

УДК 621.373.826; 535.345.673

ВИБРОУСТОЙЧИВЫЕ ДЛВР С УЗКОПОЛОСНЫМ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫМ ФИЛЬТРОМ

В. В. Васильев¹, С. А. Зибров¹, М. И. Васьковская¹, Д. С. Чучелов¹,
Е. А. Цыганков¹, С. В. Кузьмич², В. Л. Величанский^{1,3}

Предложена новая конструкция диодного лазера с внешним резонатором (ДЛВР), в котором селективным элементом служит интерференционный фильтр (ИФ). Ключевыми узлами разработанного ДЛВР, обеспечивающими высокую механическую стабильность и, как следствие, воспроизводимость характеристик прибора, являются узлы поворота селективного элемента и вывода излучения из лазерного резонатора. Предполагается использование такого ДЛВР в составе бортовых оптико-электронных систем.

Ключевые слова: перестраиваемый лазер, диодный лазер с внешним резонатором, интерференционный фильтр.

Введение. Диодные лазеры (ДЛ) широко используются в спектроскопии высокого разрешения и метрологии, обеспечивая настройку практически на любой атомный или молекулярный переход в видимом и ближнем ИК диапазонах спектра. Детектирование узких спектральных линий, особенно в случае охлажденных атомов, требует высокой когерентности излучения со спектральной шириной порядка или менее 1 МГц, которую для ДЛ обеспечивает внешний резонатор. Увеличение длины резонатора приводит к уплотнению продольных мод и необходимости введения в него спектрально-селективного элемента для поддержания одночастотной генерации. Наиболее часто используется дифракционная решетка [1], обладающая достаточным разрешением для выделения одной продольной моды. Однако в приборах, работающих в условиях высоких вибрационной и акустической нагрузок, от отражательной решетки в качестве выходного зеркала лазерного резонатора лучше отказаться. Нестабильность ее положения

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: vvv@okb.lpi.troitsk.ru.

² ООО “Лаборатория вакуумной техники”, 142200 Россия, Серпухов, Весенняя, 6-28.

³ НИЯУ “МИФИ”, 115409 Россия, Москва, Каширское ш., 31.

и угловой ориентации приводит к флуктуациям длины волны и мощности излучения.

Оптическая схема, в которой лазерный резонатор замыкается зеркалом в фокальной плоскости объектива («кошачьим глазом»), позволяет более чем на порядок снизить чувствительность лазера к угловой ориентации внешнего зеркала. Так в работе [2] ширина спектра биений излучения двух независимых лазеров с длинами резонаторов около метра была меньше 100 кГц. При этом в качестве внутриврезонаторных селективных элементов использовались эталоны Фабри–Перо.

Ту же роль могут играть интерференционные фильтры (ИФ), использование которых предложено в [3]. Отметим, что после появления этой работы такие ДЛВР сразу не получили широкого распространения из-за низкого спектрального разрешения и больших потерь фильтров. Однако в настоящее время оптические технологии изготовления многослойных покрытий переменной толщины продвинулись настолько, что не только лабораторные [4], но и коммерческие приборы [5] с такими фильтрами стали доступны.

В данной работе описаны новая разработка ДЛВР с внутриврезонаторным фильтром и результаты измерений параметров интерференционных фильтров.

Описание конструкции. Оптическая схема ДЛВР с внутриврезонаторным фильтром (ДЛВРФ) традиционной [3, 4] конструкции показана на рис. 1(а). В ней вывод излучения осуществляется полупрозрачным зеркалом, замыкающим резонатор. Поскольку лазерное излучение фокусируется на этом зеркале, для получения выходного пучка малой расходимости излучения требуется дополнительный объектив. Коэффициент отражения полупрозрачного зеркала определяет и уровень оптической обратной связи, и долю выводимой из резонатора оптической мощности. Заранее предсказать оптимум их соотношения трудно, поскольку он зависит от степени просветления зеркала ДЛ, соотношения оптических длин активной и пассивной частей резонатора, пропускания и спектральной ширины фильтра. Поэтому на практике изготавливается набор зеркал с разными коэффициентами отражения и экспериментально подбирается наиболее подходящее к требуемым условиям зеркало. Полупрозрачные зеркала имеют заметно меньшую спектральную ширину по сравнению с глухими, поэтому каждая новая лазерная длина волны требует своего набора зеркал. Вторая сторона подложки полупрозрачного зеркала вносит дополнительные потери или требует просветления. В свою очередь, задача сочетания глубины оптической обратной связи и доли выводимого излучения возникает и при использовании дифракционных решеток в схемах Литтрова и Литмана. Отметим, что изготовление полупрозрачного зеркала тем не менее оказывается принципиально проще, чем изготовление и подбор дифракционной решетки.

