

УДК 62-933.2:62-932.4:533.9

## УСТОЙЧИВОСТЬ ДВУХПЛЕЧЕВОГО РАЗРЯДА В КОЛЬЦЕВОМ ЛАЗЕРЕ

© 2023 г. М. В. Чиркин<sup>а</sup>, С. В. Устинов<sup>а, \*</sup>, В. Ю. Мишин<sup>а</sup>, А. Е. Серебряков<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Рязанский государственный радиотехнический университет

им. В.Ф. Уткина, Рязань, 390005 Россия

\*e-mail: [ustinow62@yandex.ru](mailto:ustinow62@yandex.ru)

Поступила в редакцию 26.06.2022 г.

После доработки 17.08.2022 г.

Принята к публикации 17.08.2022 г.

Разработан метод определения порога для развития неустойчивости газового разряда в кольцевом гелий-неоновом лазере, учитывающий распределенную емкость “положительный столб—заземленный экран”. В разработанном подходе к анализу устойчивости, положительный столб разряда заменен эквивалентной схемой, содержащей последовательное соединение отрицательного динамического сопротивления  $r$  и параллельных  $RL$ -цепочек. Синтезировать эквивалентную схему позволяют экспериментальные исследования линейной реакции газоразрядной плазмы на слабые гармонические возмущения, представленные в форме частотных зависимостей комплексного сопротивления  $Z$  положительного столба. Расчет порога развития неустойчивости в электрической цепи двухплечевого разряда лишь на основе экспериментально зарегистрированной частотной зависимости комплексного сопротивления положительного столба не позволяет распространить количественный анализ на условия за пределами диапазона условий, в котором выполнены измерения. Чтобы преодолеть данное ограничение, препятствующее поиску рабочего тока, при котором развитие неустойчивости исключено для всего температурного диапазона эксплуатации кольцевых гелий-неоновых лазеров, разработана модель, описывающая положительный столб газового разряда. Найдена граница неустойчивого состояния двухплечевого газового разряда в пространстве параметров: сопротивление балластных резисторов, температура, монтажная емкость и ток разряда. Полученные результаты позволяют обеспечить поддержание двухплечевого разряда постоянного тока в заданном диапазоне изменения температуры.

**Ключевые слова:** кольцевой лазер, инерционный процесс, ионизационная неустойчивость, положительный столб, двухплечевой разряд постоянного тока.

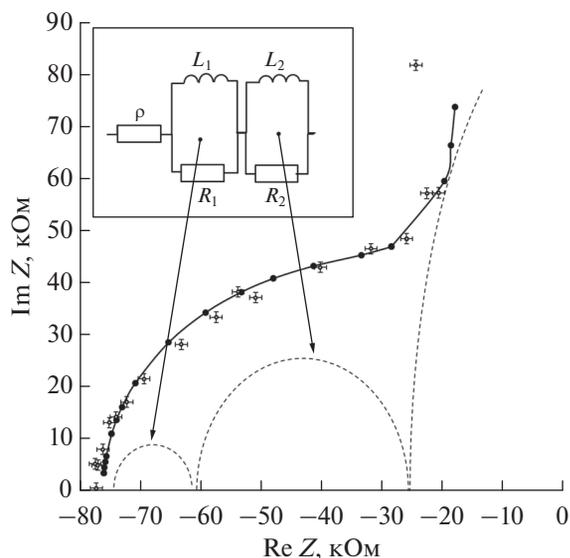
DOI: 10.31857/S1028096023050059, EDN: AKLCBH

### ВВЕДЕНИЕ

Регистрация углов поворота (составляющих вектора угловой скорости) с помощью кольцевых гелий-неоновых лазеров, функционирующих в составе бесплатформенной инерциальной навигационной системы, требует продолжительной безотказной работы кольцевых гелий-неоновых лазеров в широком температурном диапазоне. Активная среда кольцевого гелий-неонового лазера возбуждается симметричным двухплечевым разрядом постоянного тока [1], что ограничивает срок службы процессами, вызванными распылением холодного катода под действием ионной бомбардировки [2]. Возможность для снижения рабочего тока и, как следствие, увеличения ресурса лазера до 100 000 ч непрерывной работы открывают технологии формирования зеркал кольцевого резонатора со сверхслабыми потерями оптического излучения [3]. Однако разрядный промежуток кольцевых гелий-неоновых лазеров включает два протяженных участка положительного столба, характеризующиеся падающими вольтамперными

характеристиками (ВАХ). Отрицательное динамическое сопротивление газоразрядной плазмы, абсолютная величина которого растет по мере уменьшения тока, является предпосылкой развития неустойчивости электрической цепи и самовозбуждения колебаний тока и напряжения [4]. Таким образом, устойчивость разряда в кольцевом гелий-неоновом лазере необходимо гарантировать при минимально возможном токе.

Порог развития неустойчивости в электрической цепи, включающей газоразрядный промежуток, зависит от различных параметров: тока, температуры, состава и давления газовой смеси [4–6]. Температура окружающей среды в условиях эксплуатации бесплатформенной инерциальной навигационной системы изменяется в широком диапазоне [7, 8], что влияет на характеристики газового разряда, в том числе и на падение напряжения между анодами и катодом [9]. Известен подход к анализу устойчивости, в котором положительный столб разряда заменяют эквивалентной схемой, содержащей последовательное



**Рис. 1.** Частотная зависимость комплексного сопротивления разряда положительного столба в одном из плеч кольцевого лазера и ее схема замещения. Белыми точками на графике показаны экспериментальные данные, черным — результаты аппроксимации по формуле (1). На вставке представлена эквивалентная схема с соотношением параметров:  $L_1/R_1 = 13$  мкм,  $L_2/R_2 = 0.3$  мкм.

