

УДК 535.2  
EDN: QUFCMC

PACS: 42.60.-v, 42.62.-b, 42.81.Pa

## Исследование устойчивости периметра кольцевого лазера к вибрационным перегрузкам

© А. О. Синельников<sup>1,2\*</sup>, П. С. Романов<sup>2</sup>, Н. В. Тихменев<sup>2</sup>, А. А. Ушанов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Российский университет дружбы народов, Москва, 117198 Россия

<sup>\*</sup>E-mail: [mr.sinelnikov.a@mail.ru](mailto:mr.sinelnikov.a@mail.ru)

<sup>2</sup> АО «ГосНИИП», Москва, 129226 Россия

Статья поступила в редакцию 29.12.2025; после доработки 17.02.2026; принята к публикации 5.06.2026

Шифр научной специальности: 2.2.6, 2.2.9

*В работе экспериментально исследована чувствительность периметра кольцевого гелий-неонового лазера к внешним динамическим воздействиям. Объектом исследования являлся лазер с длиной волны генерации 633 нм и периметром резонатора 28 см. Экспериментально установлена количественная зависимость расстройки периметра от величины перегрузки по оси подвижного пьезо зеркала. Порог устойчивой работы лазера определен при перегрузке в 56g, соответствующей критической расстройке в 222 нм. При превышении данного порога нарушается одномодовый режим генерации в лазере, что приводит к значительной погрешности в выходном сигнале. Рассчитана чувствительность периметра лазера к динамическим воздействиям, составившая 3,75 нм/g. Полученные результаты определяют границы применимости кольцевых лазеров данного типа в условиях вибрационных нагрузок.*

*Ключевые слова:* кольцевой лазер, расстройка периметра, динамическое воздействие, вибрация, устойчивость.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-3-98-104

### Введение

Кольцевые лазеры (КЛ) нашли широкое применение в качестве высокоточных датчиков угловой скорости в современных навигационных и управляющих системах [1]. Принцип их действия основан на эффекте Саньяка, в результате которого возникает разность частот  $\Delta f$  встречных волн, пропорциональная угловой скорости вращения прибора  $\Omega$ :  $\Delta f = K\Omega$ , где  $K$  — масштабный коэффициент КЛ [2, 3]. Без учета активной среды данный коэффициент определяется геометрией резонатора: длиной оптического пути  $L$ , площадью  $S$ , охватываемой контуром, и длиной волны генерации  $\lambda$ . Ключевым условием стабильной и точной работы КЛ является поддержание длины резонатора (периметра) с

точностью до единиц нм [3, 4]. В процессе эксплуатации внешние воздействия (температура, вибрационные ускорения) могут вызывать механические деформации резонатора, приводящие к его расстройке  $\xi$  — изменению эффективного периметра  $\Delta L$  [5, 6]. Это явление вызывает смещение частоты генерации от центра линии усиления активной среды, что ведёт к ухудшению ключевых параметров лазера: снижению интенсивности излучения, росту порога захвата и нестабильности масштабного коэффициента.

Для компенсации тепловых деформаций КЛ оснащается системой регулировки периметра (СРП), воздействующей на подвижные пьезо зеркала [6, 7]. Однако быстрые колебания пьезо зеркал, вызванные вибрацией, система может не успевать парировать [8].

В этом случае расстройка периметра  $\xi$  приводит к выходу лазера из оптимального режима генерации. А изменение оптического пути резонатора, вызванное движением зеркал, может индуцировать ложный сигнал, интерпретируемый как вращение [4].

Особую актуальность проблема динамических воздействий приобретает при использовании КЛ в условиях повышенных механических нагрузок, например, в геофизическом оборудовании или системах управления подвижными объектами [1, 9]. Как показано в работах [10, 11], конструкция КЛ обладает собственными резонансными частотами (до 2000 Гц), на которых виброускорения на корпусе резонатора могут достигать десятков *g*. Наиболее чувствительным к перегрузкам элементом является подвижное пьезозеркало, смещение которого напрямую влияет на периметр резонатора. Таким образом, количественная оценка устойчивости периметра КЛ к вибрациям является важной задачей, определяющей надежность и область применения этих высокоточных приборов.

