

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 681.586.54

ВРЕМЕННЫЕ И СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ИЗЛУЧЕНИЯ РОС-ЛАЗЕРА ПРИ САМОЗАХВАТЕ ЧАСТОТЫ
МОДОЙ ВНЕШНЕГО ВОЛОКОННОГО КОЛЬЦЕВОГО
РЕЗОНАТОРА¹

©2026 г. Д.П. Качалкин^{а, *}, И.С. Паняев^а, П.А. Итрин^а,
М.В. Прибылов^а, А.И. Абанин^а, Д.А. Коробко^а, А.А. Фотиади^{а, б}

^а Ульяновский государственный университет

Россия, 432017, Ульяновск, ул. Льва Толстого, 42

^б Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе

Российской академии наук

Россия, 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

*E-mail: dkachalkin@list.ru

Поступила в редакцию 20.04.2026

После доработки 11.05.2026

Принята к публикации 18.06.2026

Экспериментально исследованы временные и статистические характеристики излучения узкополосного лазерного источника, собранного путем сварки стандартного полупроводникового лазерного диода с распределенной обратной связью с внешним волоконным кольцевым резонатором. В такой конфигурации эффект самозахвата частоты обеспечивает сужение линии генерации на несколько порядков. Однако из-за отсутствия активной стабилизации лазер сохраняет чувствительность к температурным и вибрационным воздействиям, что приводит к частым перескокам мод, а также к ухудшению качества узкополосной генерации и регистрируемых рефлектограмм. Измерены временные зависимости интенсивности излучения, ширины линии генерации и центральной частоты лазерного излучения на интервале наблюдения 1 ч при частоте дискретизации 250000 выборок в секунду. По экспериментальным данным построены статистические распределения указанных параметров. Для оценки влияния внешних температурных флуктуаций измерения выполнены при выключенной и включенной термостабилизации. Полученные результаты представляют интерес для выбора методов повышения качества регистрации акустических воздействий при использовании исследуемого лазера в системах DAS.

Ключевые слова: узкополосная генерация; распределенные волоконные датчики; микроволновая фотоника.

¹ Международная конференция “Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорики 2026”, Россия, Пермь, 26–28 мая 2026 г.

1. ВВЕДЕНИЕ

Распределенные волоконные датчики в настоящее время широко применяются для мониторинга протяженных объектов и сред, включая трубопроводы, элементы транспортной инфраструктуры, периметры охраняемых объектов и природные территории [1–9]. В таких системах важнейшую роль играет задающий лазерный источник, поскольку его спектральные и статистические характеристики непосредственно влияют на качество регистрируемых рефлектограмм и чувствительность системы к внешним воздействиям [10–14].

Особенно высокие требования к источнику предъявляются в фазочувствительных схемах регистрации, таких как распределенные акустические датчики (DAS) [15–21], где нестабильность частоты и амплитуды излучения приводят к размыванию интерференционной картины и, как следствие, к росту шумов и ухудшению воспроизводимости измерений. Как правило, для обеспечения требуемых характеристик в системах DAS используются специализированные узкополосные лазерные источники, отличающиеся высокой спектральной чистотой и стабильностью генерации. Однако стоимость таких источников остается одним из факторов, ограничивающих широкое внедрение DAS в приложениях, чувствительных к цене системы. В связи с этим представляет интерес разработка более простых и доступных лазерных конфигураций, обеспечивающих приемлемое качество генерации при существенно меньшей стоимости.

Одним из возможных решений является использование стандартного полупроводникового лазерного диода с распределенной обратной связью (РОС-лазера) в сочетании с внешним волоконным кольцевым резонатором [22]. При прямой сварке этих элементов может быть реализована простейшая полностью волоконная конфигурация, в которой эффект самозахвата частоты модой внешнего резонатора обеспечивает значительное сужение линии генерации лазера. Такой подход позволяет использовать стандартные волоконные компоненты, сохраняющие поляризацию, и тем самым упростить конфигурацию источника, в частности, повысить ее устойчивость к поляризационным флуктуациям [23, 24]. Вместе с тем отказ от развитых средств активной стабилизации, виброизоляции и высокоточной термостабилизации в пользу простоты и низкой стоимости системы неизбежно приводит к сохранению остаточной чувствительности лазера к внешним возмущениям. Температурные флуктуации и механические воздействия могут вызывать перескоки мод внешнего резонатора,

сопровождающиеся кратковременной дестабилизацией генерации [25–28]. Тем не менее большую часть времени такая система остается пригодной для регистрации.

