frac{P_0}{N_0} \bigg|_{\omega \rightarrow 0} = \frac{P_0 r_0^2}{\Delta L S \Lambda T_0}. \quad (9)$$

Для экспериментальных исследований колебаний концентрации атомов в модулированном положительном столбе целесообразно воспользоваться соотношением (7) между комплексными сопротивлениями положительного столба Z и синтезированной схемы замещения Z_0 , соответствующей модели с постоянной концентрацией газа. Их относительное отличие $w = (Z_0 - Z)/Z_0$ быстро убывает с увеличением частоты. Это дает возможность по экспериментально зарегистрированной частотной зависимости комплексного сопротивления положительного столба $Z(i\omega)$ для области частот $\omega \gg 1/\tau_T$ синтезировать схему замещения, описывающую зависимость $Z_0(i\omega)$, а затем осуществить поиск параметров α , γ , τ_T в правой части (7) в диапазоне $\omega \leq 1/\tau_T$.

Экспериментальная установка и результаты измерений

Экспериментальная установка (рисунок 6) включает блок измерения 1 комплексного сопротивления разряда в кольцевом лазере 2, контур

охлаждения 3–8 и нагревательный элемент 9. Электрическая цепь и методика регистрации комплексного сопротивления положительного столба аналогичны использованным в работе [11]. Лазер помещен внутри теплоизолированной камеры из полипропилена 3, выполненной в виде рубашки охлаждения. Под камерой расположен измерительный блок, подключенный к электродам лазера. Чтобы обеспечить неизменность номиналов у элементов измерительных цепей в широком диапазоне изменения температуры, блок 1 отделен теплоизоляционной пластиной 4 от контура охлаждения. Теплоноситель (этиловый спирт) охлаждается в теплообменнике 6, погруженном в жидкий азот. Появление на поверхности моноблока росы на низких температурах предотвращает селикогель. Замерзание теплоносителя и появление воздушных пузырей исключено с помощью расширительного резервуара 8. Чтобы повысить температуру моноблока, использовался инфракрасный нагреватель 9, расположенный над кольцевым лазером 2, при этом емкость 7 вместо жидкого азота заполнялась горячей водой. Диапазон регулирования температуры моноблока кольцевого лазера составляет $-27^\circ\text{C} \div +83^\circ\text{C}$. Для регистрации температуры использована термопара мультиметра APPA 207 (датчик 5 на рисунке 1).

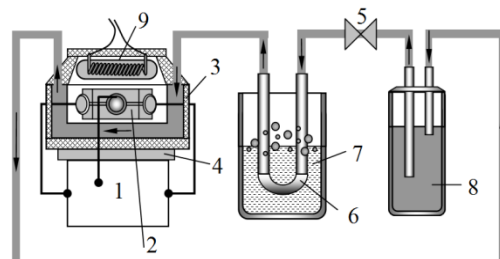


Рисунок 6 – Схема установки для исследований влияния температуры окружающей среды на комплексное сопротивление разряда в кольцевом лазере: 1 – блок измерения комплексного сопротивления, 2 – кольцевой лазер, 3 – теплоизолированная камера, 4 – теплоизоляционная пластина, 5 – насос, 6 – теплообменник, 7 – емкость с жидким азотом (или горячей водой), 8 – расширительный резервуар, 9 – инфракрасный нагреватель

Комплексное сопротивление положительного столба в диапазоне частот $0,2 \div 70$ кГц измерялось по методике, описанной в [11]. Затем определялись параметры схемы замещения (рисунок 5), соответствующие минимуму суммы квадратов модулей отклонений экспериментальных данных от результатов моделирования для диапазона частот $3 \div 70$ кГц. После экстраполяции синтезированной схемы замещения в частотную область $0,2 \div 2,0$ кГц рассчитывались зависимость $Z_0(i\omega)$ и невязка $w(i\omega)$, представленная на рисунке 7.