Целью работы является экспериментальное исследование чувствительности периметра кольцевого лазера к внешним динамическим воздействиям и определение физических механизмов влияния вибрации на его выходные характеристики.

### Теоретическая часть

Основу функционирования кольцевого лазера как датчика угловой скорости составляет поддержание стабильного одномодового режима генерации в центре контура усиления активной среды. Как отмечено во введении, внешние динамические воздействия вызывают расстройку периметра  $\xi$ , что приводит к изменению оптической длины резонатора  $\Delta L$  и смещению собственной частоты продольной моды, которая определяется выражением [2, 12]:

$$v = q \frac{c}{L + l(n_a - 1)}, \quad (1)$$

где  $q$  – целое число (порядок моды);  $c$  – скорость света;  $l$ ,  $n_a$  – длина и коэффициент преломления активной среды, соответственно.

Зависимости интенсивности генерации  $I$  от длины резонатора  $L$  хорошо изучены [5, 2].

При изменении периметра  $\Delta L$  интенсивность  $I$  будет изменяться, причем аргументом функции интенсивности удобно выбрать именно изменение (расстройку) периметра  $\xi$ , определяемую как  $\xi = \Delta L = L - L_0$ , где  $L_0$  – длина резонатора, соответствующая максимуму интенсивности ( $I = I_0$ ). Связь между расстройкой периметра  $\xi$  и интенсивностью генерируемого излучения  $I$  является ключевой для понимания устойчивости работы прибора. Вблизи  $L_0$  зависимость  $I(\xi)$  аппроксимируется параболой [5, 11]:

$$I_\xi = I_0 (1 - a \cdot \xi^2), \quad \text{при } |\xi| \leq \pm \xi_f, \quad (2)$$

где  $a$  – постоянный коэффициент;  $\xi_f$  – граница области стабильного одномодового режима. При дальнейшем увеличении расстройки происходит переход в зону конкуренции мод,

$$\begin{aligned} -I_\xi &= I_0 [1 - a \cdot (\xi \pm 1)^2], \\ \text{при } -\xi_f \pm 1 &\leq |\xi| \leq \pm \xi_f \pm 1, \end{aligned} \quad (3)$$

с последующим выходом на нерегулярный режим, описываемый случайной функцией  $SQR(\xi)$  [11]. Таким образом, пороговое значение расстройки  $\xi_f$  является критическим параметром, определяющим границы рабочего режима КЛ.

В условиях вибрационного воздействия перегрузка  $P_g$ , возникающая на резонансных частотах конструкции  $f_B$ , вызывает приложенное к пьезозеркалу усилие, приводящее к его смещению и модуляции периметра. Данный процесс может быть описан зависимостью:

$$\xi(t) = P_g(f_B) \cdot \xi_g \cdot \sin(2\pi f_B t), \quad (4)$$

где  $\xi_g$  – чувствительность расстройки периметра к проекции виброускорения на нормаль к поверхности пьезозеркала. Коэффициент перегрузки  $P_g$ , зависящий от частоты воздействия  $f_B$ , для линейного приближения может быть выражен через собственные частоты резонансных мод  $f_{Bi}$  с амплитудами возбуждения  $a_{Pi}$  и добротностями  $Q_{Pi}$  [8]:

$$P_g(f_B) = \frac{a_{Pi}}{\sqrt{(f_B^2 - f_{Bi}^2)^2 + \left(\frac{f_B \cdot f_{Pi}}{Q_{Pi}}\right)^2}}. \quad (5)$$

Таким образом, теоретическая модель устанавливает прямую связь между внешним вибрационным воздействием, описываемым частотой  $f_B$ , перегрузкой  $P_g$ , и результирующей расстройкой периметра  $\xi$ , которая непосредственно определяет интенсивность излучения  $I_\xi$  и, следовательно, стабильность выходных характеристик КЛ. Экспериментальная проверка данных зависимостей позволяет количественно оценить порог устойчивости лазера.

