

УДК 62-933.2:62-932.4:533.9

НЕСТАЦИОНАРНЫЙ ИОНИЗАЦИОННЫЙ БАЛАНС В ДВУХПЛЕЧЕВОМ РАЗРЯДЕ И НЕСТАБИЛЬНОСТЬ ДРЕЙФА ЛАЗЕРНОГО ГИРОСКОПА

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

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

А. Е. Серебряков, к.т.н., доцент кафедры ЭП РГРТУ; sea89s@yandex.ru

В. Ю. Мишин, к.т.н., доцент кафедры ЭП РГРТУ; mishvalera@yandex.ru

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

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

Приведены результаты экспериментальных исследований нестационарных процессов в газоразрядной плазме и их влияния на выходной сигнал кольцевого лазерного гироскопа. Разработанная экспериментальная установка дает возможность регистрировать и сохранять в цифровой форме последовательности отсчетов угловой скорости вращения и напряжений поддержания двухплечевого тлеющего разряда в кольцевом гелий-неоновом лазере. Полученная информация обработана с помощью метода вариации Аллана и вейвлет-фильтрации. Выделена медленная нестационарная составляющая выходного сигнала гироскопа и показана ее связь с асимметричным ростом напряжений в плечах разряда. Идентифицированы особенности ионизационных процессов, способные привести к повышенной неустойчивости дрейфа. Цель работы – идентификация причин медленной неустойчивости дрейфа выходного сигнала лазерного гироскопа.

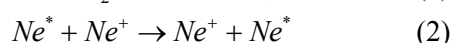
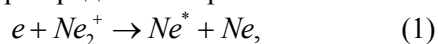
Ключевые слова: кольцевой лазер, лазерный гироскоп, неустойчивость дрейфа, двухплечевой разряд, положительный столб, Пеннинг-ионизация, диссоциативная рекомбинация.

DOI: 10.21667/1995-4565-2018-66-4-2-82-89

Введение

Проблема повышения точности инерциальной навигации включает задачу создания прецизионных гироскопов на основе кольцевых гелий-неоновых лазеров [1]. Комплектование кольцевых резонаторов зеркалами со сверхслабым рассеянием оптического излучения и применение современных цифровых методов обработки квадратурных сигналов [2, 3] создают предпосылки для частичного подавления случайной погрешности лазерных гироскопов. Однако на точность регистрации механического вращения влияют газоразрядные процессы, создающие дополнительную оптическую неустойчивость активной среды лазера [4-7].

В работах [4, 5] проанализирована оптическая неустойчивость, созданная быстрым направленным движением возбужденных атомов неона в газоразрядной плазме. Показано, что диссоциативная рекомбинация молекулярных ионов и резонансная перезарядка атомарных ионов



приводят к появлению возбужденных атомов, скорость дрейфа которых на порядки превышает среднюю скорость их теплового движения. Высокие скорости дрейфа являются причиной оптической неустойчивости, которая зарегистрирована экспериментально, несмотря на малое количество таких атомов. В [6] промоделировано влияние пленения резонансного излучения на релаксацию скорости направленного движения возбужденных атомов неона и подтверждена корректность идентификации механизмов неустойчивости. Анализ полученных результатов позволяет поставить задачу поиска влияния нестационарной составляющей в потоке возбужденных атомов неона на неустойчивости выходного сигнала кольцевого лазерного гироскопа [8, 9]. В работе [8] исследован кольцевой лазер, активная среда которого создана симметричным двухплечевым разрядом постоянного тока. Несмотря на равенство токов в плечах разряда и высокую точность их автоматической стабилизации, обнаружено существование медленной неустойчивости дрейфа выходного сигнала гироскопа.

вым газовым разрядом постоянного тока, для поддержания которого аноды $A_{1,2}$ и холодный катод К соединены с источником напряжения. В процессе электровакуумной обработки при изготовлении лазера один из анодов (A_1) был использован в качестве откачного штенгеля. Стабилизаторы 2, 3 обеспечивают поддержание силы тока в каждом из плеч разряда, равной $568,0 \pm 0,1$ мкА.