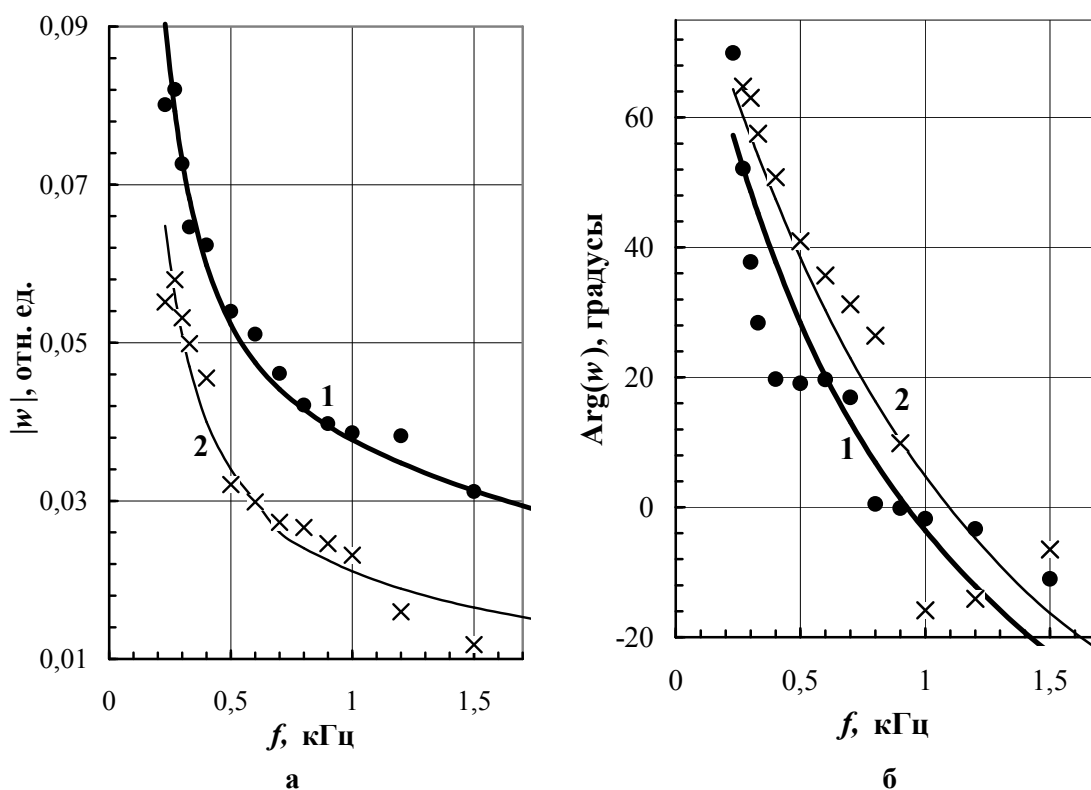


Рисунок 7 – Частотные зависимости модуля и аргумента невязки (7), отражающей вклад колебаний концентрации атомов в комплексное сопротивление. Ток разряда 750 мкА, температура моноблока, °С: 1 – -27; 2 – +83. Точки – эксперимент, сплошные кривые – расчет; в правую часть (7) подставлены значения параметров из таблицы

Поиск значений параметров α , γ , τ_T , соответствующих минимуму суммы квадратов отклонений найденных таким образом значений $w(i\omega)$ от правой части соотношения (7) также осуществлен с помощью метода наискорейшего спуска; полученные результаты приведены в таблице. Значения постоянной времени τ_T и параметра αT_0 , характеризующего колебания концентрации атомов δN при возмущениях рассеиваемой мощности δP , соответствуют оценкам, выполненным с помощью соотношений (2) и (9).

Таблица – 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 , К	αT_0 , К	$\gamma \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$	τ_T , мкс
246	9,6	3,1	90
356	7,1	4,5	95

Сопоставление экспериментальных данных и результатов расчета модуля и аргумента частотной зависимости $w(i\omega)$ подтверждает адекватность скорректированной модели. Подстановка в левую часть (3) средней амплитуды медленных колебаний в зарегистрированной последовательности отсчетов угловой скорости, а в

правую – соотношения (9) дает возможность оценить глубину модуляции мощности в одном из плеч:

$$\frac{\delta P}{P_0} = \frac{10^{-3}}{3\alpha}. \quad (10)$$

Использование в (10) значений параметра α из таблицы показывает, что для наблюдаемых колебаний в выходном сигнале гироскопа с частотой около 0,25 мГц при неизменных токах в плечах разряда достаточно возмущений напряжения поддержания разряда в пределах $\pm 1\%$ от его номинальной величины. Как следует из рисунка 4, к такой нестабильности напряжения способны привести изменения частоты Пеннинг-ионизации в пределах $\pm 1000 \text{ с}^{-1}$, чему соответствуют изменения парциального давления посторонних примесей в газовой фазе порядка 0,01 Па.