### Экспериментальное исследование и результаты

Объектом исследования служил гелий-неоновый КЛ с четырехзеркальным резонатором, периметром 28 см и длиной волны генерации  $\lambda = 633$  нм [9]. Схема экспериментального стенда представлена на рис. 1. Резонатор лазера образован двумя подвижными (3) и

двумя неподвижными зеркалами (4). Для контроля и компенсации тепловых деформаций корпуса КЛ использовалась система регулировки периметра, воздействующая на пьезокорректоры (5) подвижных зеркал с помощью управляющего напряжения  $U_{ПК}$ . Информация о состоянии резонатора регистрировалась двумя фотодиодами контроля интенсивности (1), сигналы которых  $I_{M1}$ ,  $I_{M2}$  несли данные об интенсивности встречных волн. Измерение разностной частоты  $\Delta f$  сигналов  $U_{\sin}$  и  $U_{\cos}$ , пропорциональное угловой скорости  $\Omega$ , осуществлялось с помощью информационного фотодиода (2). Корпус лазера (6) был установлен на виброподвес (7), закрепленный винтами к подвижной плите (8) вибростенда, обеспечивая жесткую передачу механических воздействий в заданном направлении (9). На корпусе (6) были закреплены акселерометры для регистрации перегрузок  $P_g$  по трем осям внешних воздействий.