Генерируемые кольцевым лазером встречные оптические пучки распространяются в каналах моноблока, в вершинах которого расположены зеркала резонатора. Выбор напряжений на пьезопреобразователях ПК обеспечивает настройку резонатора на одну и ту же продольную моду при каждом запуске гироскопа.

Основными элементами экспериментальной установки являются: измерительный модуль, устройство автоматического регулирования периметра резонатора, стабилизатор токов в плечах разряда, устройство формирования частотной подставки, блок обработки первичных сигналов. 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. Квадратурные сигналы оцифровываются в соответствии с методикой, описанной в работах [4-6].

Блок обработки первичных сигналов включает аналого-цифровой преобразователь, программируемую логическую интегральную схему (ПЛИС) и постпроцессор. На выходы блока поступают отсчеты разности фаз встречных волн ψ , амплитуды колебаний угловой скорости кольцевого лазера относительно корпуса гироскопа Ω_d и амплитуд квадратурных сигналов. Методика выделения информации описана в работе [10].

В дополнение к возможностям, описанным в [3, 9], установка позволяет регистрировать температуры датчиков D_{1-3} , расположенных внутри отверстий в ситалловом моноблоке, и напряжения на электродах кольцевого лазера. Отсчеты выходных сигналов записываются на SD-карту с объемом памяти 8 Гб, что позволяет производить непрерывные измерения продолжительностью не менее 50 часов.

Регистрация напряжений 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. Релаксацию температурного поля после зажигания разряда иллюстрирует рисунок 2. Обработка последовательности отсчетов угловой скорости осуществлялась для данных, полученных не ранее, чем после 30 минут горения газового разряда, когда внутри стеклокерамики температурное поле уже стационарно.

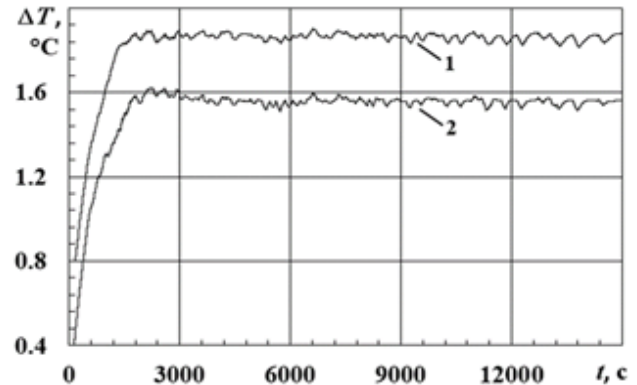


Рисунок 2 – Изменения перепадов температуры между активной и пассивной областями моноблока после зажигания двухплечевого разряда: кривая 1 – $T_{D1} - T_{D3}$, кривая 2 – $T_{D2} - T_{D3}$

Экспериментальные результаты

В рамках эксперимента измерена проекция угловой скорости вращения Земли на перпендикуляр к плоскости кольцевого резонатора. Анализ записанной последовательности отсчетов осуществлен методом вариации Аллана [11]. Результаты представлены на рисунке 3 в форме зависимости девиации Аллана (квадратного корня из вариации) от времени усреднения отсчетов T . Зависимость содержит составляющие, типичные для лазерного гироскопа с ошумленной знакопеременной частотной подставкой [7]. Одна из них (шум квантования) обратно пропорциональна первой степени времени усреднения, а вторая (угловые случайные блуждания) – квадратному корню из времени усреднения; их вклады в девиацию отражают прямые 3 и 4.

Рост девиации Аллана при временах усреднения, превышающих 1000 с, свидетельствует о наличии в выходном сигнале гироскопа ещё одной, «медленной» нестационарной составляющей. Для практических применений в инерциальной навигации такая составляющая крайне нежелательна, поскольку является причиной быстрого роста неопределённости пространственного положения при автономном функционировании навигационной системы [12].