Перестройка длины волны ДЛВР с внутрирезонаторным фильтром осуществляется его наклоном. В традиционном варианте ИФ размещается в поворотной оправе, точность юстировки которой определяется шагом резьбы регулировочного винта и его расстоянием до оси поворота. Этот узел трудно сделать компактным, а в условиях сильной акустической нагрузки и достаточно жестким, поскольку вибрации непосредственно приводят к флуктуациям угла поворота.

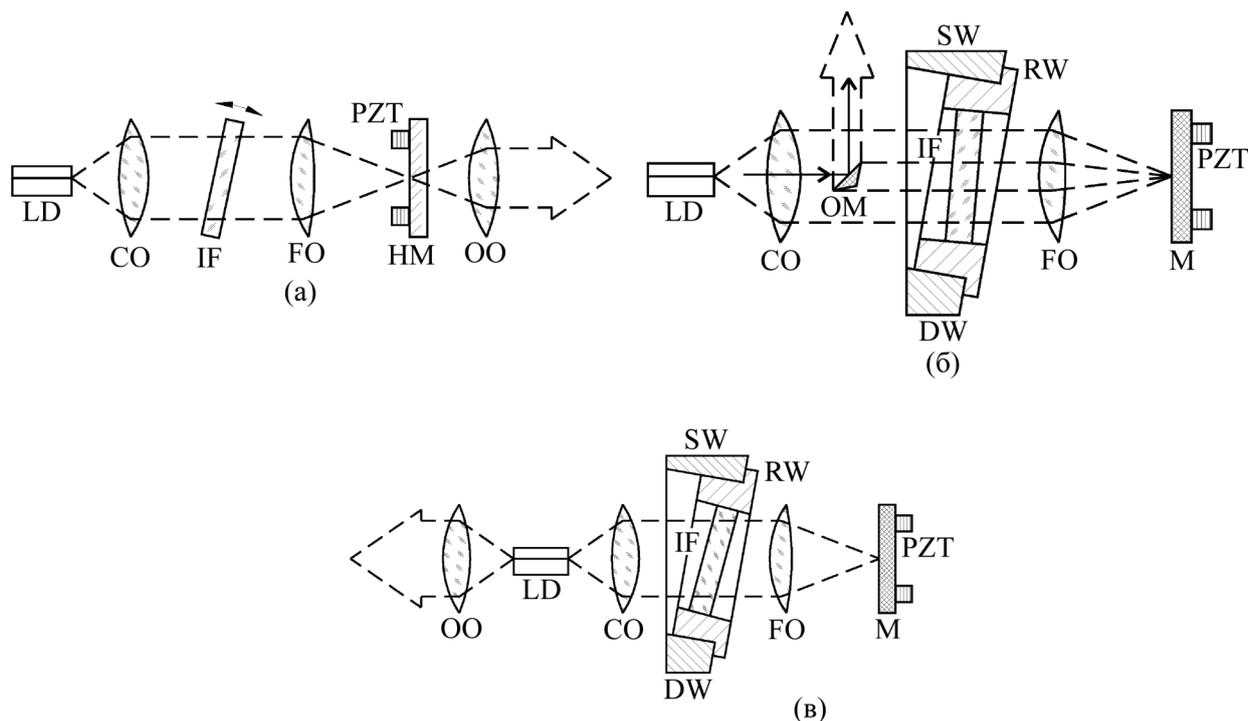


Рис. 1: Оптические схемы ДЛВРФ традиционной конструкции (а), с выводом излучения глухим узким зеркалом (б) и с использованием второго выхода диодного лазера (в). LD – лазерный диод, CO – коллимирующий объектив, IF – интерференционный фильтр, FO – фокусирующий объектив, HM – полупрозрачное зеркало, OO – выходной объектив, PZT – пьезокерамическое кольцо, OM – выходное зеркало, DW – дифференциальный клин, SW – неподвижный клин, RW – подвижный клин, M – глухое зеркало. Подвижный клин на рис. 1(б) и рис. 1(в) изображен в двух крайних, противоположных по углу поворота положениях.