соединение отрицательного динамического сопротивления  $\rho$  и параллельных  $RL$ -цепочек [9]. Синтезировать эквивалентную схему позволяют экспериментальные исследования линейной реакции газоразрядной плазмы на слабые гармонические возмущения, представленные в форме частотных зависимостей комплексного сопротивления  $Z$  положительного столба, или расчеты комплексного сопротивления с помощью теоретической модели. Однако влияние температуры газа на динамические свойства плазмы в разрядных каналах кольцевых гелий-неоновых лазеров до настоящего времени не исследовано, что препятствует анализу устойчивости электрической цепи двухплечевого разряда при поиске приемлемой величины рабочего тока.

Целью настоящей работы являлось увеличение эксплуатационной надежности лазерного гироскопа на основе подавления неустойчивости стационарного состояния двухплечевого газового разряда в кольцевом лазере в широком диапазоне температур.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РЕГИСТРАЦИЯ КОМПЛЕКСНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ И ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА ПОЛОЖИТЕЛЬНОГО СТОЛБА

Экспериментальные исследования выполнены с помощью установки, использованной в [9] для измерения линейной реакции газового разряда на слабое гармоническое возмущение. Установка

позволяет выполнять измерения комплексных сопротивлений положительного столба  $Z(i\omega)$  в температурном диапазоне от  $-30$  до  $+85^\circ\text{C}$ ;  $i = \sqrt{-1}$ ,  $\omega$  — циклическая частота возмущения. Прибор изготовлен на основе ситаллового моноблока и наполнен смесью гелия и неона в соотношении 16 : 1 до давления 750 Па. Разрядные промежутки ограничены медными анодами и холодным катодом из алюминия. Длина каждого плеча разряда  $l$  составляла 6.3 см, диаметр разрядных каналов — 2.7 мм.

Комплексное сопротивление  $Z$  положительного столба разряда при частотах возмущения, превышающих 2 кГц, имитирует эквивалентная схема, содержащая последовательно соединенные отрицательное динамическое сопротивление и два инерционных элемента —  $RL$  цепочки [9]:

$$Z(i\omega) = \rho + \frac{i\omega\tau_1}{1 + i\omega\tau_1} R_1 + \frac{i\omega\tau_2}{1 + i\omega\tau_2} R_2. \quad (1)$$

Две  $RL$ -цепочки имитируют инерционные процессы в положительном столбе (рис. 1): первая отражает влияние на ионизационный баланс в плазме процессов с участием метастабильных атомов, вторая — вклад ионизации атомов газа прямым электронным ударом. За времена  $\tau_1 \approx 13$  мкс,  $\tau_2 \approx 0.3$  мкс устанавливаются концентрации метастабильных атомов и электронов соответственно. Результаты экспериментов и синтез эквивалентных схем при различных температурах моноблока позволили зарегистрировать монотонное уменьшение величины сопротивления  $R_1$  с ростом температуры моноблока (рис. 2); другие параметры эквивалентной схемы оказались независимыми от температуры.

Модуль отрицательного динамического сопротивления  $\rho$  (при токе в плече 750 мкА  $\rho \approx -73$  кОм) превышает величину сопротивления  $R_1$ , что исключает интерпретацию ионизации с участием метастабильных атомов в качестве единственной причины формирования падающей ВАХ у положительного столба. В рассматриваемых условиях поддержания газового разряда сохранение отрицательной действительной части у комплексного сопротивления плазмы вплоть до частот, обратных времени релаксации концентрации электронов ( $\tau_2$ ), вызвано постепенным переходом поперечной диффузии электронов от амбиполярной к свободной при уменьшении тока [10]. Уменьшение тока сопровождается ростом напряжения поддержания разряда и составляющей динамического сопротивления плазмы, связанной переходным характером диффузии электронов. В результате, при значениях частоты возмущения в несколько сотен кГц стабилизация двухплечевого разряда с помощью балластных резисторов, соединенных с анодами кольцевого гелий-неонового лазера, становится проблематичной из-за их шунтирования монтажными емкостями. Обнаруженный эффект является предпосылкой для раз-

вития неустойчивости разряда в случае внешнего нагрева кольцевого гелий-неонового лазера. Таким образом, задача идентификации причины, из-за которой температура газовой смеси в кольцевом гелий-неоновом лазере влияет на динамические свойства положительного столба, является частью проблемы анализа устойчивости стационарного состояния электрической цепи, включающей симметричный двухплечевой газоразрядный промежуток.

### РАСПРЕДЕЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА ПОРОГА РАЗВИТИЯ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ДВУХПЛЕЧЕВОГО РАЗРЯДА В КОЛЬЦЕВЫХ ГЕЛИЙ-НЕОНОВЫХ ЛАЗЕРАХ

В блоке чувствительных элементов бесплатформенной инерциальной навигационной системы кольцевые лазеры расположены внутри пермаллоевых ванночек. В таких условиях малые возмущения газоразрядной плазмы необходимо рассматривать, как процесс в активной линии передачи “положительный столб—корпус ванночки”, которая включает комплексное сопротивление единицы длины положительного столба  $z$  и распределенную емкость  $c$  между положительным столбом и корпусом ванночки. С помощью установки и методики, описанных в [10], выполнены измерения диэлектрической проницаемости ситалла в диапазоне температур  $T$  от  $-10$  до  $150^\circ\text{C}$  и диапазоне частот от  $70$  до  $200$  кГц, на основании которых выполнена аппроксимация зависимости распределенной емкости  $c$  от частоты возмущения и температуры ситалла.