С целью оценки возможности практического использования такой конфигурации в составе DAS в данной работе было проведено экспериментальное исследование временных и статистических характеристик излучения простейшего узкополосного лазерного источника на основе стандартного РОС-лазера с samozaxvatom частоты модой внешнего волоконного кольцевого резонатора. Для достижения этой цели измерялись временные зависимости интенсивности излучения, ширины линии генерации и центральной частоты лазерного излучения на длительном интервале наблюдения, поскольку именно эти величины определяют устойчивость работы источника; по полученным данным строились статистические распределения указанных параметров; отдельно анализировалось влияние термостабилизации на характер временной эволюции и статистику исследуемых характеристик.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ КОНФИГУРАЦИЯ

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки, собранной из стандартных РМ-волоконных компонентов. В качестве задающего источника использовался РОС-лазерный диод Lasercom LDS-1550-DFB-2.5G-1550. При рабочей температуре диода 25 °С устройство обеспечивало выходную мощность до 15 мВт на длине волны около 1552 нм в линейной поляризации вдоль медленной оси двулучепреломления волокна. Излучение проходило через оптический циркулятор (ЦИР) и вводилось во внешний волоконный кольцевой резонатор общей длиной около 2 м. Особенность используемого резонатора заключалась в его конструкции: он был выполнен на основе одного РМ-ответвителя 99/1 на волокне Nufern PM1550-XP, при этом соединяемые в месте сварки концы волокна были повернуты друг относительно друга на 90°. В результате резонатор состоял из двух идентичных отрезков РМ-волокна длиной примерно по 1 м, с одной стороны объединенных в ответвителе 99/1, а с другой - сваренных друг с другом с поворотом осей двулучепреломления на 90°. Место данной сварки обозначено на рис. 1 крестом.

Рис. 1. Схема эксперимента. Обозначения: РОС – лазерный диод с РОС; ЦИР – циркулятор; ИО – оптический изолятор; КР – кольцевой резонатор; ПС – поляризационный светоделитель; АТТ – аттенюатор (0–60 дБ); ФД – фотодетектор; ПФ – переменный фазосдвигатель; СИ – самогетеродинный интерферометр; ОС – цифровой осциллограф; АС – радиочастотный спектроанализатор; сплошная линия – элементы в термоизоляционном боксе. Крест – место сварки с поворотом осей на 90°

Один из выходов поляризационного светоделителя (ПС) через изолятор (ОИ) подключался к делителю 80/20, который разделял сигнал между фотодетектором (ФД) и системой измерения самогетеродинного спектра (СИ). Излучение со второго выхода ПС направлялось в канал обратной связи. Регулировка величины сигнала обратной связи, необходимой для достижения устойчивого эффекта самозахвата частоты, производилась при помощи переменного аттенюатора (АТТ). Оптический изолятор и делитель 80/20 были выполнены на стандартном одномодовом волокне. Сигнал с фотодетектора поступал на осциллограф Infinium MSO9404A (ОС). Система измерения самогетеродинного спектра (СИ) [29] включала в себя волоконный интерферометр Маха-Цандера (разница плеч 50 км) с акустооптическим модулятором в одном из плеч (рабочая частота 80 МГц) и фотодетектор, сигнал с которого подавался на радиочастотный анализатор Rohde & Schwarz FSP40 (АЧ).

Для повышения долговременной стабильности генерации в работе использовалась отдельная система термостабилизации на базе платы Arduino, предназначенная для поддержания температуры внутри корпуса лазера на заданном уровне 25 °С. Достигнутая точность термостабилизации составляла примерно 0.0001°С. Такая система обеспечивала фиксацию резонансной частоты кольцевого резонатора и, соответственно, рабочей длины волны лазера, а также уменьшала долговременный частотный дрейф. Для реализации термостабилизации часть лазерной схемы, отмеченная на рис. 1, размещалась внутри термостабилизированного корпуса и монтировалась на алюминиевой пластине, оснащенной нагревателем и датчиком температуры. Экспериментальные исследования проводились как при включенной, так и при выключенной термостабилизации, что позволило сопоставить временные и статистические характеристики генерации в обоих режимах.