На рисунках 1((б), (в)) представлены оптические схемы ДЛВРФ, отличающиеся от традиционных способами вывода излучения из лазерного резонатора и регулировки длины волны. Схемы приведены для двух видов монтажа активных элементов: капсулированных в корпус типа ТО (вывод излучения из LD в одну сторону, рис. 1(б)) и

установленных в корпус типа C-mount (вывод излучения из LD в обе стороны, рис. 1(в)). В данной работе ДЛВРФ с корпусом C-mount работал на длине волны 852 нм (резонансная линия Cs), с корпусом ТО – на длине волны 871 нм (субгармоника часового перехода в ионе Yb). Очевидно, что C-mount дает дополнительный порт вывода излучения из LD и не требует подбора коэффициента отражения для концевого зеркала.

В данной работе предложено выводить из резонатора дополнительным узким глухим зеркалом (рис. 1(б)), нанесенным на подложку-призму ОМ с сечением в виде равнобедренного треугольника с тупым углом при вершине, что позволяет избежать паразитного затенения лазерного пучка. Спектральное разрешение интерференционного фильтра должно уменьшаться с уменьшением диаметра пучка из-за увеличения расходимости, однако часто оказывается выше для узких пучков из-за пространственной неоднородности, возникающей в процессе напыления покрытий. Поэтому обрезание части пучка не является столь критичным для ДЛВРФ, как для лазеров с дифракционной решеткой, в которых увеличение спектрального разрешения требует увеличения диаметра пучка. Расходимость излучения ДЛ, как правило, в направлении поперек p - n перехода больше, чем вдоль. В результате сколламированный пучок имеет в поперечном сечении эллиптическую форму, что осложняет его согласование с аксиально-симметричными оптическими системами. Распределение интенсивности света в направлении, поперечном p - n переходу, хорошо описывается гауссовой кривой. Смещение выходного зеркала в этом направлении позволяет находить оптимальное соотношение уровня обратной связи и выходной мощности. Находясь в центре пучка, зеркало выводит из лазерного резонатора максимальную мощность с максимальной аксиальной симметрией. При смещении зеркала к периферии пучка уровень оптической обратной связи растет при некоторой потере симметрии пучка.

Для регулировки угла падения лазерного излучения на интерференционный фильтр разработано поворотное устройство (Differential Wedge), состоящее из неподвижной клиновидной пластины (Static Wedge) с углом α – наиболее вероятным для настройки на требуемую длину волны генерации лазера, и поворотной (Rotary Wedge), угол которой β выбирается соответствующим допуску на точность исполнения фильтра. При вращении подвижного клина относительно неподвижного угол падения лазерного луча на фильтр γ меняется от $\alpha - \beta$ до $\alpha + \beta$ (от 2° до 8° в данной работе). Угол β определяет диапазон и точность регулировки угла падения γ . Прецизионность настройки длины волны генерации обеспечивается тем, что перестроечный коэффициент $d\lambda/d\varphi$, где φ – угол поворота подвижного клина становится в $\beta/90$ раз меньшим. Зависимость длины

волны генерации от угла поворота подвижного клина приведена на рис. 2. Небольшие отклонения экспериментальных данных от теоретической кривой связаны с тем, что частоты лазерной моды и пика пропускания ИФ могут не совпадать.