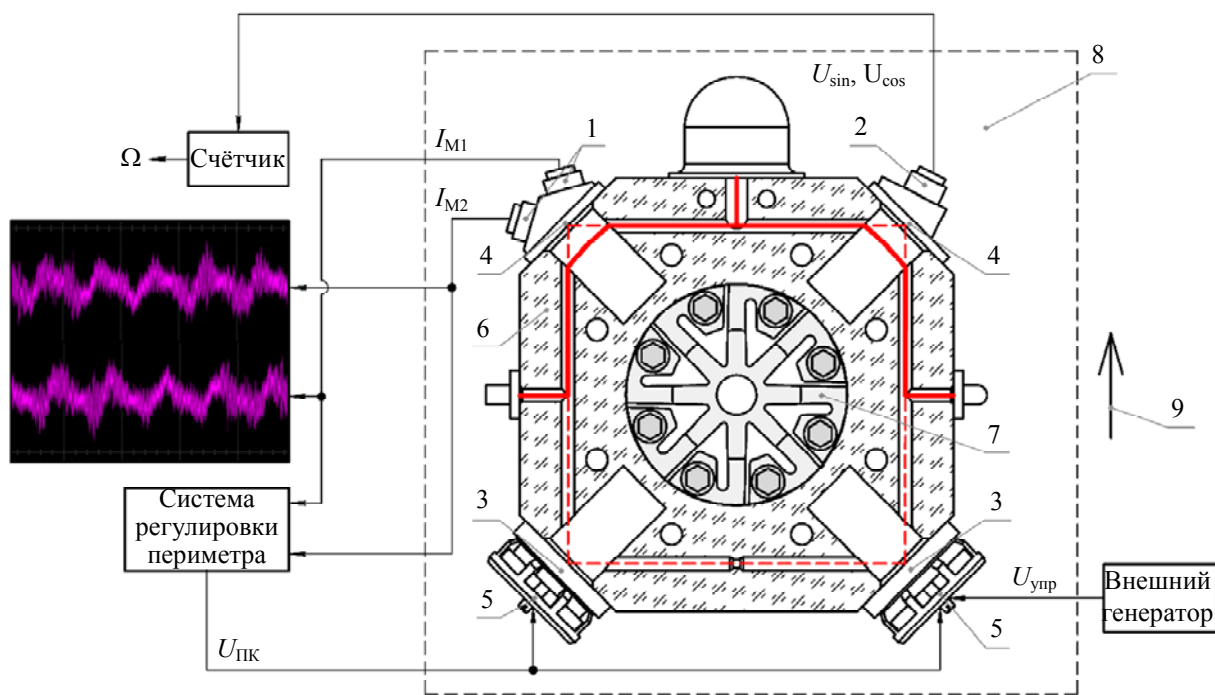


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 – фотодиоды контроля интенсивности; 2 – информационный фотодиод; 3 – подвижные зеркала; 4 – неподвижные зеркала; 5 – пьезокорректоры; 6 – корпус КЛ; 7 – виброподвес; 8 – плита вибростенда; 9 – направление внешнего динамического воздействия

На первом этапе эксперимента было проведено исследование зависимости выходного сигнала  $\Omega$  от контролируемой расстройки периметра  $\xi$ , создаваемой подачей напряжения  $U_{упр}$  на пьезокорректор при отключённой

СРП. Установлено, что в диапазоне  $\xi$  от 0 до 222 нм сигнал  $\Omega$  оставался стабильным и соответствовал проекции скорости суточного вращения Земли (~12,45 град/час). При превышении порога в 222 нм наблюдался резкий,

пятикратный рост показаний, что свидетельствует о выходе КЛ из рабочего одномодового режима. Дополнительно исследовалась модуляция интенсивности  $I_M$  при синусоидальной расстройке с частотой 2 КГц. Было зафиксировано, что амплитуда модуляции сигнала линейно росла с увеличением  $\xi$  до 222 нм, после чего в сигнале появлялись характерные нелинейные искажения. Второй этап был посвящен влиянию внешней гармонической вибрации в диапазоне частот  $f_B$  от 20 до 2000 Гц при амплитуде ускорения  $P = 4g$ . КЛ с виброподвесом был установлен на динамический стенд. После предварительного прогрева лазера СРП была переведена в ручной режим (напряжение на пьезокорректорах зафиксировано), что исключало ее влияние на модуляцию сигнала  $I_M$

и позволяло регистрировать расстройку  $\xi$ , вызванную исключительно внешней вибрацией. Значимое увеличение амплитуды модуляции сигнала интенсивности  $I_M$  наблюдалось лишь в узких полосах частот (675–690 Гц, 720–750 Гц, 1010–1045 Гц), соответствующих областям механических резонансов конструкции КЛ. На рис. 2 представлен фрагмент сигнала  $I_M$  при частоте вибрации  $f_B$  920–1120 Гц.

Показания акселерометров, зарегистрированные по трём осям (в направлении воздействия, оси чувствительности КЛ и оси подвижного пьезозеркала), подтвердили, что в данных диапазонах спектра частот возникают существенные перегрузки  $P_g$ , направленные преимущественно по оси, нормальной к поверхности подвижного пьезозеркала (рис. 3).