3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Измерения проводились при токе накачки 82 мА и температуре диода 25 °С. Общая продолжительность каждого эксперимента составляла 3600 с. В ходе измерений регистрировались три параметра: мгновенная интенсивность, центральная частота лазерного излучения и ширина его самогетеродинного спектра по уровню –3 дБ. Для этого использовались маркерные измерения, на осциллографе маркер устанавливался на мгновенное значение амплитуды сигнала интенсивности, а на радиочастотном спектроанализаторе - один маркер на частоту максимума самогетеродинного спектра, другой - на его ширину.

При регистрации временной эволюции интенсивности на цифровом осциллографе использовался режим прокрутки данных, обеспечивавший визуализацию сигнала в виде непрерывно движущейся развертки по принципу самописца. Горизонтальный масштаб составлял 200 мс, полоса пропускания достигала 55.4 кГц, а частота дискретизации была установлена на уровне 250 кВыб/с. Выбор данного режима был обусловлен необходимостью длительного наблюдения за временной динамикой сигнала с одновременной фиксацией его текущего амплитудного значения. Режим регистрации в реальном времени для данной задачи оказался менее удобным, поскольку используемая маркерная система позволяла надежно фиксировать только пиковое значение сигнала, но не обеспечивала столь же наглядного контроля его эволюции на длительном интервале.

При регистрации спектральных характеристик на радиочастотном спектроанализаторе использовались следующие параметры: время развертки 25 мс, полоса пропускания видеосигнала 10 кГц и разрешение по частоте 3 кГц. Измерения выполнялись в режиме мгновенного спектра с автоматической перенастройкой маркеров после каждого цикла измерений. По положению спектрального максимума определялась центральная частота излучения. Ширина линии генерации определялась по измеренной ширине самогетеродинного спектра путем ее деления на $\sqrt{2}$ [29–32].

Выбор указанных параметров измерения определялся необходимостью достижения компромисса между точностью и скоростью регистрации. При увеличении ширины полосы пропускания видеосигнала при фиксированном частотном разрешении снижалась скорость измерений. Кроме того, при кратковременном выходе лазера из режима самозахвата частоты, который мог наблюдаться даже при включенной термостабилизации, возникающее уширение спектра не всегда успевало корректно отображаться на экране анализатора. Аналогичная ситуация имела место и при уменьшении частотного разрешения при фиксированной полосе пропускания видеосигнала: в этом случае быстрые изменения спектральных характеристик регистрировались не в полном объеме, что снижало информативность измерений.

Процесс измерения непрерывно записывался на видео с последующей разбивкой записи на отдельные кадры с частотой 25 кадров в секунду. В общей сложности из каждого видеофайла было получено 92842 кадра, которые затем обрабатывались с использованием алгоритма оптического распознавания данных. После этого выполнялись группировка результатов и коррекция распознанных значений, что обеспечивало формирование достоверного массива экспериментальных данных.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

На основе записанных экспериментальных данных были построены временные зависимости исследуемых параметров - интенсивности выходного излучения лазера, центральной частоты генерации и ширины линии генерации, представленные на рис. 2. По этим данным были построены соответствующие статистические распределения для этих параметров, представленные на рис. 3.

Рис. 2. Временные характеристики лазера без термостабилизации (а–в) и с термостабилизацией (г–е): зависимость нормированной мощности от времени (а, г); зависимость ширины линии от времени (б, д); зависимость отклонения от центральной частоты по времени (в, е)

Рис. 3. Статистические характеристики лазера без термостабилизации (а, б) и с термостабилизацией (в, г): зависимость нормированной мощности от времени (а, в); зависимость ширины линии от времени (б, г)

Рассмотрение результатов начнем с режима без термостабилизации. Анализ амплитуды сигнала на фотодетекторе показал, что в этом случае интенсивность лазерной генерации изменялась (по показаниям фотодетектора) в диапазоне от 0.72 до 1.19 при среднем значении 7 мВт, принятом за 1 (рис. 2а, 3а). В режиме стабильной генерации наблюдались две характерные области значений интенсивности: 0.73–0.75 и 0.93–1.03 при той же нормировке. Анализ ширины линии генерации при тех же условиях показал, что ее значения изменялись в диапазоне 0.6–11 кГц при среднем значении 2 кГц (рис. 2б, 3б). Доля времени, в течение которого система находилась в режиме генерации излучения с шириной линии менее 3.6 кГц, составляла около 93% (2314.8 с), тогда как периоды более широкополосной генерации занимают примерно 7% от общего времени (1285.2 с). Хорошо видно, что такое уширение спектра происходит на коротких интервалах времени, где флуктуации интенсивности наиболее значительны. Типичное время единичного эпизода уширения спектра – менее 1 с. Дополнительную информацию дает анализ отклонения центральной частоты самогетеродинного спектра относительно рабочего значения 80 МГц (рис. 2в). При выключенной термостабилизации максимальное отклонение достигало 87.5 кГц. При этом временная зависимость частоты характеризовалась выраженной шумовой составляющей, указывающей на повышенную нестабильность лазерной генерации.