Колебательный характер наблюдаемых изменений количества атомов легко ионизируемых примесей в газовой фазе связан с механизмом их выделения из стенок разрядного канала. Ионы движутся к стенкам канала, ускоряясь в пристеночной области скачка потенциала. Величина последнего монотонно увеличивается при росте напряженности продольного электрического поля в положительном столбе. Увеличение скорости Пеннинг-ионизации вызывает уменьшение

напряженности продольного поля и, следовательно, средней энергии ионов, бомбардирующих стенки канала. Поэтому всплеск концентрации атомов примесей в положительном столбе в течение нескольких десятков минут устраняется катафорезом. Очищение газовой смеси сопровождается ростом продольной составляющей напряженности электрического поля и пристеночного скачка потенциалов. Таким образом, создается предпосылка для нового выброса атомов примесей из стеклокерамики в газовую фазу.

Важная особенность предложенного механизма заключена в резком различии времен релаксации температуры газа в разрядном канале $\tau_T \sim 10^{-4}$ с и температурного поля внутри стеклокерамического моноблока (тысячи секунд). Таким образом, локальные нестационарные изменения состава газа препятствуют подавлению колебаний его плотности.

Заключение

Результаты исследований возмущений концентрации атомов и газовых потоков в кольцевом гелий-неоновом лазере сводятся к следующему.

1. Причина отклонений экспериментальных данных при измерениях комплексного сопротивления положительного столба симметричного двухплечевого разряда по методике, разработанной в [11], от моделирования эквивалентной схемой с инерционными элементами в виде RL-цепочек [1] заключается в колебаниях концентрации атомов газа, вызванных модуляцией напряжения на одном из анодов.

2. Анализ частотной зависимости комплексного сопротивления, измеренного в диапазоне $0,2 \div 70,0$ кГц с помощью несимметричной модуляции двухплечевого тлеющего разряда, позволяет выделить коэффициент передачи от возмущений мощности, рассеиваемой положительным столбом, к колебаниям температуры и плотности газа в разрядном канале.

3. Медленные локальные возмущения мощности, рассеиваемой положительным столбом, вызванные флуктуациями скорости выделения посторонних примесей из стенок ситаллового моноблока, способны привести к невязности встречных волн в кольцевом лазере. Идентифицированный механизм существует независимо от стабилизации токов в плечах разряда и стационарности температуры окружающей среды.

4. Подавить колебания скорости Пеннинга-ионизации с участием атомов посторонних примесей в разрядном канале возможно, выбирая технологический режим электровакуумной обработки ситаллового моноблока или внеся в конструкцию кольцевого лазера элемент, быстро

выравнивающий температурное поле, например тепловую трубу [16,17].

Авторы выражают признательность В.И. Кочелеву за помощь в регистрации температурного поля на поверхности моноблока кольцевого лазера.

