

УДК 621.373.826; 535.345.673

## ПРЯМОЕ СРАВНЕНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ ПЕРЕСТРАИВАЕМЫХ ЛАЗЕРОВ С РАЗНЫМИ ТИПАМИ ВНЕШНЕГО РЕЗОНАТОРА

В. В. Васильев<sup>1</sup>, Д. С. Чучелов<sup>1</sup>, С. А. Зибров<sup>1</sup>, М. И. Васьковская<sup>1</sup>,  
Е. А. Цыганков<sup>1</sup>, К. М. Сабакаръ<sup>1</sup>, В. Л. Величанский<sup>1,2</sup>

*Предложен и опробован метод оценки устойчивости параметров излучения диодных лазеров с внешним резонатором к механическим воздействиям звукового диапазона частот. Приведены результаты сравнения лазеров с дифракционной решёткой и с внутррезонаторным интерференционным фильтром. Показаны особенности в отклике частоты излучения лазеров на внешнее акустическое воздействие.*

**Ключевые слова:** перестраиваемый лазер, стабильность оптической частоты, диодный лазер с внешним резонатором, интерференционный фильтр.

*Введение.* Доступность диодных лазеров для работы практически во всем видимом и ближнем ИК диапазонах, их невысокое энергопотребление, компактность и безопасность объясняют их доминирование на рынке при создании бытовой и промышленной аппаратуры, не требующей высоких оптических мощностей. Вместе с этим, возможность генерации излучения в широком диапазоне длин волн привели к их активному применению в оптической метрологии, атомной и молекулярной спектроскопии. Для достижения одночастотной генерации на требуемой частоте лазерный резонатор должен включать спектрально-селективный элемент, выделяющий единственную моду из всех, оказавшихся в полосе усиления диода. Это может быть эталон [1, 2], объемная решетка [3], интерференционный фильтр [4] и т. д. Наибольшее распространение получили оптические схемы с использованием отражательных дифракционных решеток: автоколлимационная (Литтрова) [5] или двухпроходная (Литмана–Меткальфа) [6]. Это связано как с доступностью и дешевизной решеток, так и с простотой практической реализации этих схем [7–9]. Однако создание лазеров для спектроскопии высокого и сверхвысокого

<sup>1</sup> ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: dimar@fian.smr.ru.

<sup>2</sup> НИЯУ «МИФИ», 115409 Россия, Москва, Каширское ш., 31.

разрешения требует решения технической внутренне противоречивой задачи: частота излучения должна быть перестроена до требуемого значения, а по его достижении – стать как можно менее чувствительной к внешним воздействиям. Привязка лазерной частоты к атомной линии решает эту задачу за счет значительного усложнения оптических и электронных узлов прибора и увеличения их стоимости. Отсюда вытекает необходимость в использовании таких оптических и механических схем внешнего резонатора, которые обеспечивают максимально жесткую связь элементов между собой. Тогда вместо нескольких резонансов относительно легких отдельных элементов останется одна более низкая частота с меньшей амплитудой колебаний из-за большей массы объединенных частей.

Для описания качества излучения перестраиваемого лазера традиционно используются такие его характеристики, как ширина линии генерации и дрейф частоты. Первая характеризует когерентность излучения и отображается спектральной плотностью частотных шумов. Вторая чаще всего представляется временной эволюцией длины волны излучения или ее девиацией Аллана. Обе характеристики отчасти несут информацию о чувствительности лазерного резонатора к внешним воздействиям [4], однако снятые в лабораторных, относительно спокойных условиях, они не дают полного представления о поведении лазера в акустически агрессивной среде.

В работе сравниваются два разработанных нами диодных лазера с внешним резонатором (ДЛВР) различной конструкции по степени их чувствительности к акустическому воздействию переменной частоты.

*Конструкции лазеров.* Проводилось сравнение лазеров, оптические схемы и механические конструкции которых, в целом, соответствовали описанным в работах [10] и [11]. Длины волн обоих лазеров совпадали с D1 линией рубидия (794 нм). В каждом использовались диоды с просветлением передней грани, остаточный коэффициент отражения которой не превышает по оценке производителя 0.1%. Оптические схемы исследуемых ДЛВР приведены на рис. 1.