«Медленная» составляющая в течение первых 8 часов находится в пределах $0,03$ °/час и проявляется в случайных изменениях зарегистри-

рированных значений угловой скорости $\langle\Omega\rangle$ (рисунок 4). Представленные зависимости выделены с помощью вейвлет-фильтрации отсчетов угловой скорости. Фильтрация осуществлена с помощью вейвлетов Добеши третьего порядка с «жесткой» пороговой обработкой коэффициентов разложения [13]. В результате составляющие, обусловленные шумом квантования и угловым случайным уходом, были исключены.

Для второго и третьего запусков гироскопа отфильтрованные медленные изменения зарегистрированных значений угловой скорости также находятся в пределах $0,03^\circ/\text{час}$, однако в каждой ситуации реализация случайной временной зависимости индивидуальна (рисунок 4, б). Графики девиаций в интервале времен усреднения $10^2\text{--}10^4$ с для разных запусков не совпадают (рисунок 3, кривые 5-7), в то время как в случае меньших времен усреднения они почти идентичны. Обнаружены длительные интервалы времени (до десятков часов), в пределах которых участок роста девиации при увеличении времени усреднения отсутствует. В запуске № 1 в пределах от 8 до 48 часов (правая часть кривой 1 на рисунке 4, а) медленная нестационарная состав-

ляющая уменьшается на порядок, что изменяет график девиации (рисунок 2, кривая 2).

С целью поиска возможных причин появления описанной выше «медленной» нестационарной составляющей в выходном сигнале гироскопа были зарегистрированы напряжения поддержания разряда в обоих плечах. Соответствующие зависимости от времени обоих напряжений приведены на рисунке 5 для запусков 2 и 3. В обоих случаях монотонное увеличение напряжений реализуется в условиях стабилизации токов, одинаковых для обоих плеч.

Скорость роста напряжения в плече, расположенном около откачного штенгеля (кривые 1), всегда больше, чем в противоположном (кривые 2). В результате разность напряжений с течением времени изменяет знак. 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.

