

Исследование на виброустойчивость волоконных и твердотельных лазеров

А. Ю. Данилов^{1,2,*}, Э. А. Фомиряков^{1,†}, Г. Ю. Иванов^{1,3,‡}, А. В. Резников^{1,§}

¹ООО «Т8». Россия, 107076, Москва, ул. Краснобогатырская, д. 44, стр. 1

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31

³Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

Россия, 117303, г. Москва, ул. Керченская, д. 1А, корп. 1.

(Поступила в редакцию 30.05.2025; подписана в печать 03.03.2026)

Экспериментально изучено влияние механических вибраций на стабильность фазочастотных характеристик одночастотных высококогерентных волоконных и диодных лазеров. Показана их разная чувствительность к внешним возмущениям в зависимости от типа лазера и его положения в пространстве. Продемонстрирована меньшая вибрационная чувствительность полупроводникового лазера по сравнению с волоконным.

PACS: 42.55.Wd, 42.60.By, 42.62.-b УДК: 621.373.8

Ключевые слова: волоконный лазер, полупроводниковый лазер, вибрационные воздействия.

ВВЕДЕНИЕ

В современных системах коммуникации, устройствах сенсорики и метрологии одним из ключевых компонентов являются непрерывные одночастотные высококогерентные лазеры (с шириной линии генерации менее 1 кГц). Дополнительным требованием при использовании вне лаборатории часто является их компактность. Этим требованиям удовлетворяют полупроводниковые диодные и волоконные источники излучения. В лабораторных условиях волоконные лазеры обладают меньшим уровнем фазовых шумов [1] по сравнению с полупроводниковыми. При практическом использовании таких лазеров вне лаборатории значительное влияние на их работу оказывают тепловые [2–4] (не рассматриваются в данной работе) и вибрационные [5–7] факторы. Таким образом, актуальной задачей является разработка методик для оценки вибро- и термоустойчивости подобных лазерных изделий.

В данной работе предлагается методика измерения фазочастотного отклика, появляющегося в выходном излучении высококогерентных лазеров различных типов в результате калиброванного механического гармонического воздействия на них (вибрации).

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для гармонического вибрационного воздействия использовался вибростенд («TIRA GmbH TV 51110»). Лазер устанавливался на жесткой пластине, закрепленной на вибрационной платформе. Генератор вибраций использовал два акселерометра, один из которых

(опорный, измеряющий реальное ускорение, передаваемое вибростендом) был закреплен на вибрационной платформе, а второй (вспомогательный) — непосредственно на корпусе лазера (см. рис. 1). Данные об ускорении с опорного датчика использовались для поддержания постоянной амплитуды ускорения при гармонической вибрации.



Рис. 1. Вибростенд на основе генератора вибраций «TIRA GmbH TV 51110»

Для измерения фазочастотного отклика на внешние вибрации в выходном излучении тестируемых лазеров их излучение смешивалось с излучением опорного лазера (Koheras Basik X15), закреплённого на виброизолированном столе. Комплексная амплитуда сигналов биений на разностной частоте $\nu(t)$ измерялась с помощью электрического анализатора спектра со встроен-

* danilov.a.y@t8.ru

† fomiryakov@t8.ru

‡ ivanov.g.y@t8.ru

§ reznikov@t8.ru

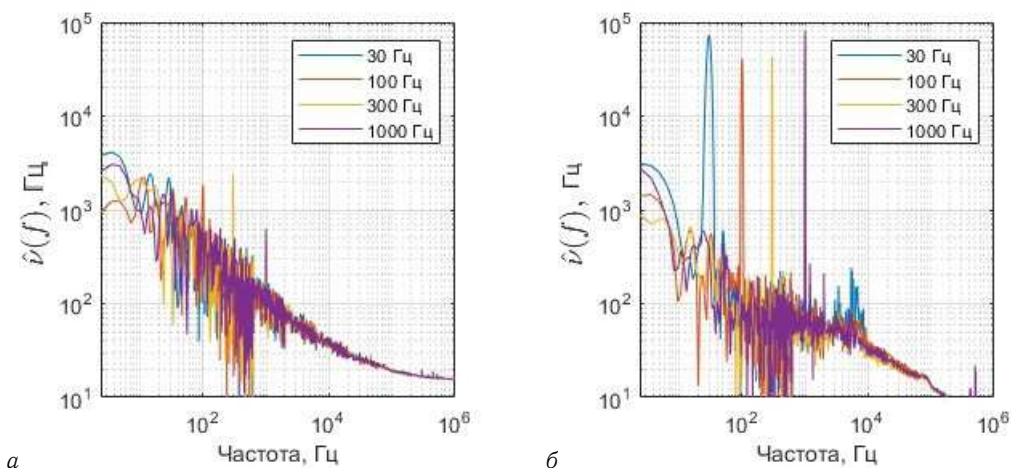


Рис. 2. Результаты виброиспытаний полупроводникового лазера E-LAS (а) и волоконного лазера Инверсия Файбер (б) в горизонтальном положении