При включенной термостабилизации интенсивность выходного сигнала изменялась в более узком диапазоне — от 0.78 до 0.9 при среднем значении 0.8 при нормировке примерно к 7 мВт (рис. 2г, 3г). Ширина линии генерации при включенной

термостабилизации также изменялась в диапазоне 0.4–7.6 кГц, более узком, чем в случае генерации без термостабилизации, хотя среднее значение ширины линии составляло также приблизительно 2 кГц (рис. 2д, 3д). Доля времени, в течение которого система находилась в режиме генерации излучения с шириной линии менее 3.6 кГц, составляла примерно 95% (2314.8 с), тогда как периоды более широкополосной генерации, сопровождаемые более сильными флуктуациями интенсивности, занимали примерно 5% от общего времени (1285.2 с). Анализ отклонения центральной частоты от значения 80 МГц показал, что при включенной термостабилизации максимальное отклонение не превышало 25 кГц (рис. 2е). Таким образом, по сравнению с режимом без термостабилизации максимальное частотное отклонение уменьшалось в 3.5 раза. Кроме того, временная зависимость частоты становилась существенно менее зашумленной, что подтверждает повышение долговременной стабильности генерации.

Полученные результаты показывают, что термостабилизация оказывает наиболее заметное влияние на амплитудную и частотную стабильность лазера. При ее отсутствии существенно возрастает доля времени, в течение которого система выходит из устойчивого режима генерации, а также увеличиваются диапазон изменения интенсивности и частотные отклонения. Влияние термостабилизации на ширину линии выражено слабее: среднее значение в обоих режимах остается одинаковым, однако стабилизация приводит к сужению общего диапазона изменений и уменьшению вероятности значительных спектральных отклонений. В целом включение термостабилизации обеспечивает более устойчивую работу лазерной системы и улучшает условия ее применения в качестве задающего генератора в системах DAS.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты убедительно демонстрируют, что термостабилизация лазера повышает стабильность всех исследуемых параметров: сужает диапазон изменения ширины линии излучения, стабилизирует уровень интенсивности выходного излучения, удерживает центральную частоту генерации в более узком диапазоне. Напротив, отсутствие термостабилизации приводит к росту общей нестабильности работы лазера, расширению диапазонов изменения всех параметров, что несколько снижает потребительские характеристики простейшего узкополосного источника. Эти данные имеют важное значение для практических применений таких источников в распределенных системах мониторинга. В частности, предполагается, что в дальнейшем такие источники будут использованы в качестве задающих генераторов в

распределенных акустических сенсорах, а выявленные закономерности позволят осуществить правильный подбор алгоритма обработки сигнала для достижения приемлемого соотношения сигнал/шум, обеспечивая работу сенсора на уровне значительно более дорогих систем [33, 34].

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, гранты № 23-79-30017 (разд. 1, 2) и № 25-72-10174 (разд. 3, 4).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Soto M.A.* Handbook of Optical Fibers. Ed. G.-D. Peng. Singapore: Springer. 2018. P. 1663.
2. *Hartog A.H., Payne D.N.* IEE Colloquium on Optical Fibre Sensors. London: IEE. 1982. Digest 1982/60. P. 2/1.
3. *Yang Y., Soto M.A., Thévenaz L.* Light Sci. Appl. 2026. V. 15. № 69. <https://doi.org/10.1038/s41377-025-02168-3>.
4. *Lobach I.A., Fotiadi A.A., Yatseev V.A., Konstantinov Y.A., Barkov F.L., Claude D., Kambur D.A., Belokrylov M.E., Turov A.T., Korobko D.A.* Sensors. 2024. V. 24. Art. 5432. <https://doi.org/10.3390/s24165432>.
5. *Turov A., Fotiadi A., Korobko D., Panyaev I., Belokrylov M., Barkov F., Konstantinov Y., Kambur D., Sakhabutdinov A., Qaid M.* Sensors. 2025. V. 25. Art. 7225. <https://doi.org/10.3390/s25237225>.
6. *Ashry I., Mao Y., Wang B., Hveding F., Bukhamsin A.Y., Ng T.K., Ooi B.S.* J. Lightwave Technol. 2022. V. 40. P. 1407.
7. *Faustov A.V., Gusarov A.V., Mégret P., Wuilpart M., Zhukov A.V., Novikov S.G., Svetukhin V.V., Fotiadi A.A.* Tech. Phys. Lett. 2015. V. 41. P. 414. <https://doi.org/10.1134/S1063785015050053>.
8. *Faustov A.V., Gusarov A.V., Mégret P., Wuilpart M., Zhukov A.V., Novikov S.G., Svetukhin V.V., Fotiadi A.A.* Results Phys. 2016. V. 6. P. 86. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2016.02.001>.
9. *Zheng H., Zhang J., Guo N., Zhu T.J.* Lightwave Technol. 2021. V. 39. P. 3801. <https://doi.org/10.1109/JLT.2020.3039812>.