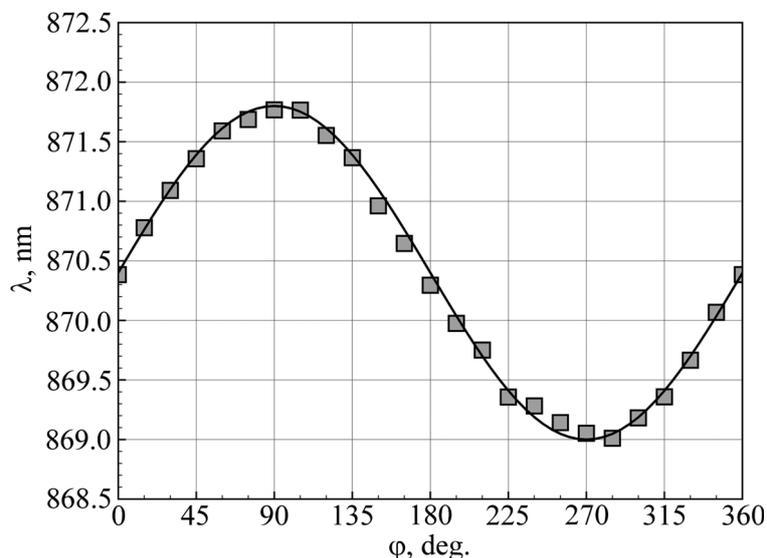


Рис. 2: Зависимость длины волны генерации ДЛВРФ λ от угла поворота подвижного клина φ .

При вибрациях оптико-механическое устройство подвергается линейным ускорениям разной амплитуды, частоты и направления. В этих условиях наиболее вероятно взаимное смещение отдельных компонентов устройства, но не их относительный поворот. Поэтому предложенный способ регулировки длины волны генерации обеспечивает и более высокую виброустойчивость характеристик ДЛВРФ в сравнении с традиционными вариантами.

Интерференционный фильтр. Пропускание ИФ определяет потери, порог генерации и достижимую выходную мощность ДЛВРФ, а его спектральная ширина влияет на степень селекции мод резонатора. Недостаточно узкополосный ИФ не позволяет надежно выделить из набора продольных мод лазерного резонатора одну единственную. Это приводит к избыточным амплитудным и частотным шумам, переключениям мод, многочастотному режиму. Увеличение частотного интервала между соседними модами резонатора путем сокращения его длины для улучшения селекции мод имеет предел и увеличивает как технический, так и фундаментальный вклады в ширину линии генерации. Таким образом, еще на этапе разработки ДЛВРФ желательно знать точные характеристики ИФ.

На производственных площадках ФИАН специалистами ООО “Альбеде Оптикс” и “Лаборатории вакуумной техники” (ЛВТ) было изготовлено несколько ИФ, характеристики которых представлены ниже. Фильтр ООО “Альбеде Оптикс” состоит из двух зеркал и семи пар четвертьволновых слоев $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$, разделенных спейсером из SiO_2 с оптической толщиной, равной четырем длинам волн 871 нм. Положение резонанса определяется толщиной спейсера. Покрытие наносилось на установке ORTUS 700 производства компании Изовак. Конструкция фильтров ЛВТ содержит 41 слой чередующихся слоев $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ разной толщины. Изготовление выполнялось на установке ионно-лучевого напыления Spector фирмы Veeco (США), программное обеспечение которой и оптический контроль обеспечивают необходимую точность изготовления ИФ.

Как правило, обычные спектрофотометры (Perkin Elmer, Lamda 35 и т.д.) имеют разрешение в несколько ангстрем, которое позволяет измерить центральную длину волны пика пропускания ИФ и ширину его блокирующей зоны. Однако для измерения амплитуды и ширины пика пропускания такого разрешения недостаточно.

Можно снять характеристики ИФ с помощью непрерывно и широко перестраиваемого одночастотного лазера. Результаты обмера фильтра на длину волны 852 нм с помощью лазера с вертикальным резонатором (VCSEL) представлены в [6]. Эти лазеры перестали быть экзотикой, но остаются недоступными для многих спектральных областей. Поэтому фильтр, предназначенный для ДЛВРФ на 871 нм, был охарактеризован другим способом с помощью лазера [1], который настраивается на линию пропускания фильтра, но не обеспечивает достаточного диапазона непрерывной перестройки для оценки ее спектральной ширины. В этом случае ширина оценивалась по модуляции пропускания при повороте фильтра (при постоянной λ), возникающей из-за интерференции излучения на двух поверхностях подложки ИФ. Фильтр поворачивался гальвоприводом.