Первый ДЛВР был собран по автоколлимационной схеме с дифракционной решеткой  $1800 \text{ мм}^{-1}$  в качестве селективного элемента (рис. 1(а)). Решетка устанавливалась на подвижный в плоскости дифракции рычаг, который обеспечивал согласованное изменение селективности решетки и длины резонатора, увеличивая диапазон непрерывной перестройки длины волны излучения. Однако при этом он же является и наиболее чувствительным к вибрации элементом. Излучение лазерного диода коллимировалось асферической линзой с числовой апертурой 0.6 и фокусом 4 мм. Длина резонатора

составляла 20 мм. Использовалась независимая стабилизация температур лазерного диода и корпуса лазера в целом. В отличие от работы [10], для упрощения конструкции применялся только один пьезоэлемент (Thorlabs PK2FMP2), позволяющий перестраивать частоту излучения лазера в диапазоне до 80 ГГц при синхронном сканировании длины резонатора и тока лазерного диода. Таким образом, для обеспечения ширины линии генерации лазера менее 1 МГц флуктуации напряжения на пьезоэлементе должны составлять не более  $10^{-5}$  от максимального значения выходного напряжения его контроллера (75 В), т. е. менее 1 мВ.

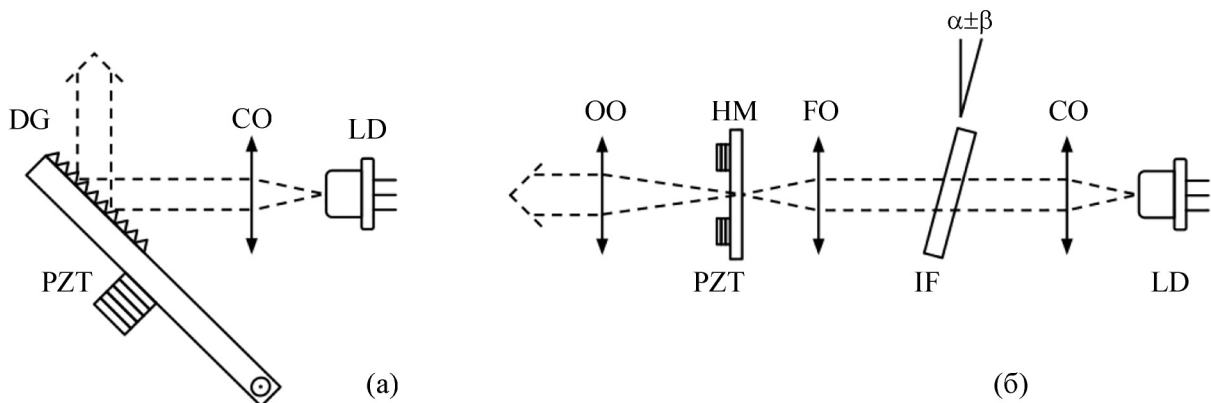


Рис. 1: Оптические схемы диодных лазеров с внешним резонатором: с дифракционной решеткой (а) и с внутррезонаторным интерференционным фильтром (б). LD – лазерный диод, CO – коллимирующий объектив, PZT – пьезокерамические элементы, DG – дифракционная решётка, IF – интерференционный фильтр, FO – фокусирующий объектив, HM – полупрозрачное зеркало, OO – выходной объектив.

Во втором ДЛВР в качестве селективного элемента использовался интерференционный фильтр с пропусканием 82% и шириной полосы на один проход 0.3 нм (рис. 1(б)). Одинаковые асферические линзы с числовой апертурой 0.6 и фокусным расстоянием 4 мм установлены внутри резонатора. Длина резонатора составляла приблизительно 50 мм. Корпус лазера из алюминиевого сплава Д16Т, служащий каркасом для всех оптических элементов, устанавливался на микрохолодильник и термостабилизировался. В работе [11] для вывода оптического излучения использовалось зеркало, установленное внутри резонатора и пространственно вырезающее часть лазерного пучка. Такая схема упростила механическую конструкцию: не требовались дополнительный объектив, пьезоэлемент с отверстием для вывода излучения, делительное зеркало. Однако дифракционные потери на краях этого зеркала существенно снижают уровень опти-

ческой обратной связи и приводят к увеличению порогового тока. В текущей работе излучение выводилось из лазерного резонатора традиционным способом через делительное выходное зеркало (НМ на рис. 1(б)) с коэффициентом отражения 30%, которое крепилось на два пьезоэлемента Thorlabs PA2JE.