10. Wang Z., Jiang Y., Chen F., Cui J. Opt. Express. 2025. V. 33. P. 25743. <https://doi.org/10.1364/OE.562590>.
11. Fotiadi A.A., Korobko D.A., Zolotovskii I.O. Optoelectron. Instrum. Data Process. 2023. V. 59. P. 66. <https://doi.org/10.3103/S8756699023010065>.
12. Lopez-Mercado C.A., Korobko D.A., Zolotovskii I.O., Fotiadi A.A. Sensors. 2021. V. 21. Art. 6859.
13. Yang C., Liang L., Qin L., Tang H., Lei Y., Jia P., Chen Y., Wang Y., Song Y., Qiu C. et al. Nanophotonics. 2023. V. 12. P. 197. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2022-0699>.
14. Huang S., Zhu T., Yin G., Lan T., Li F., Huang L., Liu M. Sci. Rep. 2017. V. 7. Art. 1185. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01351-w>.
15. Healey P., Malyon D.J. Electron. Lett. 1982. V. 18. P. 862–863. <https://doi.org/10.1049/el:19820585>.
16. Zhao L., Tang D., Liu A. Chaos. 2006. V. 16. Art. 013128.
17. Дудин А.С., Харасов Д.Р., Фомиряков Э.А., Никитин С.П., Наний О.Е., Трещиков В.Н. Приборы и техника эксперимента. 2023. № 5. С. 92. <https://doi.org/10.31857/S003281622305018X>.
18. Kishida K., Aung T.L., Lin R. Sensors. 2025. V. 25. Art. 98. <https://doi.org/10.3390/s25010098>.
19. Deng J., Jin L., Wang H., Zhang Z., Liu Y., Meng F., Wang J., Li Z., Wu J. Infrastructures. 2025. V. 10. Art. 228. <https://doi.org/10.3390/infrastructures10090228>.
20. Gritsenko T.V., Chesnokov G.Y., Koshelev K.I., Khan R.I., Stepanov K.V., Valba O.V., Chernutsky A.O., Svelto C., Zhirnov A.A., Pnev A.B. et al. Proc. 2023 IEEE Int. Conf. on Metrology for eXtended Reality, Artificial Intelligence and Neural Engineering (MetroXRINE). 2023. P. 383
21. Turov A.T., Konstantinov Y.A., Totmina E.E., Votnova A.G., Masich G.F., Korobko D.A., Fotiadi A.A. Sensors. 2025. V. 25. Art. 2101. <https://doi.org/10.3390/s25072101>.
22. Bueno Escobedo J.L., Spirin V.V., López-Mercado C.A., Márquez Lucero A., Mégret P., Zolotovskii I.O., Fotiadi A.A. Results Phys. 2017. V. 7. P. 641. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2017.01.013>.
23. Bueno Escobedo J.L., Spirin V.V., López-Mercado C.A., Mégret P., Zolotovskii I.O., Fotiadi A.A. Results Phys. 2016. V. 6. P. 59. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2016.01.017>.
24. Bueno Escobedo J.L., Jason J., López-Mercado C.A., Spirin V.V., Wuilpart M., Mégret P., Korobko D.A., Zolotovskiy I.O., Fotiadi A.A. Results Phys. 2019. V. 12. P. 1840. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.02.023>.
25. Spirin V.V., Bueno Escobedo J.L., Korobko D.A., Mégret P., Fotiadi A.A. Opt. Express. 2020. V. 28. P. 478. <https://doi.org/10.1364/OE.28.000478>.
26. Spirin V.V., Bueno Escobedo J.L., Korobko D.A., Mégret P., Fotiadi A.A. Opt. Express. 2020. V. 28. P. 37322. <https://doi.org/10.1364/OE.406040>.