Библиографический список

1. Кузнецов А. Г., Молчанов А. В., Чиркин М. В., Измайлов Е. А. Прецизионный лазерный гироскоп для автономной инерциальной навигации // Квантовая электроника. – 2015. – Т. 45. № 1. – С. 78-88.
2. Степанов О. А., Моторин А. В. Проблемно-ориентированный подход к решению задачи идентификации моделей погрешностей навигационных датчиков и оцениваемых сигналов // Материалы пленарных заседаний 9-й Российской мультikonференции по проблемам управления. – СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2016. – С. 49-59.
3. Маюров Н. А., Мишин В. Ю., Плешаков Н. С., Серебряков А. Е. Случайная погрешность лазерного гироскопа с прецизионной регистрацией квадратурных сигналов // Материалы XXX конференции памяти Н.Н. Острякова. – СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2016. – С. 36-43.
4. Lefevre H. C. The Fiber-Optic Gyroscope. London, UK: Applied Photonics, Artech House. 2014. 391 p.
5. Аллан Д. У. Вариация Аллана: история создания, преимущества и недостатки, основные области применения // Гироскопия и навигация. – 2015. – № 4. – С. 3-28.
6. Кравцов Н. В., Кравцов Н. Н. Невзаимные эффекты в кольцевых лазерах // Квантовая электроника. – 1999. – Т. 27. № 2. – С. 98-120.
7. Aronovitz F. Fundamentals of the ring laser gyro // Optical Gyros and their Application. – RTO-AG-339. – 1999. – P.3-1-3-45.
8. Чиркин М. В., Молчанов А. В., Степанов А. Ю. Статистические характеристики подложек зеркал и случайная погрешность лазерного гироскопа // Авиакосмическое приборостроение. – 2008. – № 3. – С. 9-16.
9. Чиркин М. В., Молчанов А. В., Суминов В. М. Формирование доминирующей погрешности лазерного гироскопа // Авиакосмическое приборостроение. – 2004. – № 9. – С. 12-19.
10. Грановский В. Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток. М.: Наука, 1971. 544 с.
11. Молчанов А. В., Морозов Д. А., Устинов С. В., Чиркин М. В. Модуляционные исследования газоразрядной плазмы в кольцевом гелий-неоновом лазере // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2015. № 54 (2). Часть I. С. 115-120.
12. Морозов Д. А., Степанов В. А., Чиркин М. В. Распространение возмущений в экранированном канале ионизированного газа // Известия академии наук. Серия физическая. – 2000. – Т. 64. № 7. – С. 1423-1430.
13. Чиркин М. В., Молчанов А. В., Суминов В. М. Моделирование деградиационных процессов в разряде кольцевого гелий-неонового лазера // Авиакосмическое приборостроение. – 2004. – № 9. – С. 20-24.

14. Смирнов Б. М. Возбужденные атомы. М.: Энергоиздат, 1982. 232 с.

15. Александров Л. С., Перебякин В. А., Чиркин М. В., Степанов В. А. Динамика пространственно однородной плазмы разряда в инертных газах // Физика плазмы. – 1989. – Т. 15, № 4. – С. 467-473.

16. Chirkin M. V., Klimakov V. V., Ulitenko A. I., Molchanov A. V. Passive controlling of a temperature field inside a strapdown inertial navigation system // 18-

th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS-2011 – Proceedings 18. – 2011. – P. 122–124.

17. Улитенко А. И., Климаков В. В., Молчанов А. В., Чиркин М. В. Выравнивание температурного поля в бесплатформенной инерциальной навигационной системе на лазерных гироскопах // Радиотехника. – 2012. – № 3. – С. 171 – 177.

UDC 62-933.2, 62-932.4, 533.9

GAS DYNAMICS IN ACTIVE MEDIUM AND BIAS INSTABILITY OF LASER GYROSCOPE

H. N. Dao, post-graduate student of the Department of industrial electronics, RSREU; dao.hoainam.ryazan@gmail.com

V. V. Klimakov, PhD (technical sciences), assistant professor of the Department of industrial electronics, RSREU; v.klimakov@mail.ru

A. V. Molchanov, PhD (technical sciences), assistant professor, department director of the JSC «Moscow institute of Electromechanics and Automatics»; a.v.molchanov@mail.ru

M. V. Chirkin, PhD (physical and mathematical sciences), full professor, Head of the Department of electronic devices, RSREU; chirk.mikhail@yandex.ru

The paper presents the analysis of nonstationary gas flows inside the ring helium-neon laser in connection with the bias instability of laser gyro. Asymmetric perturbations of a bilateral glow discharge make it possible to investigate gas density oscillation in laser active medium. Instabilities in the emission of contamination atoms from discharge channel wall to gas mixture disturb Penning ionization frequency. Oscillations in ionization rate lead to electric power fluctuations, which are dissipated inside the positive column. As a result internal temperature variation changes the gas flow along the ring cavity axis even if discharge currents and environment temperature are stable.

Key words: ring laser, laser gyroscope, bias instability, bilateral discharge, positive column, Penning ionization.

DOI: 10.21667/1995-4565-2017-59-1-136-144

References

1. Kuznetsov A. G., Molchanov A. V., Chirkin M. V., Izmaylov E. A. Precise laser gyroscope for autonomous inertial navigation. Quantum Electronics. 2015. Vol. 45. no. 1. pp. 78-88.