Перестройка длины волны осуществляется за счет изменения угла падения лазерного пучка на фильтр. Как правило, это реализуется с помощью оправы, которая и становится элементом повышенной чувствительности к акустическому воздействию. Интерференционный фильтр, обладающий, в отличие от дифракционной решетки, аксиальной симметрией, позволяет применить оправу, в которой изменение угла падения луча на фильтр происходит не наклоном фильтра, а его вращением [11]. Для этого фильтр крепится на валу под небольшим углом  $\beta$  к его оси, определяющим диапазон регулировки угла падения за полный оборот вала  $\pm\beta$ . Вал помещается в отверстие, ось которого направлена по отношению к оптической оси лазера под углом  $\alpha$  наиболее вероятного пропускания фильтром искомой длины волны. Вращение вала позволяет перестраивать угол падения лазерного пучка на фильтр в диапазоне  $\alpha \pm \beta$ . Для этого фильтр крепится на клиновидном кольце с двугранным углом  $\beta$ , определяющим диапазон регулировки угла падения за полный оборот кольца  $\pm\beta$ . Кольцо может вращаться в цилиндрическом отверстии, ось которого направлена по отношению к оптической оси лазера под углом  $\alpha$ , отвечающим пропусканию фильтром требуемой длины волны в центре области грубой перестройки. Вращение вала позволяет перестраивать угол падения лазерного пучка на фильтр в диапазоне  $\alpha \pm \beta$ . В нашем приборе использовались углы 5 и 3 градуса, соответственно, что позволяло регулировать наклон фильтра в диапазоне от 2 до 8 градусов. Такая оправка со слабым откликом на механические возмущения, которые приводят к линейным смещениям объекта, продемонстрировала в составе лазерного резонатора высокую вибрационную устойчивость.

*Методика и результаты сравнения.* Для сравнения лазеров использовались спектры частотных шумов излучения (рис. 2) и девиации лазерной частоты (рис. 3) в условиях акустического воздействия переменной частоты.

В качестве частотного дискриминатора использовался внутридоплеровский резонанс насыщенного поглощения [12], соответствующий переходу  $F_g = 2 \rightarrow F_e = 1$  D1-линии  $^{87}\text{Rb}$ . Его ширина составляла 10 МГц. Оба лазера демонстрировали хорошую пассивную стабильность частоты и за время измерения не уходили со склона резонанса, поэтому дополнительная привязка не применялась. Регистрация сигнала пропускания атомной ячейки происходила в течение 1 секунды с временным разрешением 10 мкс,

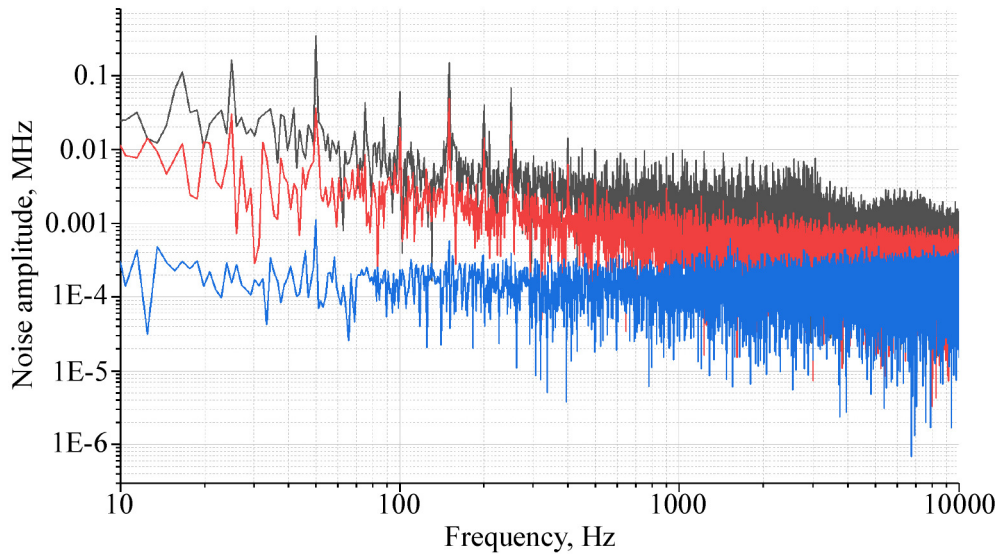


Рис. 2: Спектр частотных шумов испытываемых лазеров в акустически спокойных лабораторных условиях. Синяя (нижняя) кривая – шумы системы регистрации, красная (средняя) – шумы лазера с внутрирезонаторным интерференционным фильтром, черная (верхняя) – шумы лазера с дифракционной решеткой.