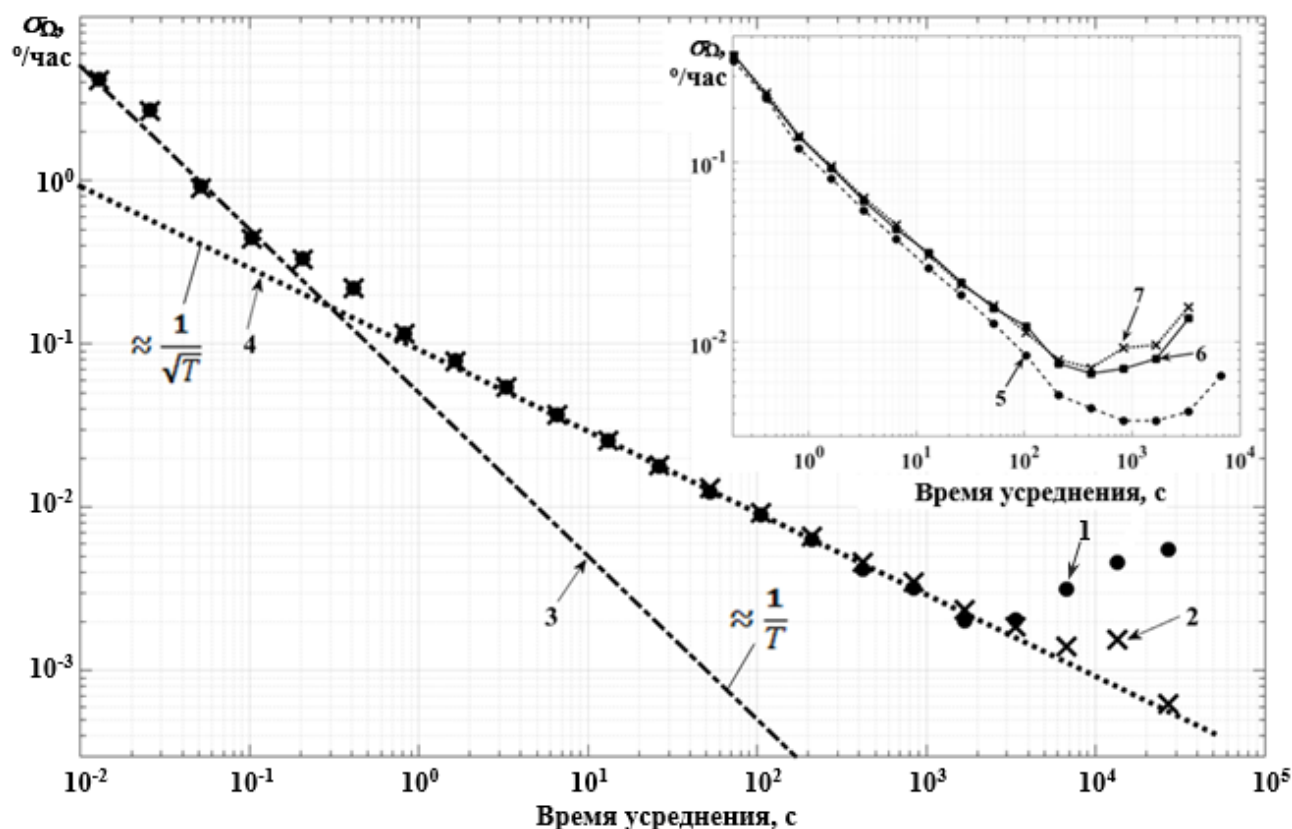


Рисунок 3 – Зависимость девиации Аллана от времени усреднения отсчетов угловой скорости вращения Земли: 1 – запуск № 1, интервал времени 1500-150000 с; 2 – запуск № 1, интервал времени 20000-150000 с; 3 – составляющая, обусловленная шумом квантования; 4 – составляющая, обусловленная угловым случайным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

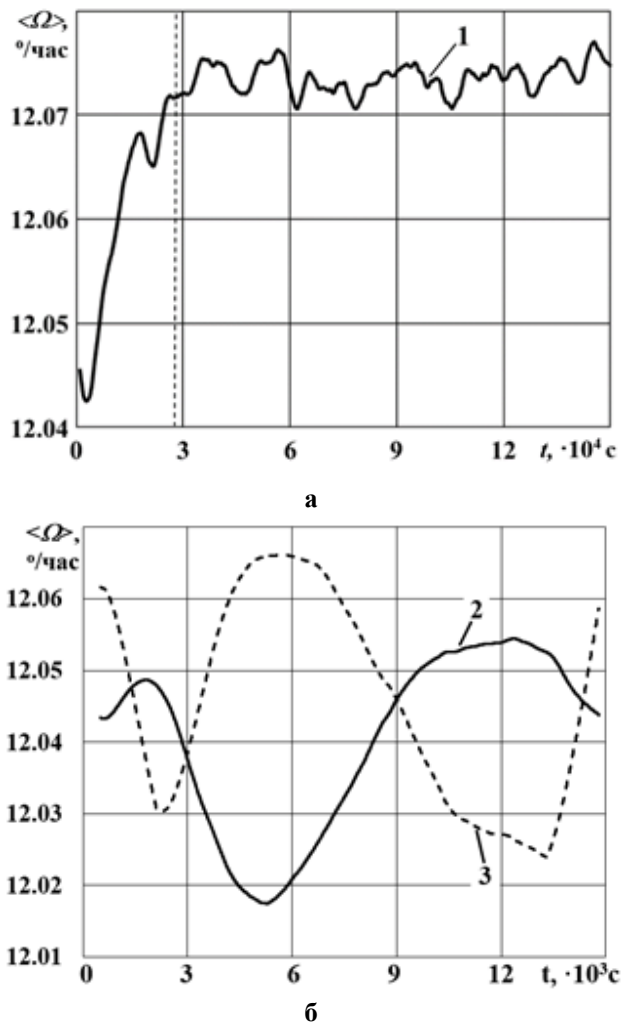


Рисунок 4 – Медленная нестационарная составляющая в отсчетах угловой скорости, выделенная с помощью вейвлет-фильтрации. Номера кривых совпадают с номерами запусков лазерного гироскопа: а – запуск длительностью 48 часов, б – запуски длительностью 4 часа