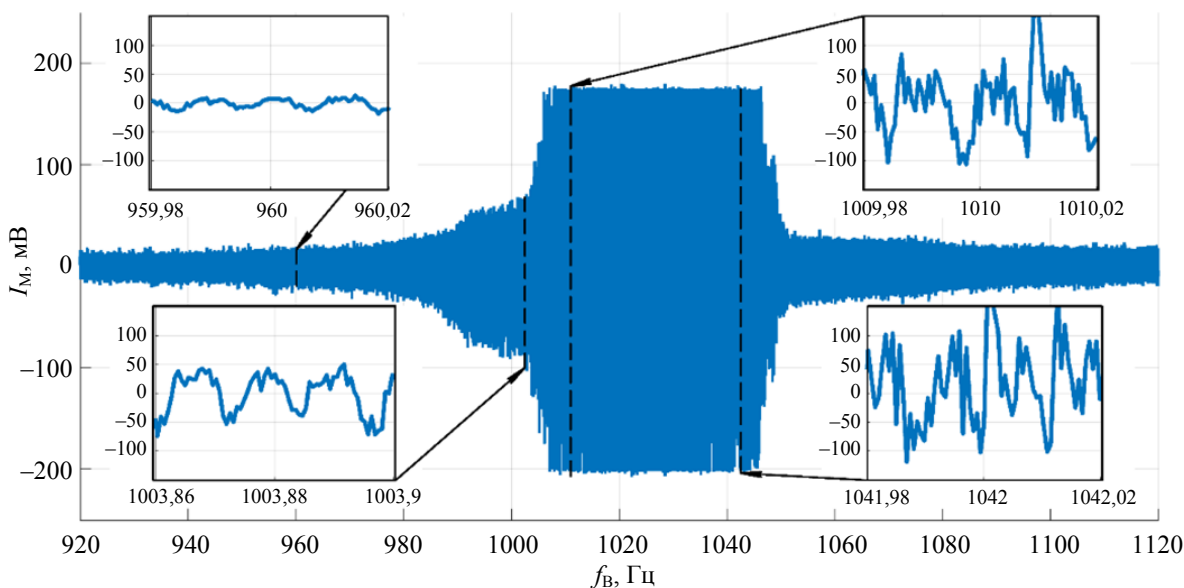


Рис. 2. Модуляция сигнала интенсивности при внешнем динамическом воздействии

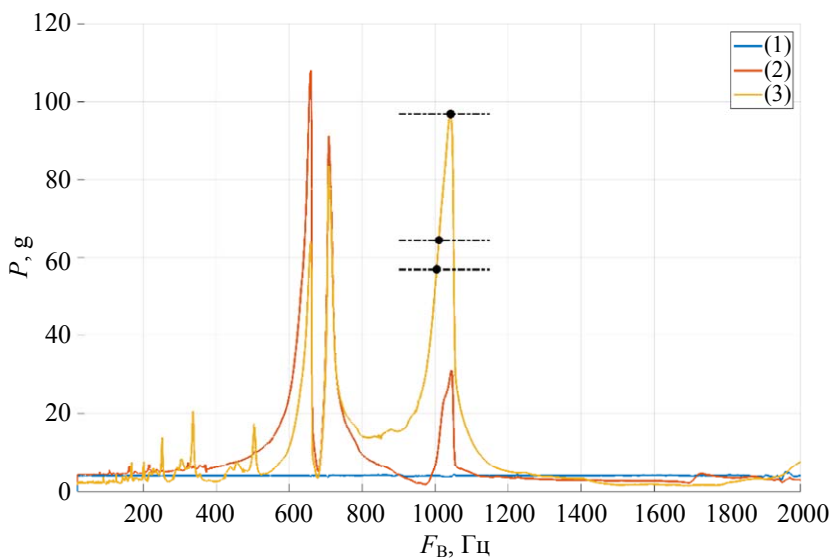


Рис. 3. Перегрузки по осям кольцевого лазера: (1) – по оси воздействия (задающее воздействие), (2) – по оси чувствительности КЛ, (3) – по оси пьезозеркала КЛ

Сопоставление вида модуляции оптического сигнала  $I_M$  при вибрации с калибровочной зависимостью, полученной на первом этапе эксперимента, позволило установить количественную связь между перегрузкой  $P_g$  по оси зеркала и вызываемой ею расстройкой периметра  $\xi$ . Аппроксимация экспериментальных данных (рис. 4) дала следующую зависимость:

$$\xi(P) = 0,057P^2 + 0,789P. \quad (6)$$

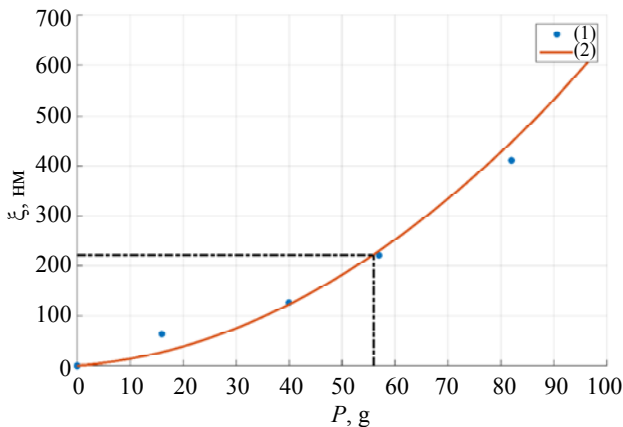


Рис. 4. Зависимость расстройки периметра КЛ от перегрузки по оси подвижного зеркала

Из данной зависимости следует, что критическое значение расстройки  $\xi \approx 222$  нм достигается при перегрузке  $P \approx 56$  г. Линейная аппроксимация в рабочей области определяет чувствительность периметра исследуемого КЛ к динамическим воздействиям как 3,75 нм/г.

### Обсуждение результатов

Полученные экспериментальные данные позволяют сделать вывод о высокой динамической устойчивости исследуемого кольцевого лазера и количественно связать механические воздействия с изменениями его оптических параметров. Установленный критический порог расстройки периметра в 222 нм соответствует теоретической границе зоны стабильного одномодового режима генерации. Превышение этого значения приводит к переходу в область конкуренции продольных мод, что полностью объясняет наблюдаемое пятикратное увеличение ошибки выходного сигнала прибора. Данный результат подтверждает базовый принцип, согласно которому стабильность масштабного коэффициента КЛ определяется сохранением условия  $\xi < \xi_c$ .

Выявленная избирательность отклика выходных сигналов лазера на вибрацию, выражающаяся в значительной модуляции интенсивности излучения только в узких частотных диапазонах, указывает на резонансный характер влияния. Это согласуется с данными о наличии собственных резонансов конструкции КЛ в диапазоне  $f_B$  до 2000 Гц. Преобладание перегрузки именно по оси, нормальной к поверхности подвижного пьезо зеркала, экспериментально доказывает, что данный элемент является основным каналом передачи динамических возмущений в оптический контур резонатора.

Квадратичный характер зависимости (7), вероятно, отражает нелинейность упругих свойств крепления пьезо зеркала к корпусу лазера при больших амплитудах прогиба. Рассчитанная чувствительность периметра 3,75 нм/г и определённый порог устойчивой работы 56 г являются ключевыми количественными характеристиками для оценки применимости прибора. Эти значения показывают, что при перегрузках ниже 56 г СРП потенциально способна компенсировать возникающую расстройку, так как она остаётся в пределах её рабочего диапазона и не превышает критического значения  $\xi_c$ .

Сравнение с известными исследованиями [8, 10] подтверждает общий механизм влияния вибрации через возбуждение резонансов конструкции. В то же время полученные конкретные численные характеристики (3,75 нм/г, 56 г) для лазера с периметром 28 см вносят новый вклад в понимание эксплуатационных ограничений подобных приборов в составе инерциальных измерительных систем и расширяют представления о возможности их применения в условиях умеренных вибрационных нагрузок.

### Заключение

В данной работе проведено экспериментальное исследование влияния внешних динамических воздействий на стабильность периметра кольцевого лазера. На основе анализа взаимосвязи между вибрационными перегрузками, расстройкой периметра и выходными характеристиками прибора получены количественные оценки его устойчивости.

Результаты работы подтверждают теоретическую модель, согласно которой стабильность одномодового режима генерации критически зависит от величины расстройки периметра. Экспериментально установленный порог расстройки в 222 нм соответствует границе зоны стабильной одномодовой генерации. Превышение этого порога приводит к переходу в режим конкуренции мод и существенному росту погрешности измерения.

Определена прямая зависимость между перегрузкой, действующей по оси подвижного пьезо зеркала, и вызываемой ею расстройкой периметра. Установлено, что критическая расстройка достигается при перегрузке 56g, что задаёт чёткий эксплуатационный предел для приборов данного типа. Рассчитанная чувствительность периметра к динамическим воздействиям составляет 3,75 нм/g.