Фазовое (2) и амплитудное (3) условия возбуждения автоколебаний в линии передачи “положительный столб—корпус ванночки”, нагруженной на балластные резисторы  $R_b$ , соединенные с анодами, и паразитные монтажные емкости  $C_0$  между анодами и корпусом ванночки, имеют вид:

$$2 \arg K(i\omega_0) - 2l\sqrt{2\omega_0 c (\operatorname{Im} z(i\omega_0) + |z(i\omega_0)|)} = 0, \quad (2)$$

$$|K(i\omega_0)| \exp(-2l \operatorname{Re} \gamma(i\omega_0)) \geq 1, \quad (3)$$

где  $K(i\omega)$  — коэффициент отражения волны от параллельных соединений  $R_b - C_0$ :

$$K(i\omega) = 1 - \frac{2\gamma(1 + i\omega R_b C_0)}{\gamma(1 + i\omega R_b C_0) + i\omega R_b c}, \quad (4)$$

$\gamma(i\omega)$  — комплексная постоянная распространения волны:

$$\gamma(i\omega) = \operatorname{Re} z \sqrt{\frac{2\omega c}{\operatorname{Im} z + |z|}} + i \sqrt{\frac{\omega c (\operatorname{Im} z + |z|)}{2}}. \quad (5)$$

Анализ устойчивости выполнен с учетом зависимости распределенной емкости от частоты возмущений и температуры моноблока. По результатам расчетов построены зависимости критиче-

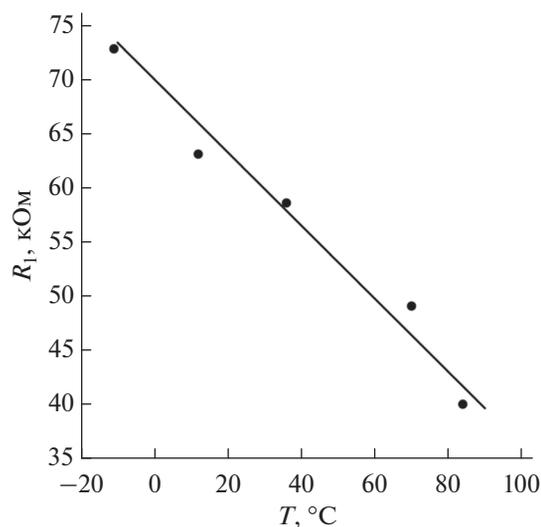
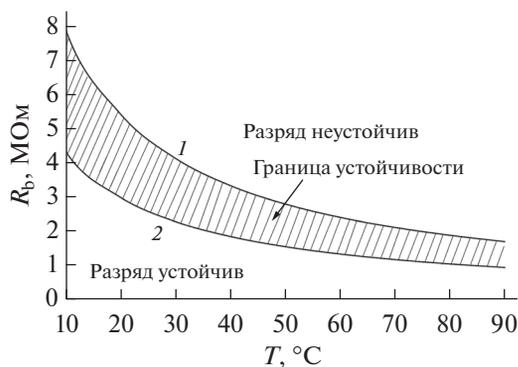


Рис. 2. Температурная зависимость сопротивления  $R_1$  в синтезированной эквивалентной схеме положительного столба при токе в плече разряда  $750$  мкА. Точки — результаты измерений, линия — линейная аппроксимация результатов.

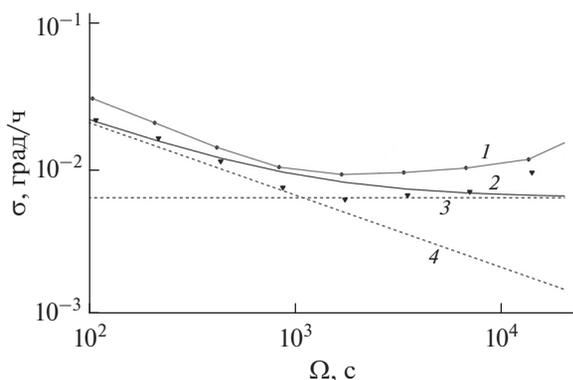
ских значений балластных сопротивлений  $R_b$  от температуры  $T$ , разделяющие область устойчивого и неустойчивого разряда (рис. 3); ниже критической кривой разряд устойчив. По мере увеличения температуры область неустойчивости стационарного состояния разряда расширяется, что соответствует уменьшению вклада ионизации метастабильных атомов в комплексное сопротивление плазмы (рис. 2). Критические кривые на рис. 2 позволяют выбрать величину балластного сопротивления  $R_b$ , обеспечивающую устойчивость стационарного состояния двухплечевого разряда, однако лишь при величине тока, для которой выполнены измерения частотной зависимости комплексного сопротивления и синтезированной эквивалентная схема. В рассматриваемом случае надежная стабилизация стационарного состояния электрической цепи требует использования балластных резисторов с сопротивлениями не более  $400$  кОм.

### АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ВАРИАЦИИ АЛЛАНА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВОЙ ПОГРЕШНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ГИРОСКОПА

В работе [11] был выполнен анализ нестационарных потоков газа в кольцевом гелий-неоновом лазере, приводящих к медленным флуктуациям выходного сигнала лазерного гироскопа. Для описания характеристик точности гироскопов существует стандарт IEEE, основанный на вычислении вариации Аллана [12, 13]. Датчик был размещен на виброизолирующем фундаменте, таким образом, чтобы его ось чувствительности была направлена вертикально вверх. При та-



**Рис. 3.** Активная линия передачи “положительный столб разряда в кольцевом гелий-неоновом лазере–корпус” и зависимости критического значения балластного сопротивления от температуры при токе в плече разряда 750 мкА. Монтажная емкость  $C_0$  составляла 3 (1) и 1.5 (2) пФ. В области под критической кривой разряд устойчив, выше границы устойчивости (заштрихованная область) – неустойчив.



**Рис. 4.** Зависимость вариации Аллана [12] для лазерного гироскопа при токах разряда 650 (1) и 560 (2) мкА. Пунктирные линии 3 и 4 соответствуют случаям неустойчивого дрейфа и случайного углового ухода соответственно.

ком расположении датчика, его выходной сигнал будет содержать следующие составляющие: проекцию угловой скорости вращения Земли на вертикаль, колебания на частоте вибрационной частотной подставки и случайную составляющую ошибки.

Изменение измеренного значения вертикальной составляющей угловой скорости вращения Земли в течение длительного времени (десятки ч) имеет немонотонный характер [11]. Сначала напряжение горения разряда растет, потом резко падает, снова растет из-за выброса посторонних примесей из стенок разрядных каналов в газовую смесь. Ток разряда при проведении измерений составлял 560–650 мкА. При неустойчивости дрейфа выходного сигнала лазерного гироскопа 6000 град/ч выбросов примесей в разряд нет. Уро-

вень неустойчивости дрейфа уменьшается в два раза из-за уменьшения тока разряда до 560 мкА. Следовательно, ток разряда необходимо уменьшать, насколько это позволяет сделать существующее качество оптики.

Выявлен предел уменьшения неустойчивости дрейфа (рис. 4). Кривые 1 и 2 являются аппроксимациями экспериментальных данных, построенные с помощью формулы [12]:

$$\sigma_1 = A/B, \quad \sigma_2 = B/T^{1/2}, \quad \sigma_3 = C, \quad (6)$$

$$\sigma = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2)^{1/2},$$

где  $\sigma_1$  – составляющая случайной ошибки, обусловленная шумом квантования;  $\sigma_2$  – угловые случайные уходы вследствие ошумления частотной подставкой;  $\sigma_3$  – неустойчивость дрейфа выходного сигнала лазерного гироскопа.  $A$ ,  $B$  и  $C$  – коэффициенты аппроксимирующей функции (6), характеризующие вклад соответствующих составляющих случайной ошибки  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$  в выходной сигнал лазерного гироскопа.

Эксперимент проводили в течение порядка 22 ч, рост напряжения стабилизировался у порога 20000 с, в это же время температура стабилизировалась и различия температур. На графике (рис. 4) видно, что при 60000 с неустойчивость дрейфа крайне мала, что явилось следствием уменьшения тока горения разряда до 560 мкА. Кроме ресурса, выявлена более важная причина с точки зрения эксплуатации кольцевого лазера – это уменьшение неустойчивости дрейфа, вызванное различием условий движения возбужденных атомов неона в активной среде. Так как единственный способ уменьшения неустойчивости дрейфа – уменьшение тока разряда, следовательно, необходимо по возможности уменьшить ток, что приводит к проблеме обеспечения стабильности горения разряда во всем диапазоне температур.

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИНЕЙНОЙ РЕАКЦИИ ПОЛОЖИТЕЛЬНОГО СТОЛБА ГАЗОВОГО РАЗРЯДА В КОЛЬЦЕВЫХ ГЕЛИЙ-НЕОНОВЫХ ЛАЗЕРАХ НА СЛАБОЕ ВОЗМУЩЕНИЕ

Расчет порога развития неустойчивости в электрической цепи двухплечевое разряда лишь на основе экспериментально зарегистрированной частотной зависимости комплексного сопротивления положительного столба не позволяет распространить количественный анализ за пределы диапазона условий, в котором выполнены измерения. Чтобы преодолеть данное ограничение, препятствующее поиску рабочего тока, при котором развитие неустойчивости исключено для всего температурного диапазона эксплуатации кольцевых гелий-неоновых лазеров, необходима модель, описывающая положительный столб газового разряда.

Модель положительного столба газового разряда, содержит уравнения баланса (7)–(10) для концентрации электронов и метастабильных атомов [14]:

$$\frac{dN_e}{dt} = v_i N_e + \sum_{j=1}^3 (K_{m,j} N_{m,j}^2 + v_{p,j} N_{m,j}) + K_{m,1} - 2N_{m,1} N_{m,2} - v_l N_e + K_{si} (N_{m,1} + N_{m,2} + N_{m,3}) N_e, \quad (7)$$

$$\frac{dN_{m,1}}{dt} = v_1 N_e - 2K_{m,1} N_{m,1}^2 - v_{p,1} N_{m,1} - K_{m,1} - 2N_{m,1} N_{m,2} - K_{1-3} N_{m,1} N_{Ne} - \frac{N_{m,1}}{\tau_{d1}} - K_{si} N_{m,1} N_e, \quad (8)$$