27. *Spirin V.V., Bueno Escobedo J.L., Miridonov S.V., Maya Sánchez M.C., López-Mercado C.A., Korobko D.A., Zolotovskii I.O., Fotiadi A.A.* Opt. Laser Technol. 2021. V. 141. Art. 107156. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107156>.
28. *Panyaev I.S., Itrin P.A., Korobko D.A., Fotiadi A.A.* J. Lightwave Technol. 2024. V. 42. P. 2928. <https://doi.org/10.1109/JLT.2023.3348994>.
29. *Derickson D., Hentschel C., Vobis J.* Fiber Optic Test and Measurement. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1998. V. 8.
30. *Peng Y.* Chin. Phys. Lett. 2013. V. 30. № 8. Art. 084208. <https://doi.org/10.1088/0256-307X/30/8/084208>.
31. *Mercer L.B.* J. Lightwave Technol. 1991. V. 9. № 4. P. 485. <https://doi.org/10.1109/50.76663>.
32. *Chen M., Meng Z., Wang J., Chen W.* Opt. Express. 2015. V. 23. P. 6803. <https://doi.org/10.1364/OE.23.006803>.
33. *Turov A.T., Konstantinov Y.A., Barkov F.L., Korobko D.A., Zolotovskii I.O., Lopez-Mercado C.A., Fotiadi A.A.* Algorithms. 2023. V. 16. Art. 217. <https://doi.org/10.3390/a16050217>.
34. *Turov A.T., Barkov F.L., Konstantinov Y.A., Korobko D.A., Lopez-Mercado C.A., Fotiadi A.A.* Algorithms. 2023. V. 16. Art. 440. <https://doi.org/10.3390/a16090440>.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Схема эксперимента. Обозначения: РОС – лазерный диод с РОС; ЦИР – циркулятор; ИО – оптический изолятор; КР – кольцевой резонатор; ПС – поляризационный светоделитель; АТТ – аттенюатор (0–60 дБ); ФД – фотодетектор; ПФ – переменный фазосдвигатель; СИ – самогетеродинный интерферометр; ОС – цифровой осциллограф; АС – радиочастотный спектроанализатор; сплошная линия – элементы в термоизоляционном боксе. Крест – место сварки с поворотом осей на 90°
- Рис. 2.** Временные характеристики лазера без термостабилизации (**а–в**) и с термостабилизацией (**г–е**): зависимость нормированной мощности от времени (**а, г**); зависимость ширины линии от времени (**б, д**); зависимость отклонения от центральной частоты по времени (**в, е**)
- Рис. 3.** Статистические характеристики лазера без термостабилизации (**а, б**) и с термостабилизацией (**в, г**): зависимость нормированной мощности от времени (**а, в**); зависимость ширины линии от времени (**б, г**)