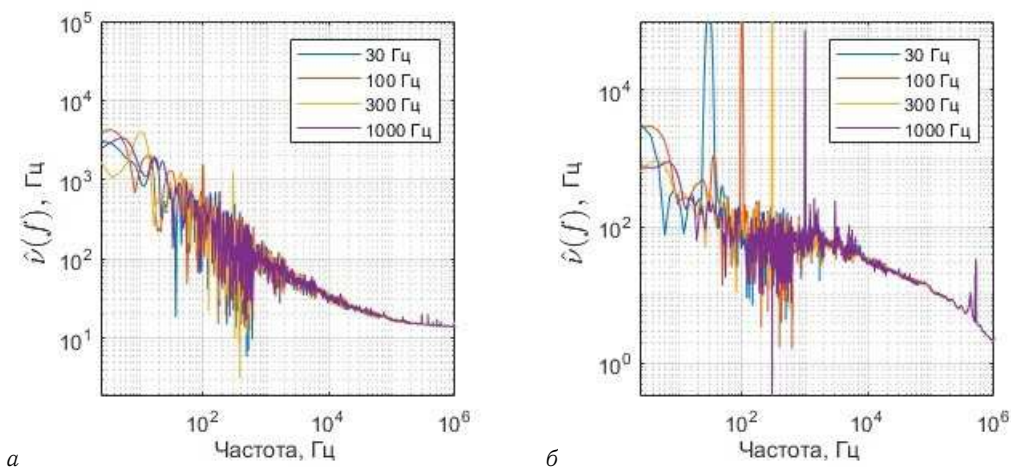


Рис. 3. Результаты виброиспытаний полупроводникового лазера E-LAS (а) и волоконного лазера Инверсия Файбер (б) в вертикальном положении

ной квадратурной демодуляцией [1, 8–10]. Пользуясь теоремой Парсеваля, можно вычислить амплитуду отклика лазера на внешнюю модуляцию, как

$$\hat{v}(f) = \sqrt{\text{PSD}(f) \cdot \text{BW}}, \quad (1)$$

где $\text{PSD}(f)$ — спектральная плотность частоты, а BW — ширина полосы.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Отработка методики осуществлялась с использованием полупроводникового лазера с внешним резонатором (E-LAS, Россия) и волоконного DFB-лазера (ООО «Инверсия Файбер», РФ), фазочастотные шумы которых были хорошо изучены ранее [1]. На рис. 2, 3, 4 представлены результаты проведенных вибрационных испытаний и, в частности, измерения частотной ам-

плитуды отклика этих лазеров на внешнюю модуляцию на частотах 30, 100, 300, 1000 Гц при фиксированном максимальном значении ускорения $0.1g$ для трех различных положений в пространстве: горизонтально, вертикально и на боку. На рис. 5 приведены полученные значения амплитуд отклика на указанных частотах для указанных положений. Величины амплитуд отклика на вибровоздействие для лазера E-LAS были значительно меньше (в отдельных случаях частот модуляции не наблюдалось вовсе), чем в экспериментах с волоконным лазером Инверсия Файбер для всех частот и всех положений. Разница между полученными величинами откликов указанных лазеров на соответствующих частотах модуляции всегда составляла более 10 раз, в отдельных случаях более 100 раз. Стоит отметить, что гармоник сигнала модуляции не наблюдалось.

Также была исследована зависимость отклонения частоты генерации лазера от величины ускорения. Так

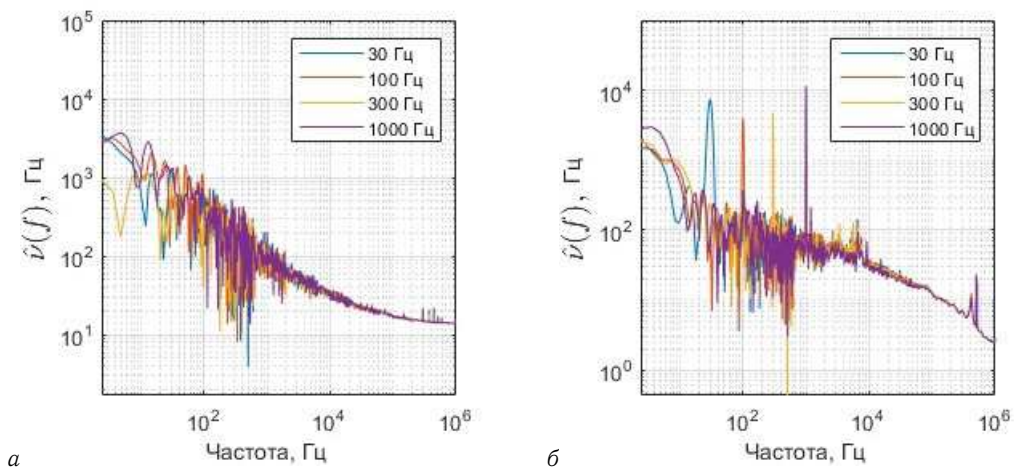


Рис. 4. Результаты виброиспытаний полупроводникового лазера E-LAS (а) и волоконного лазера Инверсия Файбер (б) в боковом положении