$$\frac{dN_{m,2}}{dt} = v_2 N_e - 2K_{m,2} N_{m,2}^2 - v_{p,2} N_{m,2} - K_{m,1-2} N_{m,1} N_{m,2} - K_{2-3} N_{m,2} N_{Ne} - \frac{N_{m,2}}{\tau_{d1}} - K_{si} N_{m,2} N_e, \quad (9)$$

$$\frac{dN_{m,3}}{dt} = v_3 N_e + (\beta_1 K_{1-3} N_{m,1} + \beta_2 K_{1-3} N_{m,2}) N_{Ne} - 2K_{m,3} N_{m,3}^2 - v_{p,3} N_{m,3} - \frac{N_{m,3}}{\tau_{d2}} - K_{slow} N_e N_{m,3} - K_{si} N_{m,3} N_e. \quad (10)$$

Безразмерные коэффициенты  $\beta_{1,2} < 1$  во втором слагаемом в правой части уравнения (10) нужны для учета потерь в результате оптических переходов из состояний  $2S_2$  и  $3S_2$  в метастабильное состояние  $1s_5$ . При построении системы уравнений баланса для концентрации электронов и возбужденных атомов учтены следующие процессы [14]:

1. Ионизация атомов гелия и неона прямым электронным ударом. Скорость процесса равна  $v_i N_e$ , где  $v_i$  – частота ионизации,  $N_e$  – концентрация электронов. Частота ионизации является быстро растущей функцией отношения  $E/N$ , где  $E$  – напряженность продольного электрического поля в разрядном канале,  $N$  – концентрация атомов газа.

2. Возбуждение атомов гелия при столкновениях с электронами. Скорость процесса –  $v_{1,2} N_e$ , где  $v_{1,2}$  – суммарные частоты возбуждения электронным ударом из основного состояния в состояния  $2^3S_1$ ,  $2^1S_0$  соответственно.

3. Возбуждение атомов неона электронным ударом. Скорость процесса  $v_3 N_e$ , где  $v_3$  – суммарная частота возбуждения атомов неона в метастабильное состояние  $1s_5$ . Частоты возбуждения атомов гелия и неона электронами – растущие функции  $E/N$ , построенные на основе численного решения кинетического уравнения Больцмана для электронов.

4. Нерезонансная передача возбуждения от метастабильных атомов He к атомам Ne. Скорости соответствующих процессов представляют собой произведения  $K_{1-3} N_{Ne} N_{m,1}$ ,  $K_{2-3} N_{Ne} N_{m,2}$ , в которых  $N_m$  – концентрации метастабильных атомов гелия в состояниях  $2^3S_1$ ,  $2^1S_0$ ,  $N_{Ne}$  – концентрация атомов неона в основном состоянии.

5. Ступенчатая ионизация при столкновениях метастабильных атомов с электронами. Скорость процесса  $k_s N_e N_m$ ,  $N_m$  – концентрация метастабильных атомов,  $k_s$  – константа скорости ступенчатой ионизации.

6. Ионизация при столкновениях метастабильных атомов (хемоионизация). Скорости соответствующих процессов равны  $K_m N_m^2$ .

7. Диффузия метастабильных атомов на стенку разрядного канала. Скорость процесса равна отношению  $N_m/\tau_d$ .

8. Ионизация при столкновениях метастабильных атомов с атомами примесей (реакция Пеннинга). Скорость процесса –  $v_p N_m$ , частота  $v_p = k_p N_p$  – произведение концентрации атомов примесей  $N_p$  и константы скорости Пеннинг-процесса  $k_p$ .

9. Диффузия электронов на стенку разрядного канала в самосогласованном поперечном поле пространственного заряда. Скорость процесса равна  $v_l N_e$ , где  $v_l$  – частота ухода электронов на стенку разрядного канала.

Для расчета комплексного сопротивления в систему уравнений баланса (7)–(9) необходимо подставить сумму стационарного решения и слабого гармонического возмущения, для поиска комплексных амплитуд которого достаточно линейного приближения. Такой подход позволяет количественно разделить вклады в отрицательное динамическое сопротивление плазмы процессов ионизации метастабильных атомов и переходного характера диффузии электронов. В уравнение баланса для электронов включена зависимость коэффициента поперечной диффузии от их концентрации и являющаяся одним из механизмов формирования падающей ВАХ положительного столба. Решение системы уравнений хотя и приводит к частотной зависимости комплексного сопротивления вида (1), однако не позволяет описать экспериментально зарегистрированную температурную зависимость для инерционного элемента эквивалентной электрической схемы, отражающего вклад метастабильных атомов в ионизационный баланс (рис. 2).

В гелий-неоновом разряде константы скоростей столкновительных процессов с участием метастабильных атомов характеризуются сильной зависимостью от температуры в случаях передачи возбуждения от метастабильных атомов гелия в состояниях  $2^3S_1$ ,  $2^1S_0$  к атомам неона [15]. Возбужденные атомы неона после двух излучательных переходов попадают в одно из близко располо-

женных состояний группы  $1s$ , два из которых метастабильные ( $1s_3$ ,  $1s_5$ ), а два других ( $1s_2$ ,  $1s_4$ ) – резонансные. Чтобы отразить температурную зависимость в системе дифференциальных уравнений, описывающих процессы возбуждения, девозбуждения и ионизации атомов, включены уравнения для концентраций атомов в каждом из перечисленных выше состояний неона и гелия; использована информация о соответствующих константах скоростей, содержащаяся в [15, 16]. В результате полученные решения для суммы концентраций атомов неона и гелия, находящихся в метастабильных состояниях, характеризуются быстрым уменьшением ее величины при росте температуры. Описанная выше последовательность столкновительных и оптических процессов приводит к передаче возбуждения от гелия в метастабильных состояниях к неону в резонансных, последний переходит в основное состояние в результате испускания вакуумного ультрафиолетового излучения, диффундирующего к стенкам разрядного канала.