Полученные результаты имеют практическую значимость для разработки и применения кольцевых лазерных гироскопов в условиях вибрационных нагрузок. Они показывают, что при сохранении перегрузок ниже указанного порога система регулировки периметра способна обеспечить штатный режим работы прибора, что расширяет потенциальные области его применения. Данное исследование вносит вклад в понимание механизмов влияния вибрации на точность инерциальных измерительных систем и предоставляет конкретные количественные критерии для оценки их устойчивости.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Синельников А. О., Тихменев Н. В., Ушанов А. А., Медведев В. М. / Фотоника. 2024. Т. 18. № 6. С. 450–466. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2024.18.6.450.466>.
2. Лукьянов Д. П., Распопов В. Я., Филатов Ю. В. Прикладная теория гироскопов. – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2015.
3. Aronowitz F. Optical gyros and their application. 1999. Vol. 339.
4. Lee J. I. / International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2012. Vol. 13. № 8. P. 1439–1443.
5. Грушин М. Е., Колбас Ю. Ю., Медведев А. А. / Фотоника. 2020. Т. 14. № 2. С. 150–159. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2020.14.2.150.157>.
6. Fenercioglu T. O., Yalçinkaya T. / International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. 2019. Vol. 61. № 3. P. 429–443. <https://doi.org/10.3233/JAE-190019>.
7. Lee S. H., Shon W. H., Suh S. W., Yu S. N., Han C. S. / International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2011. Vol. 12. № 1. P. 91–96. <https://doi.org/10.1007/s12541-011-0011-1>.
8. Болотнов С. А., Назаров С. И., Синельников А. О., Тихменев Н. В., Ушанов А. А. / Гироскопия и навигация. 2024. Т. 32. № 3 (126). С. 3–20.
9. Кузнецов А. Г., Молчанов А. В., Чиркин М. В., Измайлов Е. А. / Квантовая электроника. 2015. Т. 45. № 1. С. 78–88.
10. Тихменев Н. В., Назаров С. И., Ушанов А. А., Синельников А. О. Управление большими системами: сборник трудов. 2024. № 109. С. 293–309. <https://doi.org/10.25728/ubs.2024.109.13>.
11. Синельников А. О., Тихменев Н. В., Ушанов А. А., Назаров С. И. / Наноиндустрия. 2025. Т. 18. № S11–1 (135). С. 380–387. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2025.18.11s.380.387>
12. Liu J., Guo L., Weng J., Liu W., Yang Y., Zhao K., Zheng Y. / Optics Express. 2023. Vol. 31. № 22. P. 36314. <https://doi.org/10.1364/oe.503255>.

PACS: 42.60.–v, 42.62.–b, 42.81.Pa

## Investigation of the perimeter stability of a ring laser to vibration overloads

A. O. Sinelnikov<sup>1,2\*</sup>, P. S. Romanov<sup>2</sup>, N. V. Tikhmenev<sup>2</sup>, and A. A. Ushanov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> RUDN University, Moscow, 117198 Russia

<sup>2</sup> JSC «State Research Institute of Instrument Engineering», Moscow, 129226 Russia

\* E-mail: mr.sinelnikov.a@mail.ru

Received 29.12.2025; revised 17.02.2026; accepted 5.06.2026

*The paper presents an experimental study of the perimeter sensitivity of a helium-neon ring laser to external dynamic impacts. The laser under investigation had a generation wavelength of 633 nm and a resonator perimeter of 28 cm. A quantitative dependence of perimeter detuning on the overload along the axis of the movable piezo-mirror was experimentally established.*

*It was determined that the operational stability threshold of the laser corresponds to an overload of 56g, at which the critical detuning of 222 nm is reached. Exceeding this threshold disrupts the single-mode generation regime in the laser, leading to a significant error in the output signal. The sensitivity of the laser perimeter to dynamic impacts was calculated to be 3.75 nm/g. The obtained results define the applicability limits of this type of ring laser under vibration load conditions.*

*Keywords:* ring laser, perimeter detuning, dynamic effect, vibration, overload.