Чтобы интерпретировать наблюдаемый эффект, необходимо учитывать зависимость напряжения на положительном столбе от малых концентраций легко ионизируемых примесей в газовой среде [1]. Расчет напряженности продольного электрического поля в положительном столбе внутри канала кольцевого гелий-неонового лазера был выполнен в [14] 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, выполненного в [14], 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.

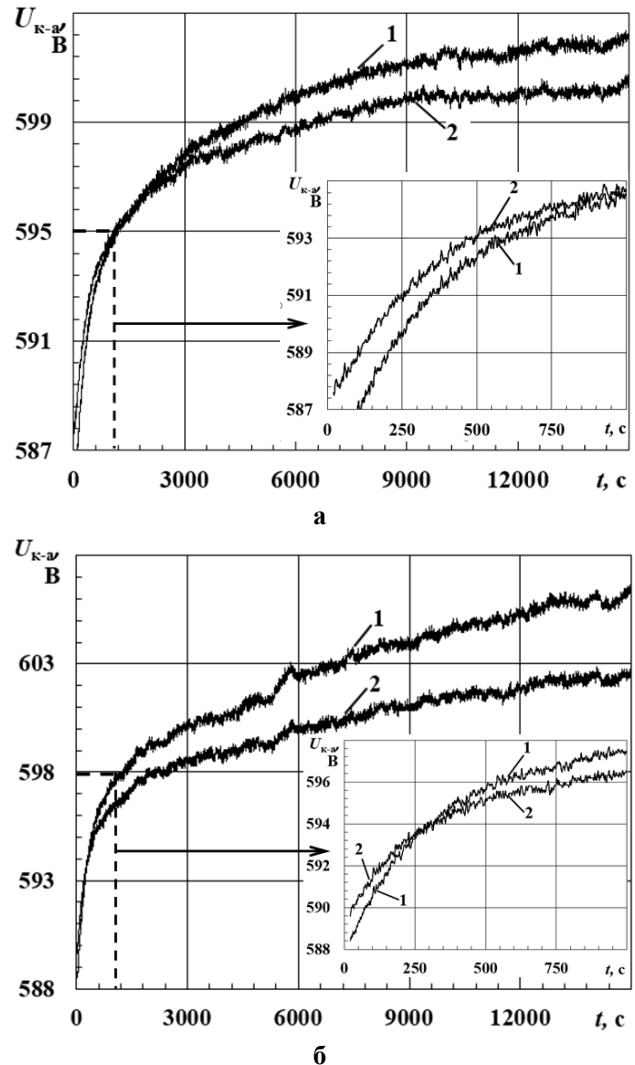


Рисунок 5 – Напряжения поддержания разряда: а – запуск № 2, б – запуск № 3.

Плечи разряда: 1 – катод – первый анод (A_1), 2 – катод – второй анод (A_2)

Причина роста напряжений, для графиков, приведенных на рисунке 5, 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 разряд-

ного 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.

Таким образом, электрическим разрядом осуществляется самоочищение смеси инертных газов. Поскольку на стадии электровакуумной обработки условия очистки плеч моноблока от посторонних примесей различны, потоки примесей из стенок в разрядных каналах не совпадают. Это приводит к различию скоростей роста для напряжений поддержания разряда в разных плечах. Падение напряжения на положительном столбе в более очищенном участке, расположенном около откачного штенгеля, при всех запусках увеличивается быстрее.