В соответствии с результатами работы [9] в систему уравнений баланса необходимо включить ионизацию метастабильных атомов неона и гелия при их столкновениях с атомами и молекулами посторонних примесей (реакцию Пеннинга), даже если их парциальное давление составляет порядка 1 Па и менее. Чтобы количественно охарактеризовать вклад реакции Пеннинга в ионизационный баланс удобно использовать в качестве дополнительного параметра частоту Пеннинг-ионизации, равную количеству ионизаций, приходящихся в среднем на один метастабильный атом.

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ВЕЛИЧИНУ ТОКА ГОРЕНИЯ РАЗРЯДА

Уменьшение тока горения приводит к увеличению ресурса эксплуатации, а также к уменьшению ионного потока на катод и, как следствие, к более медленному распылению. На разрядных промежутках с уменьшением тока разряда происходит рост напряжения горения, так как ВАХ имеет падающий вид и мощность, рассеиваемая на разрядном промежутке, уменьшается, но незначительно.

Таким образом, уменьшение тока разряда необходимо для увеличения ресурса и уменьшения нестабильности дрейфа выходного сигнала лазерного гироскопа [17, 18]. Токи в плечах кольцевого лазера выровнены с высокой степенью точности ( $\pm 20$  мкА), но плечи кольцевого лазера идентичными не являются. Напряжение горения в плечах разное из-за свойств разряда в каналах, так как газовый разряд в каналах не одинаков, напряжение горения в каждом из каналов свое. В процессе работы разность напряжений горения разряда в каналах изменяется и по абсолютной величине увеличивается из-за выделения посторонних примесей. Потенциальная степень за-

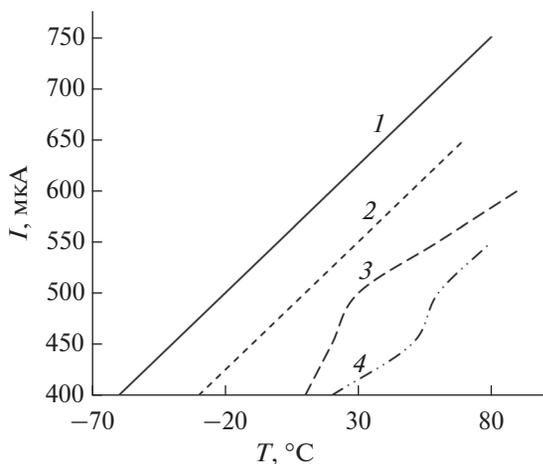
грязнения стенок разрядных каналов посторонними примесями полностью не устраняется. Эта степень загрязнения для разных плеч разная в силу как случайных обстоятельств, так и технологических особенностей откачки.

Плечи кольцевого лазера не идентичны (допуск по диаметру канала 10 мкм), выделение примесей в газоразрядный канал разное из-за ионной бомбардировки стенок канала. Ионы ускоряются электрическим полем и током, чем больше сила тока, тем выше интенсивность ионной бомбардировки. Процессы, происходящие в разрядных каналах, связаны с загрязнением газовой смеси и будут изменяться с течением времени в разных плечах по-разному. Следовательно, падение напряжения электрического поля в положительном столбе в разных каналах происходит по-разному, и эта разница будет неизбежно изменяться с течением времени. Токи разряда в плечах выровнены, а движение атомов газа под действием газового разряда не прекращается, и разница в скорости перемещения атомов будет разной из-за разницы в электрических полях. Таким образом, остается сдвиг нуля выходной характеристики лазерного гироскопа (далее – сдвиг нуля), который представляет собой выходной сигнал гироскопа в отсутствии входной скорости [19, 20]. Сдвиг нуля не стабилен, испытывает флуктуации, так как разница в электрических полях изменяется во времени, что является результатом нестабильности дрейфа выходного сигнала лазерного гироскопа, приводящее к медленному изменению сдвига нуля лазерного гироскопа. Временной масштаб этих изменений составляет 1000–10000 ч. С другой стороны, при равенстве токов в плечах напряжение горения разное, следовательно, выделяемая токовая мощность разная и приводит к различной температуре и концентрации атомов газа. Разница температур также приводит к сдвигу нуля. Так как эта разница неизбежно изменяется, то это изменение приводит к нестабильности дрейфа выходного сигнала лазерного гироскопа.