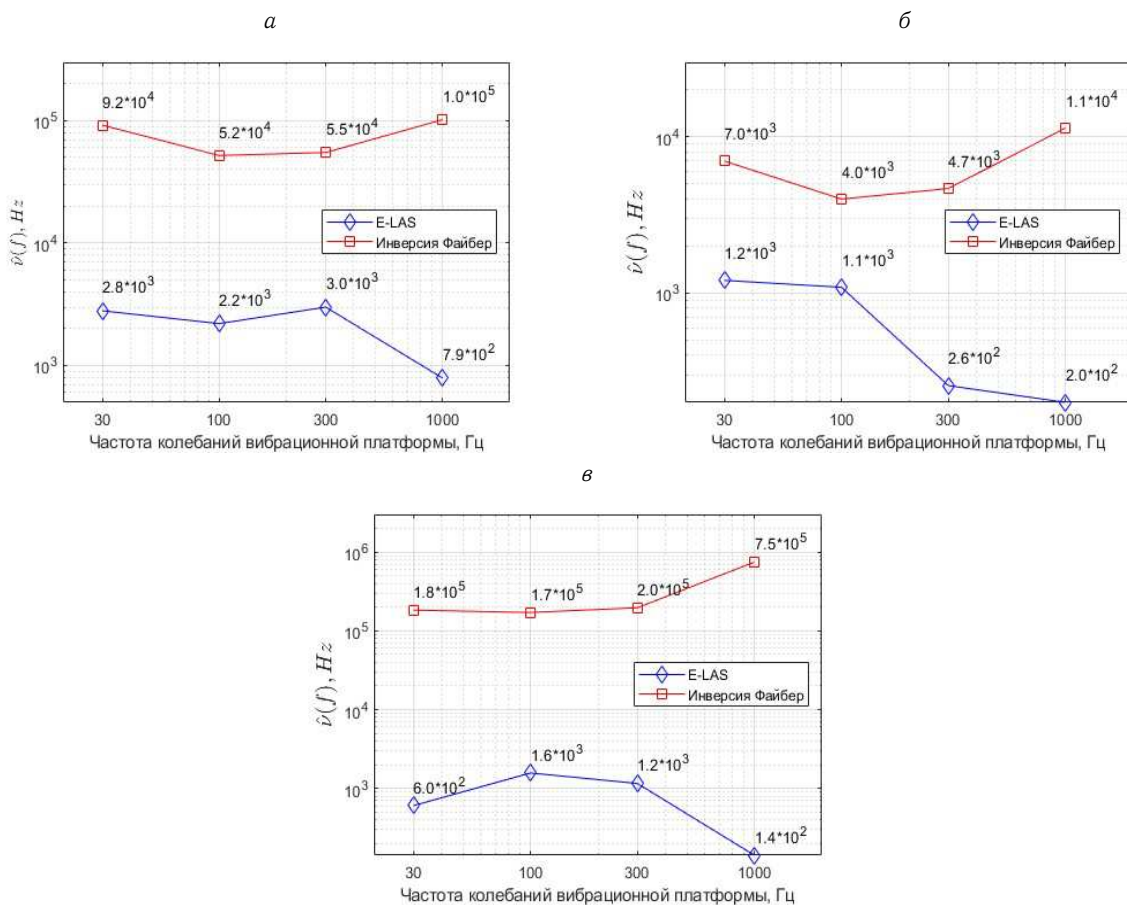


Рис. 5. Результаты виброиспытаний полупроводникового лазера E-LAS и волоконного лазера Инверсия Файбер в различных положениях: а — горизонтально, б — вертикально, в — боком

как волоконные лазеры оказались более чувствительны к внешним вибрациям, в данном эксперименте был исследован волоконный лазер Инверсия Файбер. Данный образец испытывался в рамках ранее продемонстрированной схемы со следующими ускорениями:

0.01 g, 0.03 g, 0.1 g, 0.2 g на частоте модуляции 300 Гц в вертикальном положении (как наиболее чувствительном). Результат данного эксперимента продемонстрирован на рис. 6.