Количественные отличия между зависимостями напряжений поддержания разряда от времени на рисунке 5 обусловлены несовпадением начальных концентраций примесей в разрядных каналах. Последовательность процессов при пробое газа в двухплечевом промежутке сложна и неоднозначна [15], с чем связано отсутствие воспроизводимости при разных запусках. Различия электрических полей в плечах разряда, вызванное разными скоростями реакции Пеннинга, отражается как на величине скорости возбуждения атомов электронным ударом, так и на концентрации таких атомов в газоразрядной плазме.

Величина оптической невзаимности встречных волн, вызванной формированием в активной среде кольцевого лазера потоков быстрых атомов [4-6], пропорциональна произведению силы тока на концентрацию возбужденных атомов. В частности, к таким механизмам относится диссоциативная рекомбинация молекулярных ионов неона. Высокая концентрация метастабильных атомов в рассматриваемых условиях делает скорость процесса образования молекулярных ионов в результате столкновений метастабильных атомов величиной того же порядка, что и скорость ассоциативной ионизации [16], для которой необходимы атомы неона в состояниях с энергией возбуждения более 20,9 эВ.

Таким образом, вклады различных механизмов в невзаимность встречных волн в кольцевом лазере, их изменения с течением времени в процессе функционирования лазерного гироскопа находятся в зависимости от начальной степени «загрязненности» разрядных каналов. С последним обстоятельством связаны различия реализаций для «медленного» дрейфа выходного сигнала гироскопа, представленных на рисунке 4. Следует

отметить, что положения экстремумов у приведенных на рисунке 4, б кривых соответствуют одним и тем же значениям напряжений поддержания двухплечевого разряда на рисунке 5. Стабилизация газового состава активной среды после нескольких часов работы приводит к ограничению его неустойчивости дрейфа (рисунок 4, а).

Заключение

1. Выходной сигнал лазерного гироскопа в течение первых нескольких часов после запуска содержит составляющую, характеризующуюся медленными случайными изменениями измеренной угловой скорости (0,03 %/час). За пределом этого интервала времени данная нестационарная составляющая уменьшается на порядок.

2. Выделенный нестационарный процесс реализуется в условиях медленного асимметричного роста напряжений поддержания двухплечевого тлеющего разряда в кольцевом лазере. Скорость увеличения напряжения выше в плече, расположенном около откачного штенгеля лазерного моноблока, изготовленного из оптической стеклокерамики (ситалла).

3. Полученный результат подтверждает выводы работ [9, 14] о влиянии на ионизационный баланс в гелий-неоновом разряде посторонних примесей в активной среде кольцевого лазера, неустойчивость потока которых из стенок ситаллового моноблока вызывает изменения скорости Пеннинг-ионизации и напряженности электрического поля в положительном столбе.

4. Обнаруженные изменения электрических полей в положительном столбе двухплечевого разряда, происходящие в течение первых восьми часов после запуска, отражаются в соотношениях между вкладами различных механизмов в формирование потоков быстрых атомов неона вдоль разрядных каналов. Как следствие, появляется дополнительная нестационарная составляющая у невзаимности встречных волн, генерируемых кольцевым лазером.

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. Молчанов А. В., Белокуров В. А., Чиркин М. В., Кагаленко М. Б., Кошелев В. И., Мишин В. Ю., Морозов Д. А. Применение современных методов обработки информации в триаде прецизионных лазерных гироскопов // XXIII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2016. – С. 98-100
3. Молчанов А. В., Белокуров В. А., Чиркин М. В., Кошелев В. И., Мишин В. Ю., Морозов Д. А. Пре-

цизионный лазерный гироскоп с цифровым каналом для обработки квадратурных сигналов // XXII Санкт-Петербургская международная конференции по интегрированным навигационным системам. СПб: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2015. – С. 307-314.

4. **Виноградов В. И.** О направленном движении атомов неона в разряде постоянного тока кольцевого лазера // Оптика и спектроскопия 2009. Т. 107. № 2. С. 329-333.