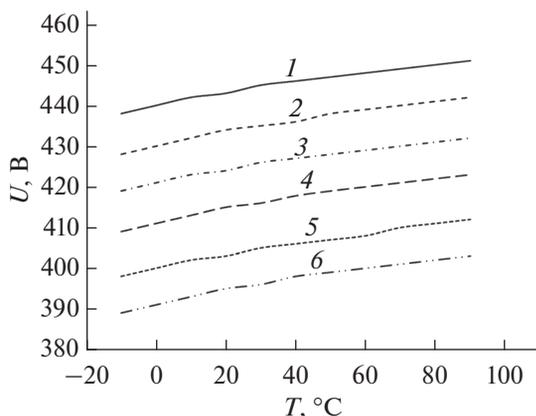
Экспериментально подтверждено, что сдвиг нуля из-за разницы температур и сдвиг нуля из-за разной напряженности полей имеют противоположные знаки. Установка температуры в плечах процесс инерционный, возникающий с задержкой примерно в 1 ч, следовательно, смещение сдвига нуля сначала в одну, потом в другую сторону. Эти процессы происходят в течение нескольких часов, а стандартное условное время полета – 8 ч. Единственная возможность борьбы с этими эффектами – это уменьшение тока горения разряда.

Результаты анализа устойчивости симметричного двухплечевого разряда в кольцевых гелий-неоновых лазерах с помощью модифицированной модели представлены на рис. 5, 6 для плоскости параметров “ток разряда–температура”.

Кольцевой лазер работает при токе горения разряда, усиление при котором в два раза превы-



**Рис. 5.** График устойчивости симметричного двухплечевого разряда в кольцевом гелий-неоновом лазере, построенный на плоскости параметров “ток разряда – температура”; 1 –  $C_{in} = 3$  пФ,  $v_p = 12000$  1/с; 2 –  $C_{in} = 1.5$  пФ,  $v_p = 12000$  1/с; 3 –  $C_{in} = 3$  пФ,  $v_p = 14000$  1/с; 4 –  $C_{in} = 1.5$  пФ,  $v_p = 14000$  1/с, где  $C_{in}$  и  $v_p$  входная емкость и скорость реакции Пеннинга соответственно.



**Рис. 6.** Зависимость напряжения горения разряда в кольцевом гелий-неоновом лазере от температуры: 1 –  $I = 500$  мкА,  $v_p = 12000$  1/с; 2 –  $I = 500$  мкА,  $v_p = 14000$  1/с; 3 –  $I = 600$  мкА,  $v_p = 12000$  1/с; 4 –  $I = 600$  мкА,  $v_p = 14000$  1/с; 5 –  $I = 750$  мкА,  $v_p = 12000$  1/с; 6 –  $I = 750$  мкА,  $v_p = 14000$  1/с, где  $I$  – ток разряда,  $v_p$  – скорость реакции Пеннинга.

шает потери, что является критерием выбора тока горения разряда [20]. Изменять величину тока разряда в зависимости от температуры необходимости нет, это усложняет систему, ухудшая эксплуатационную надежность. Экспериментальные измерения комплексных сопротивлений и синтез эквивалентных схем положительного столба, подтвердили, что порог неустойчивости кольцевого лазера зависит от температуры определенным образом: с увеличением температуры порог неустойчивости по току становится ближе к рабочему. Возникает вопрос, из каких соображений

нужно выбрать величину тока, необходим определенный математический аппарат – модель положительного столба газового разряда, содержащая уравнения баланса для концентрации электронов и метастабильных атомов. Экспериментально решить этот вопрос в полной мере не удастся, а модель это позволяет. Таким образом, мы убедились в адекватности описания эксперимента используемой модели.

При эксплуатации кольцевого лазера причин, вызывающих нестабильную работу, может быть много, они связаны с обработкой сигнала, процессами в электрической цепи и др. В настоящей работе проведена проверка возможных причин нестабильной работы кольцевого гелий-неонового лазера.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Кольцевые гелий-неоновые лазеры, которые используют в бесплатформенных инерциальных навигационных системах, должны обеспечивать регистрацию угловых скоростей в широком диапазоне температур продолжительное время. В настоящее время существует тенденция снижения рабочего тока в этих приборах и соответственно увеличения срока службы. Однако разрядный промежуток кольцевых гелий-неоновых лазеров включает два протяженных участка положительного столба, имеющих отрицательное динамическое сопротивление. Абсолютные величины этих сопротивлений растут по мере уменьшения тока, что создает предпосылки развития неустойчивости электрической цепи и самовозбуждения колебаний тока и напряжения.

Разработан метод определения порога для развития неустойчивости газового разряда в кольцевом гелий-неоновом лазере, учитывающий распределенную емкость “положительный столб – заземленный экран”. В разработанном подходе к анализу устойчивости, положительный столб разряда заменен эквивалентной схемой, содержащей последовательное соединение отрицательного динамического сопротивления  $r$  и параллельных  $RL$ -цепочек. Синтезировать эквивалентную схему позволяют экспериментальные исследования линейной реакции газоразрядной плазмы на слабые гармонические возмущения, представленные в форме частотных зависимостей комплексного сопротивления  $Z$  положительного столба.

Расчет порога развития неустойчивости в электрической цепи двухплечевого разряда лишь на основе экспериментально зарегистрированной частотной зависимости комплексного сопротивления положительного столба не позволяет распространить количественный анализ на условия за пределами диапазона условий, в котором выполнены измерения. Чтобы преодолеть данное ограничение, препятствующее поиску рабочего тока, при котором развитие неустойчивости исключено для всего температурного диапазона эксплуатации кольцевых гелий-неоновых лазе-

ров, разработана модель, описывающая положительный столб газового разряда.

Нестабильность дрейфа выходного сигнала лазерного гироскопа вследствие переноса газа в каналах кольцевого гелий-неонового лазера под действием газового разряда обусловлена изменениями напряженности продольного электрического поля в зависимости от концентрации посторонних примесей в активной среде и снижается при уменьшении тока разряда.