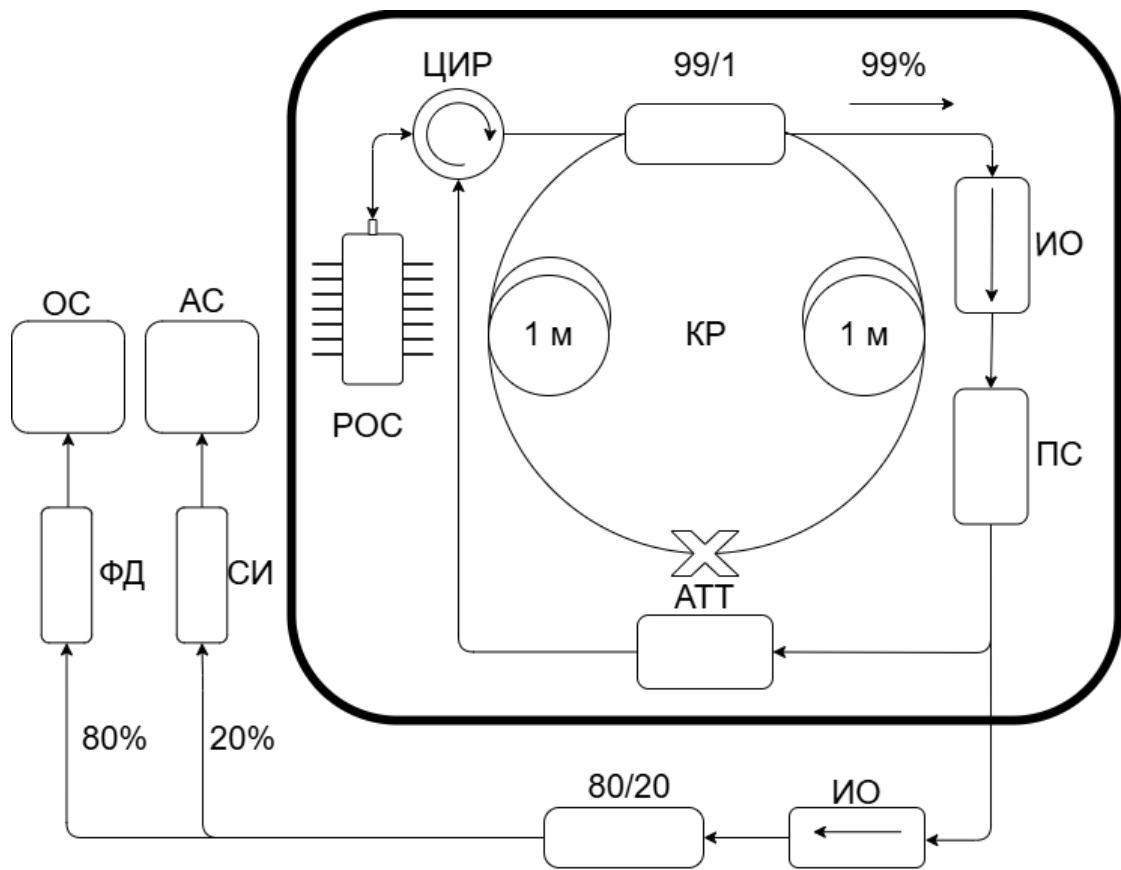


Рис. 1.