## REFERENCES

1. Sinelnikov A. O., Tikhmenev N. V., Ushanov A. A., and Medvedev V. M., *Photonics of Russia* **18** (6), 450–466 (2024). <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2024.18.6.450.466>.
2. Lukyanov D. P., Raspopov V. Ya., and Filatov Yu. V. *Applied Theory of Gyroscopes*, St. Petersburg: GSC RF OJSC Concern TsNII Elektropribor, 2015 [in Russian].
3. Aronowitz F. *Optical Gyroscopes and Their Applications*, **339**, (1999).
4. Lee J. I., *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* **13** (8), 1439–1443 (2012).
5. Grushin M. E., Kolbas Yu. Yu., and Medvedev A. A., *Photonics* **14** (2), 150–159 (2020) [in Russian]. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.Ot.2020.14.2.150.157>
6. Fenercioglu T. O. and Yalçinkaya T., *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics* **61** (3), 429–443 (2019). <https://doi.org/10.3233/JAE-190019>
7. Lee S. H., Shon W. H., Suh S. W., Yu S. N., and Han C. S., *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* **12** (1), 91–96 (2011). <https://doi.org/10.1007/s12541-011-0011-1>
8. Bolotnov S. A., Nazarov S. I., Sinelnikov A. O., Tikhmenev N. V., and Ushanov A. A., *Gyroscopy and Navigation* **15** (3), 215–225 (2024). <https://doi.org/10.1134/S2075108724700317>
9. Kuznetsov A. G., Molchanov A. V., Izmailov E. A., and Chirkin M. V., *Quantum Electronics* **45** (1), 78–88 (2015). <https://doi.org/10.1070/QE2015v045n01ABEH015420>.
10. Tikhmenev N. V., Nazarov S. I., Ushanov A. A., and Sinelnikov A. O., *Management of Large Systems: Collection of Papers, № 109*, 293–309 (2024) [in Russian]. <https://doi.org/10.25728/ubs.2024.109.13>.
11. Sinelnikov A. O., Tikhmenev N. V., Ushanov A. A., and Nazarov S. I., *Nanoindustry* **18** (S11–1 (135)), 380–387 (2025) [in Russian]. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2025.18.11s.380.387>
12. Liu J., Guo L., Weng J., Liu W., Yang Y., Zhao K., and Zheng Y., *Optics Express* **31** (22), 36314 (2023). <https://doi.org/10.1364/oe.503255>.

## Об авторах

**Синельников Антон Олегович**, к.т.н., доцент, начальник лаборатории, Российский университет дружбы народов (117198, Россия, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6); АО «ГосНИИП» (129226, Россия, Москва, пр-кт Мира, д. 125). E-mail: mr.sinelnikov.a@mail.ru SPIN-код: 2442-7507, AuthorID: 887339, ORCID 0000-0002-5579-3509

**Романов Павел Сергеевич**, инженер-стажёр, АО «ГосНИИП» (129226, Россия, Москва, пр-кт Мира, д. 125). E-mail: romanov\_p7274@mail.ru SPIN-код: 2329-2940, AuthorID: 1306982, ORCID 0009-0006-3309-0657

**Тихменев Николай Вадимович**, к.ф.-м.н., начальник отдела, АО «ГосНИИП» (129226, Россия, Москва, пр-кт Мира, д. 125). E-mail: nvtikhmenev@mail.ru AuthorID: 602152

**Ушанов Александр Александрович**, ведущий инженер-электроник, АО «ГосНИИП» (129226, Россия, Москва, пр-кт Мира, д. 125). E-mail: a.a.ushanov@mail.ru SPIN-код: 1666-3279, AuthorID: 1211000, ORCID 0009-0009-3703-9981