обеспечивающим полосу регистрируемого сигнала до 50 кГц. На рис. 2 представлены спектры частотных шумов в полосе 10 кГц с разрешением 1 Гц, полученные преобразованием Фурье записанных сигналов. Собственные шумы системы регистрации отображает нижняя кривая.

Измерения проводились поочередно с использованием для обоих лазеров одного и того же контроллера тока диода, температуры и напряжения на пьезоэлементе, чтобы избежать влияния электроники на результаты сравнения. Шумы лазера с дифракционной решеткой в несколько раз выше, чем у лазера с интерференционным фильтром. Это объясняется меньшей длиной резонатора и на порядок более высокой чувствительностью к флуктуациям напряжения на пьезоэлементе Thorlabs PK2FMP2. Узкие пики на частотах, кратных 25 Гц, в спектрах шумов связаны с сетевой частотой, её гармониками и субгармониками.

В целом, в акустически спокойных лабораторных условиях поведение лазеров сопоставимо: оба демонстрируют высокую пассивную стабильность частоты и близкие по величине ширины линии генерации, которые сравнивались через амплитуды шумов на склоне резонанса насыщенного поглощения и определялись, в основном, флуктуациями тока и напряжения на пьезоэлементах. Некоторый избыточный шум в окрестности

частот 1–3 кГц демонстрирует лазер с дифракционной решеткой, но без выявления каких-то резонансных свойств.

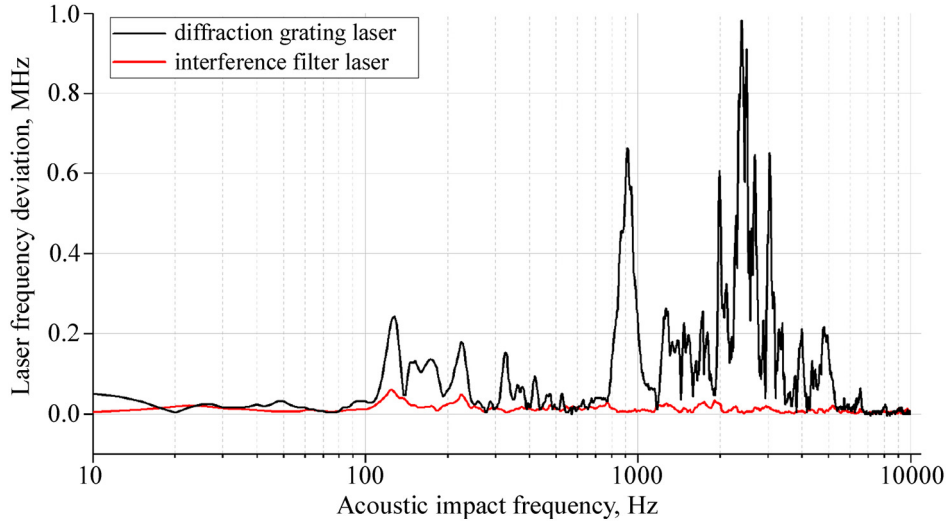


Рис. 3: Девияция частоты лазера с дифракционной решеткой (черная кривая) и лазера с интерференционным фильтром (красная кривая) в условиях акустического возмущения.

Чтобы сравнить, насколько отличается поведение лазеров в условиях акустического возмущения, к оптической плите, на которой были установлены ДЛВР, крепилась динамическая головка. Лазеры устанавливались на равном расстоянии от источника возмущения и схемы формирования внутридопплеровского резонанса. На головку подавался синусоидальный сигнал постоянной амплитуды, частота которого сканировалась в диапазоне от 10 Гц до 10 кГц за 80 секунд. В качестве дискриминатора, преобразующего частотные флуктуации в амплитудные, также использовался резонанс насыщенного поглощения в атомах рубидия. Для устранения дрейфа на временах измерения частота излучения стабилизировалась на склоне резонанса медленной петлей обратной связи с полосой 5 Гц и управлением, подаваемым на пьезоэлемент. Измерялся не спектральный состав регистрируемого сигнала, а амплитуда возникающей под действием звука переменной компоненты. Для этого применялся синхронный детектор Stanford Research SR830, и в качестве опорного использовался сигнал генератора, задающего частоту возмущения. Амплитуда возмущения выбиралась таким образом, чтобы на любой его частоте отклик в оптическом сигнале не выходил за пределы линейного преобразования дискриминатора. Результат измерений показан на рис. 3.