2. Stepanov O. A., Motorin A. V. Problemno-orientirovanny podkhod k resheniyu zadachi identifikatsii modeley pogreshnostey navigatsionnykh datchikov i otsenivayemykh signalov. Materialy plenarnyy zasedaniy 9-y Rossiyskoy mul'tikonferentsii po problemam upravleniya. SPb.: AO «Kontsern «TSNII «Elektropribor». 2016. pp. 49-59. (in Russian).

3. Mayurov N. A., Mishin V. Yu., Pleshakov N. S., Serebryarov A. E. Sluchaynaya pogreshnost lazernogo giroskopa s pretsizionnoy registratsiyey kvadraturnykh signalov. Materialy XXX konferentsii pamyati N.N. Ostyakov. SPb.: AO «Kontsern «TSNII «Elektropribor». 2016. pp. 36-43. (in Russian).

4. Lefevre H. C. The Fiber-Optic Gyroscope. London, UK: Applied Photonics, Artech House, 2014, 391 p.

5. Allan D. U. Allan variance: the creation history, advantages and disadvantages, the main field of application. Gyroscopy and navigation. 2015. no. 4. pp. 3-28.

6. Kravtsov N. V., Kravtsov N. N. Nonreciprocal effects in ring lasers. Quantum Electronics. 1999. Vol. 27, no. 5. pp. 98-120.

7. Aronovitz F. Fundamentals of the ring laser gyro. Optical Gyros and their Application. RTO-AG-339. 1999. pp. 3-1-3-45.

8. Chirkin M. V., Molchanov A. V., Stepanov A. Yu. Statisticheskiye kharakteristiki podlozhek zerkal i sluchaynaya pogreshnost lazernogo giroskopa. Aviakosmicheskoye priborostroyeniye. 2008. no. 3. pp. 9-16. (in Russian).

9. Chirkin M. V., Molchanov A. V., Suminov V. M. Formirovaniye dominiruyushchey pogreshnosti lazernogo giroskopa. Aviakosmicheskoye priborostroyeniye. 2004. no. 9. pp. 12-19. (in Russian).

10. Granovsky V. L. Elektricheskiy tok v gaze. Ustanovivshiysya tok. M.: Nauka. 1971. 544 p. (in Russian).

11. Molchanov A. V., Morozov D. A., Ustinov S. V., Chirkin M. V. Modulyatsionnyye issledovaniya gazoraz-

ryadnoy plazmy v koltsevom geliy-neonovom lazere. Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta. 2015. no. 54. Part I. pp. 115-120. (in Russian).

12. **Morozov D. A., Stepanov V. A., Chirkin M. V.** Rasprostraneniye vozmushcheniy v ekranirovannom kanale ionizirovannogo gaza. Izvestiya akademii nauk. Seriya fizicheskaya. 2000. Vol. 64, no. 7. pp. 1423-1430.

13. **Chirkin M. V., Molchanov A. V., Suminov V. M.** Modelirovaniye degradatsionnykh protsessov v razryade kol'tseвого geliy-neonovogo lazera. Avia-kosmicheskoye priborostroyeniye. 2004. no. 9. pp. 20-24. (in Russian).

14. **Smirnov B. M.** Vozbuzhdenkiye atomy. M.: Energoizdat. 1982, 232 p. (in Russian).

15. **Alexandrov L. S., Perebyakin V. A., Stepanov V. A., Chirkin M. V.** Spatially uniform discharge plasma dynamics in rare gases. Plasma Physics. 1989. Vol. 15. no. 4. pp. 467-473. (in Russian).

16. **Chirkin M. V., Klimakov V. V., Ulitenko A. I., Molchanov A. V.** Passive controlling of a temperature field inside a strapdown inertial navigation system. 18-th Saint Petersburg IICINS-2011 Proceedings 18. 2011. pp. 122 – 124.

17. **Ulitenko A. I., Klimakov V. V., Molchanov A. V., Chirkin M. V.** Vyravnivaniye temperaturnogo polya v besplatformennoy inertsiyalnoy navigatsionnoy sisteme na lazernykh giroskopakh. Radiotekhnika. 2012. no. 3. pp. 171–177. (in Russian).