5. **Виноградов В. И.** Исследование движения атомов в разряде постоянного тока кольцевого лазера // Оптика и спектроскопия 2011. Т. 110. № 6. С. 1042-1047.

6. **Виноградов В. И.** Влияние пленения излучения на разность частот в кольцевом лазере из-за рекомбинационного движения атомов // Оптика и спектроскопия 2011. Т. 110. № 6. С. 1038-1041.

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

8. **Молчанов А. В., Чиркин М. В., Серебряков А. Е., Климаков В. В., Дао Х. Н., Мишин В. Ю.** Влияние медленных флуктуационных процессов в кольцевом лазере на нестабильность дрейфа лазерного гироскопа // XXV Санкт-Петербургская международная конференции по интегрированным навигационным системам. СПб: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2018. – С. 208-211.

9. **Дао Х. Н., Серебряков А. Е., Чиркин М. В., Мишин М. В., Климаков В. В.** Анализ механизмов медленных флуктуаций в лазерном гироскопе. В сборнике: Современные технологии в науке и об-

разовании СТНО-2018 Сборник трудов международного научно-технического форума: в 11 томах. Под общ. ред. О.В. Миловзорова. 2018. С. 76-79.

10. **Zumberge M. A., Berger J., Dziewicuch M. A., Parker R. L.** Resolving quadrature fringes in real time. Applied Optics. 2004. Vol. 43, no. 4, pp. 771-775.

11. **Аллан Д. У.** Вариация Аллана: история создания, преимущества и недостатки, основные области применения // Гироскопия и навигация. – 2015. – № 4. – С. 3-28.

12. **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 мультиконференции по проблемам управления. – СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2016. – С. 49-59.

13. **Малла С.** Вейвлеты в обработке сигналов // Пер. с англ. – М.: Мир, 2005. – 671 с.

14. **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.

15. **Крютченко О. Н., Молчанов А. В., Морозов Д. А., Чиркин М. В.** Зажигание двухплечевых разрядов в кольцевом лазере // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2011. № 36. С. 71-75.

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

UDC 62-933.2:62-932.4:533.9

NONSTATIONARY IONIZATION BALANCE IN A BILATERAL DISCHARGE AND THE BIAS INSTABILITY OF A LASER GYRO

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

V. V. Klimakov, Ph.D. (Tech.), assistant professor of the Department of industrial electronics, RSREU, Ryazan; v.klimakov@mail.ru

A. E. Serebryakov, Ph.D. (Tech.), assistant professor of the Department of electronic devices, RSREU, Ryazan; sea89s@yandex.ru

V. Yu. Mishin, Ph.D. (Tech.), assistant professor of the Department of electronic devices, RSREU, Ryazan; mishvalera@yandex.ru

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

M. V. Chirkin, Dr. Sc. (Phys. and Math.), full professor, Head of the Department of electronic devices, RSREU, Ryazan; chirkin.mikhail@yandex.ru

This paper presents the results of experimental studies of nonstationary processes in a gas-discharge plasma and their effects on the output signal of a ring laser gyroscope. The developed experimental setup makes it possible to record and store in digital form the sequence of readings of the angular rate of rotation and the voltage of maintaining a bilateral glow discharge in a ring helium-neon laser. The obtained information was processed using the Allan variance method and wavelet filtering. The slow nonstationary component of an output signal of a gyroscope was selected and its relationship to the asymmetric increase in voltages in the discharge arms is shown. The features of ionization processes that leading to increased bias instability are identified. The aim of the work is to identify the reasons for the slow bias instability of a laser gyro.