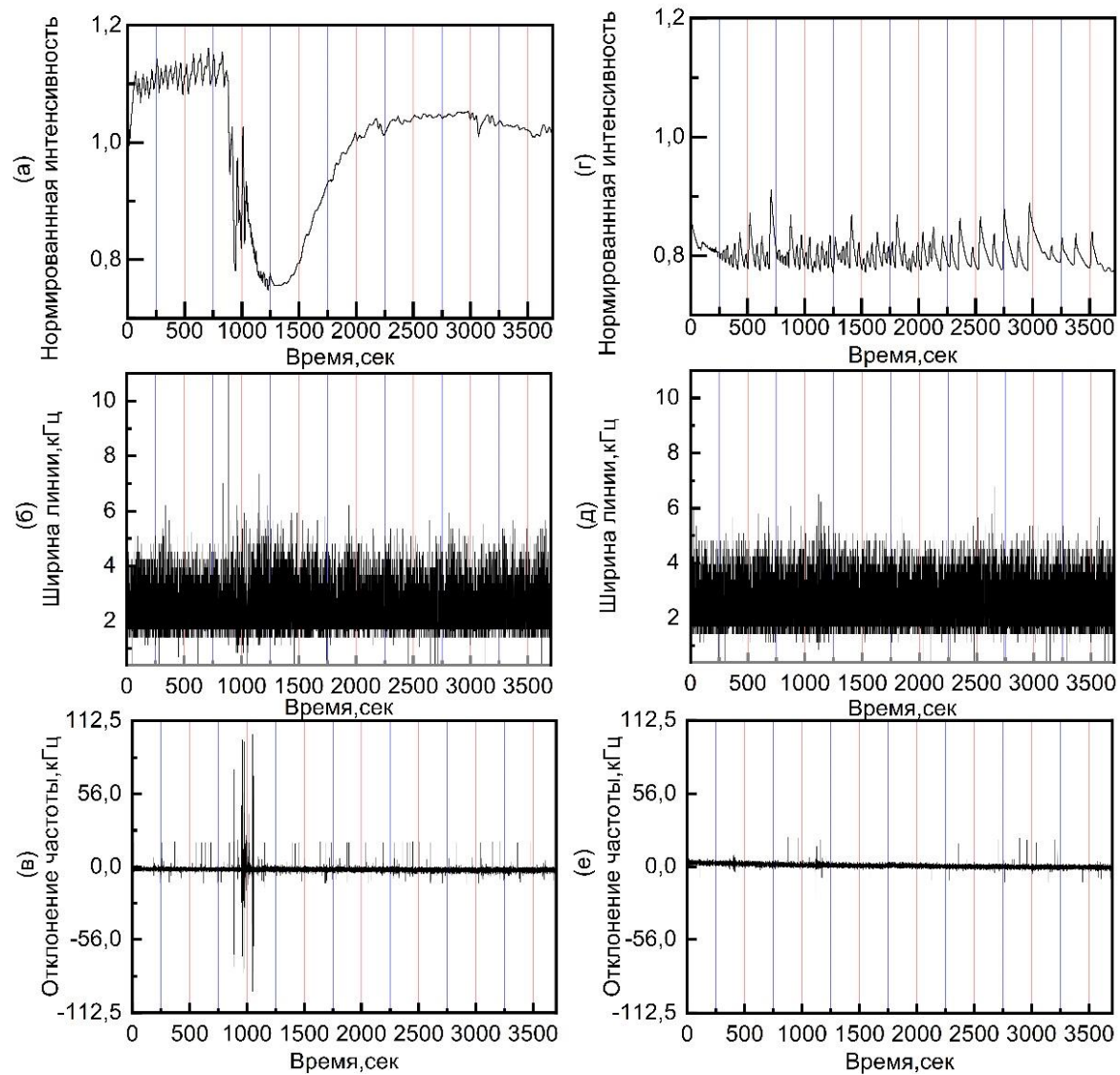


Рис. 2.

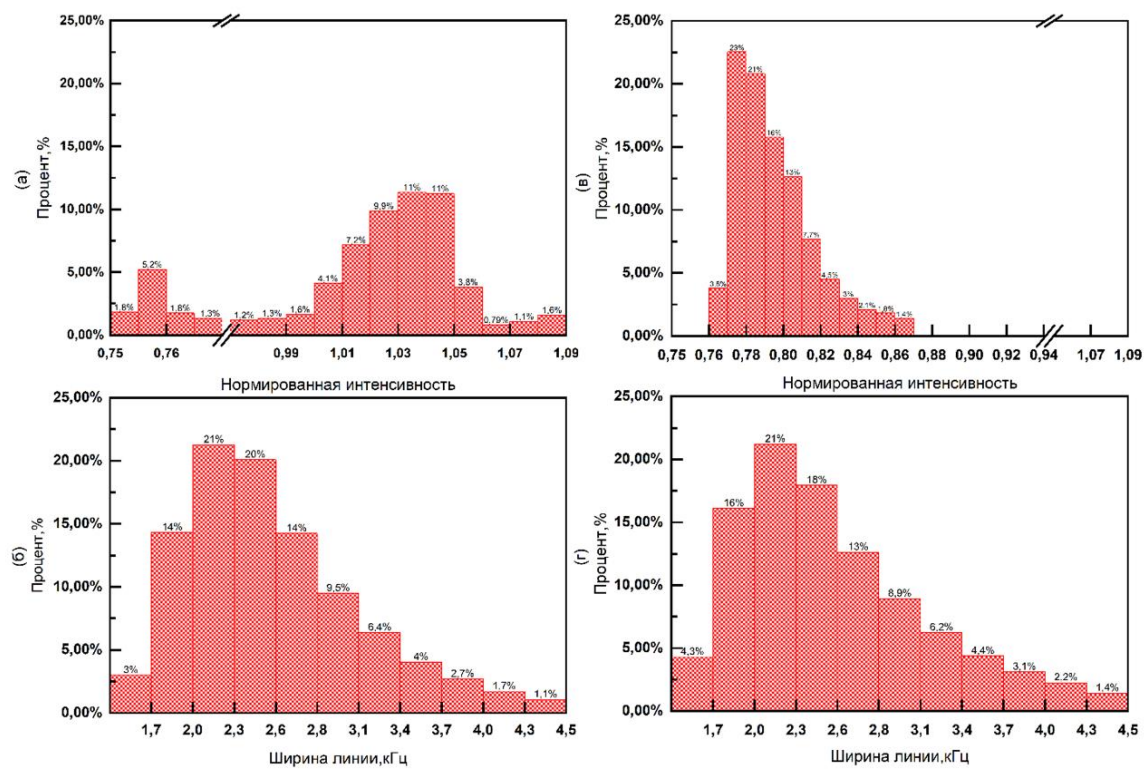


Рис. 3.