Рост температуры газового наполнения кольцевого гелий-неонового лазера сопровождается изменением концентрации метастабильных атомов в положительном столбе и, как следствие, увеличением частоты изменения знака у действительной части его комплексного сопротивления.

Пороговое значение тока разряда в кольцевом гелий-неоновом лазере, при котором стационарное состояние электрической цепи теряет устойчивость, является монотонно возрастающей функцией температуры газового наполнения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kolbas Yu. Yu., Grushin M. E., Gorshkov V. N. // Quantum Electronics. 2018. V. 48. № 3. P. 283.
2. Измайлов Е.А., Кухтевич С.Е., Тихомиров В.В., Стафеев Д.В., Фомичев А.В. // Гироскопия и навигация. 2015. № 2. С. 89.
3. Колбас Ю.Ю., Грушин М.Е., Горшков В.Н. // Квантовая электроника. 2018. Т. 48. № 3. С. 283.
4. Грановский В.Л. Электрический ток в газах. Установившийся ток. М.: Наука, 1971.
5. Golubovskii Y. B., Nekuchaev V. O., Porokhova I. A. // Electron Kinetics and Applications of Glow Discharges. Plenum Press, 1998. P. 137.
6. Дао Х.Н., Климаков В.В. Механизмы неустойчивости “сдвига нуля” лазерного гироскопа // Сборник трудов международной научно-технической конференции “I Современные технологии в науке и образовании”. 2017, Рязань. С. 262–265.
7. Климаков В.В., Молчанов А.В., Улитенко А.И., Чиркин М.В. // Вестник РГРТУ. 2012. № 39-2. С. 48.
8. Улитенко А.И., Климаков В.В., Молчанов А.В., Чиркин М.В. // Радиотехника. 2012. № 3. С. 171.
9. Молчанов А.В., Морозов Д.А., Устинов С.В., Чиркин М.В. // Вестник РГРТУ. 2015. № 54-2. С. 115.
10. Ермачихин А.В., Литвинов В.Г. // Приборы и техника эксперимента. 2018. С. 118. <https://www.doi.org/10.7868/S0032816218020027>
11. Дао Х.Н., Климаков В.В., Молчанов А.В., Чиркин М.В. // Вестник РГРТУ. 2017. № 59. С. 136. <https://www.doi.org/10.21667/1995-4565-2017-59-1-136-144>
12. Аллан Д.У. // Гироскопия и навигация. 2015. № 4. С. 3. <https://www.doi.org/10.17285/0869-7035.2015.23.4.003-028>
13. Авиев А.А., Енин В.Н., Санеев И.В. // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2016. № 6. С. 145.
14. Кузнецов А.Г., Молчанов А.В., Чиркин М.В., Измайлов Е.А. // Квантовая электроника. 2015. Т. 45. № 1. С. 78.
15. Виноградов В.И., Елецкий А.В. // Опт. и спектр. 1974. Т. 37. С. 850.
16. Виноградов В.И., Елецкий А.В. // Опт. и спектр. 1987. Т. 62. С. 51.
17. Поликовский Е.Ф., Молчанов А.В., Кремер В.И. Исследование случайного дрейфа лазерного гироскопа с вибрационной частотной подставкой // Материалы 3-го Международного симпозиума “Аэрокосмические приборные технологии”. 2–4 июня 2004, Санкт-Петербург, Россия. С. 28.
18. Молчанов А.В., Суминов В.М., Чиркин М.В. // Авиакосмическое приборостроение. 2004. № 9. С. 12.
19. Aronowitz F. // Opt. Gyros Appl. 1999. P. 3-1.
20. Лукьянов Д.П., Распопов В.Я., Филатов Ю.В. Прикладная теория гироскопов. СПб.: ГИЦ РФ ОАО “Концерн “ЦНИИ “Электрон”, 2015. 316 с.

### Stability of Bilateral Discharge in the Ring Laser

M. V. Chirkin<sup>1</sup>, S. V. Ustinov<sup>1, \*</sup>, V. Yu. Mishin<sup>1</sup>, A. E. Serebryakov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ryazan State Radioengineering University, Ryazan, 390005 Russia

\*e-mail: ustinow62@yandex.ru

A method has been developed for determining the threshold for the development of instability of a gas discharge in a ring helium-neon laser, taking into account the distributed capacitance “positive pole – grounded shield”. In the developed approach to stability analysis, the positive discharge of the column is replaced by an equivalent circuit, a series connection of a negative dynamic resistance  $\rho$  and balanced  $RL$ -circuits. An equivalent circuit can be synthesized by experimental studies of the linear response of a gas-discharge plasma to weak harmonic perturbations, presented in the form of frequency dependences of the complex resistance  $Z$  of a positive column. The calculation of the instability development threshold in the electrical circuit of a two-arm discharge only on the basis of the experimentally recorded frequency dependence of the complex resistance of the positive column does not allow one to extend the quantitative analysis to conditions outside the range of conditions in which the measurements were performed. To overcome this limitation, which hinders the search for the operating current, in which the development of instability is excluded for the entire temperature range of operation of ring helium-neon lasers, a model has been developed that describes the positive column of the gas discharge. The boundary of the unstable state of a two-arm gas discharge in the space of parameters is found: resistance of ballast resistors, temperature, mounting capacitance. The results obtained make it possible to maintain a two-arm DC discharge in a given range of temperature variation.

**Keyword:** ring laser, delayed process, ionization instability, positive column, bilateral dc discharge.