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

DOI: 10.21667/1995-4565-2018-66-4-2-82-89

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. **Molchanov A. V., Belokurov, V. A., Chirkin, M. V., Kagalenko M. B., Koshelev V. I., Mishin V. Yu., Morozov D. A.** The application of advanced processing technique to the triad of precision laser gyroscopes. XXIII St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, St. Petersburg, CSRI Elektropribor. 2016. Pp. 120-122.
3. **Molchanov A. V., Belokurov, V. A., Chirkin M. V., Koshelev V. I., Mishin V. Yu., Morozov D. A.** Precision laser gyro with a digital channel for quadrature signal processing. XXII St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, St. Petersburg, CSRI Elektropribor, 2015. Pp. 307-314.
4. **Vinogradov V. I.** O napravlenom dvizhenii atomov neona v razryade postoyannogo toka kol'tseвого лазера. *Optika i spektroskopiya* 2009. Vol. 107, no. 2, pp. 329-333. (in Russian).
5. **Vinogradov V. I.** Issledovaniye dvizheniya atomov v razryade postoyannogo toka kol'tseвого лазера. *Optika i spek-troskopiya* 2011. Vol. 110, no. 6, pp. 1038-1041. (in Russian).
6. **Vinogradov V. I.** Vliyaniye pleneniya izlucheniya na raznost' chastot v kol'tsevom lazere iz-za rekombinatsionnogo dvizheniya atomov. *Optika i spektroskopiya* 2011. Vol. 110, no. 6, pp. 1038-1041. (in Russian).
7. **Aronovitz F.** Fundamentals of the ring laser gyro. *Optical Gyros and their Application*. RTO-AG-339. 1999. Pp.3-1-3-45.
8. **Molchanov A. V., Chirkin M. V., Serebryakov A. E., Klimakov V. V., Dao H. N., Mishin V. Yu.** The Effect of Slow Fluctuation Processes in the Ring Laser on Laser Gyro Bias Instability. XXV St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, St. Petersburg, CSRI Elektropribor, 2018, pp. 208-211.
9. **Dao H. N., Serebryakov A. E., Chirkin M. V., Mishin V. Yu., Klimakov V. V.** Analiz mekhanizmov medlennykh fluktuatsiy v lazernom giroskope. V sbornike: *Sovremennyye tekhnologii v nauke i obrazovanii-STNO-2018 Sbornik trudov mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo foruma: v 11 tomakh. Pod obshch. red. O.V. Milovzorova*. 2018. Pp. 76-79. (in Russian).
10. **Zumberge M. A., Berger J., Dzieciuch M. A., Parker R. L.** Resolving quadrature fringes in real time. *Applied Optics*. 2004. Vol. 43, no. 4, pp. 771-775.
11. **Allan D. U.** Variatsiya Allana: istoriya sozdaniya. preimushchestva i nedostatki. osnovnyye oblasti primeneniya. *Giroskopiya i navigatsiya*. 2015, no. 4, pp. 3-28. (in Russian).
12. **Stepanov O. A., Motorin A. V.** Problemno-orientirovanny podkhod k resheniyu zadachi identifikatsii modeley pogreshnostey navigatsionnykh datchikov i otse-nivayemykh signalov. *Materialy plenarnyy zasedaniy 9-y Rossiyskoy mul'tikonferentsii po problemam upravleniya*. SPb.: AO «Kontsern «TSNII «Elektropribor». 2016, pp. 49-59. (in Russian).
13. **Malla S.** Veyvlety v obrabotke signalov. Per. s angl. M.: Mir, 2005. 671 p.
14. **Dao H. N., Klimakov V. V., Molchanov A. V., Chirkin M. V.** Dinamika gaza v aktivnoy srede i nestabilnosti dreyfa signala lazernogo giroskopa. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2017. No. 59, pp. 136-144. (in Russian).
15. **Kryutchenko O. N., Molchanov A. V., Morozov D. A., Chirkin M. V.** Zazhiganiye dvukhpolecheyogo razryada v kol'tsevom lazere. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2011. No. 36, pp. 71-75. (in Russian).
16. **Smirnov B. M.** Vozbuzhdennyye atomy. M.: Energoizdat, 1982. 232 p. (in Russian).