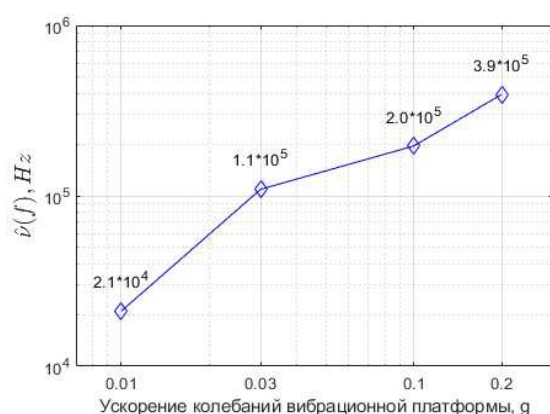


Рис. 6. Зависимости отклонения частоты генерации от величины прикладываемого ускорения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продемонстрирована методика количественной оценки влияния вибрации на стабильность оптической частоты излучения одночастотного лазерного источника.

Показано, что, несмотря на преимущества волоконных лазеров над полупроводниковыми в лабораторных условиях в уровне фазового шума, большая длина резонатора волоконного лазера приводит к повышенной чувствительности к вибрациям на всех частотах, что важно учитывать при эксплуатации таких лазеров в условиях внешних вибраций (например, при их размещении на БПЛА, вблизи авто- или железных дорог и т.п.). Также продемонстрирована линейная зависимость отклонения частоты генерации от величины прикладываемого ускорения. Полученные результаты могут быть полезны при разработке систем, где необходимо учитывать вибрации окружающей среды, в частности, лидаров и систем безопасности на транспортных магистралях.

Авторы выражают благодарность коллективу компании Т8, принимавшему непосредственное участие в проведении и постановке представленных экспериментов, а также научному руководителю группы Никитину Сергею Петровичу.

- [1] Nikitin S., Fominyakov E., Khurasov D. et. al. // Journal of Lightwave Technology. **38**, № 6. 1446 (2020).
- [2] Vlasova S., Vlasov A., Alloyarov K., Volkova T. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing. **539**, № 1. 012137 (2020).
- [3] Abdulfattah A., Gausmann S., Sincore A. et. al. // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. **1003**, № 1. 012120 (2018).
- [4] Wu W., Liu X. // Optik. **126**, № 20. 2411 (2015).
- [5] Hati A., Nelson C.W., Howe D.A. // Joint Conference of the IEEE International Frequency Control and the European Frequency and Time Forum (FCS) Proceedings. IEEE. C. 1–4 (2011).
- [6] Kashirina E.K., Lobach I.A., Kablukov S.I. // Photonics. MDPI. **11**, № 8. 731 (2024).
- [7] Alalusi M., Brasil P., Lee S. et. al. // Fiber Optic Sensors and Applications VI. SPIE. **7316**. 235 (2009).
- [8] Heinzl G., Rudiger A., Schillinget R. // Max Planck Inst. Tech. Rep. (2002). <http://hdl.handle.net/11858/00-001M-0000-0013-557A-5>
- [9] Riehle F. Frequency standards: basics and applications. John Wiley and Sons, 2006.
- [10] Ludvigsen H., Tossavainen M., Kaivola M. // Optics Communications. **155**, № 1–3. 180 (1998).

Research on vibration resistance of fiber and solid-state lasers

A.Y.Danilov^{1,2,a}, E.A.Fomiryakov^{1,b}, G.Y.Ivanov^{1,3,c}, A.V.Reznikov^{1,d}

¹T8 LLC, Moscow, 107076, Russia

²Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Moscow 117303, Russia

³Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Moscow 117303, Russia

E-mail: ^adanilov.a.y@t8.ru, ^bfomiryakov@t8.ru, ^civanov.g.y@t8.ru, ^dreznikov@t8.ru

Phase-frequency stability degradation under mechanical vibrations was characterized for single-frequency high-coherence fiber and semiconductor lasers. Vibration sensitivity showed strong dependence on both laser type (diode vs. fiber) and spatial orientation, with semiconductor devices demonstrating greater vibration resistance.

PACS: 42.55.Wd, 42.60.By, 42.62.-b.

Keywords: fiber laser, semiconductor laser, vibration effects.

Received 30 May 2025.

Сведения об авторах

- Данилов Антон Юрьевич — инженер 2 категории; e-mail: danilov.a.y@t8.ru.
- Фомиряков Эдгар Андреевич — вед. инженер-исследователь; e-mail: fomiryakov@t8.ru.
- Иванов Григорий Юрьевич — вед. инженер-исследователь; e-mail: ivanov.g.y@t8.ru.
- Резников Андрей Владимирович — гл. инженер проекта; e-mail: reznikov@t8.ru.