Полученные данные наглядно демонстрируют отличие двух ДЛВР в отклике на акустическое возмущение. Так в интервале частот от 800 Гц до 5 кГц девиация частоты лазера с решеткой в 20–30 раз выше девиации лазера с фильтром. Столь существенная количественная разница не ожидалась на основании данных рис. 2, поэтому описанный способ оценки акустической стабильности лазеров может служить полезным дополнением к набору выходных калибровочных тестов при изготовлении опытных и серийных приборов. Вместо атомной линии в качестве частотного дискриминатора может использоваться стабилизированный интерферометр с шириной резонанса порядка 1 МГц. Точная информация о собственных механических резонансах лазерной системы может помочь в расчете и изготовлении демпфирующих систем, необходимых при работе перестраиваемого лазера вне научной лаборатории в акустически агрессивном окружении.

*Заключение.* Проведено прямое сравнение акустической стабильности двух ДЛВР, отличающихся конструкцией внешнего резонатора: лазера автоколлимационной схемы и лазера с внутрирезонаторным интерференционным фильтром (“кошачий глаз”). Показано, что при сопоставимых спектрах собственных частотных шумов в покое лазеры могут обладать различной восприимчивостью спектра излучения к механическим возмущениям конструкции источника в акустическом диапазоне частот. Это было наглядно продемонстрировано по зависимости девиации частоты лазерного излучения от частоты внешнего акустического возмущения в диапазоне частот 0.1–10 кГц.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №19-12-00417.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] V. L. Velichanskii, A. S. Zibrov, V. S. Kargopol'tsev, et al., *Soviet Technical Physics Letters* **4**, 438 (1979).
- [2] F. Allard, I. Maksimovich, M. Abgrall, Ph. Laurent, *Review of Scientific Instruments* **75**, 54 (2004). DOI: 10.1063/1.1634359.
- [3] S. H. Yim, T. H. Kim, J.-M. Choi, *Review of Scientific Instruments* **91**, 046102 (2020). DOI: 10.1063/1.5140560.
- [4] D. J. Thompson, R. E. Scholten, *Review of Scientific Instruments* **83**, 023107 (2012). DOI: 10.1063/1.3687441.
- [5] A. S. Arnold, J. S. Wilson, M. G. Boshier, *Review of Scientific Instruments* **69**, 1236 (1998). DOI: 10.1063/1.1148756.

- [6] Y. Zhu, Z. Liu, X. Zhang, et al., *Optics and Laser Technology* **129**, 106272 (2020). DOI: 10.1016/J.OPTLASTEC.2020.106272.
- [7] L. Ricci, M. Weidemüller, T. Esslinger, et al., *Optics Communications* **117**, 541 (1995). DOI: 10.1016/0030-4018(95)00146-Y.
- [8] A. Andalkar, S. K. Lamoreaux, R. B. Warrington, *Review of Scientific Instruments* **71**, 4029 (2000). DOI: 10.1063/1.1319860.
- [9] S. D. Saliba, M. Junker, L. D. Turner, R. E. Scholten, *Applied Optics* **48**, 6692 (2009). DOI: 10.1364/AO.48.006692.
- [10] V. V. Vassiliev, S. A. Zibrov, V. L. Velichansky, *Review of Scientific Instruments* **77**, 013102 (2006). DOI: 10.1063/1.2162448.
- [11] V. V. Vassiliev, S. A. Zibrov, M. I. Vas'kovskaya, et al., *Bulletin of the Lebedev Physics Institute* **46**(10), 309 (2019). DOI: 10.3103/S1068335619100038.
- [12] A. M. Akulshin, V. A. Sautenkov, V. L. Velichansky, et al., *Optics Communications* **77**(4), 295 (1990). DOI: 10.1016/0030-4018(90)90094-A.

Поступила в редакцию 19 апреля 2023 г.

После доработки 11 августа 2023 г.

Принята к публикации 14 августа 2023 г.