На рис. 3 приведены зависимости пропускания двух фильтров на 871 нм от угла падения лазерного излучения γ . Интерференционные максимумы определяются из условия $2Lncos\gamma = N\lambda$, где λ – длина волны излучения, L и n – толщина и показатель преломления подложки, N – порядок максимума. От одного максимума к следующему можно перейти, меняя угол наклона ИФ при постоянной длине волны или меняя λ при постоянном угле падения. Интервал такого изменения угла падения соответствует перестройке длины волны на $\Delta\lambda = \lambda^2/(2Lncos\gamma)$. Поскольку угол наклона ИФ мал, а для узкополосного фильтра мало и его изменение при регистрации зависимости пропускания от угла, отличием $cos\gamma$ от 1 можно пренебречь. Таким образом, спектральная

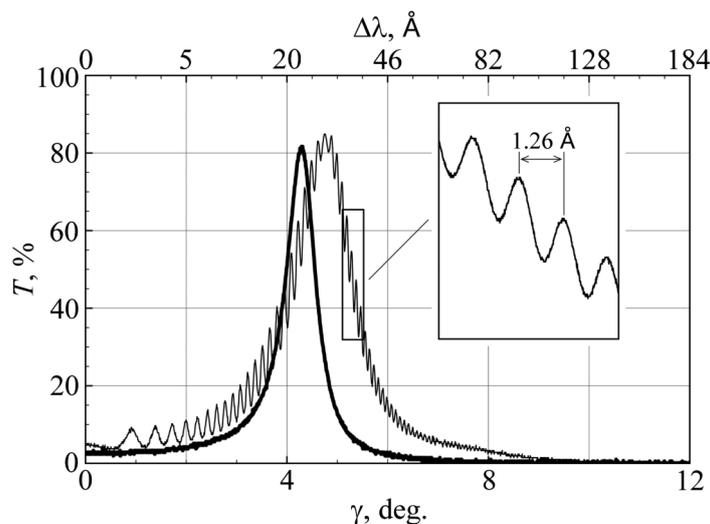


Рис. 3: Зависимости пропускания двух интерференционных фильтров с максимумом пропускания на 871 нм от угла падения лазерного излучения γ . Фильтры отличаются дизайном покрытий, более узкополосный изготовлен в ЛВТ, второй – в ООО «Альбеда Оптикс» Фильтр, выполненный на клиновидной подложке, не имеет осцилляций в пропускании. Верхняя шкала отражает соответствие между углом падения и отстройкой длины волны в \AA .

ширина пропускания ИФ оценивается по числу интервалов между интерференционными максимумами, приходящимися на ширину огибающей (FWHM, рис. 3). Она составляет 15 \AA для одного ИФ и 7 \AA для второго. Для фильтра на длину волны 852 нм оценка по приведенному методу была с хорошей точностью подтверждена регистрацией спектрального контура ИФ перестраиваемым лазером (VCSEL). Данный простой метод неприменим для подложек фильтра с большой клиновидностью или с хорошо просветленной поверхностью тыльной стороны ИФ. Нетрудно, однако, показать, что шкалу длин волн, полученную на одном фильтре (рис. 3), можно использовать для другого, если они изготовлены на одну длину волны.

Заключение. Предложена оригинальная схема ДЛВР с внутриврезонаторным интерференционным фильтром, обеспечивающая высокую механическую стабильность резонатора и открывающая возможность применения ДЛВР в составе бортовых систем. Предложена методика измерения параметров внутриврезонаторных ИФ, которая обладает высоким разрешением и не требует широко и непрерывно перестраиваемых лазеров. Измерение может быть проведено лазером, настроенным на резонанс пропускания

ИФ с точностью до двух-трех его ширин. Реализованы фильтры с полосой пропускания менее 1 нм и амплитудой более 80%. Ожидается, что в ближайших экспериментах полоса будет уменьшена до долей нм, а пропускание составит более 90%.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и образования Российской Федерации (Соглашение № 14.610.21.0010, Уникальный идентификатор проекта RFMEFI61017X0010).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] V. V. Vassiliev, S. A. Zibrov, and V. L. Velichansky, Review of Scientific Instruments **77**, 013102 (2006).
- [2] А. С. Зибров, В. Л. Величанский, В. С. Каргапольцев и др., Письма в ЖТФ **19**, 1087 (1974) [Soviet Technical Physics Letters **4**, 438 (1979)].
- [3] P. Zorabedian and W. R. Trutna Jr, Opt. Lett. **13**, 826 (1988).
- [4] X. Baillard, A. Gauguet, S. Bize, et al., Opt. Comm. **266**, 609 (2006).
- [5] MOG Laboratories Pty Ltd, Instruction manual for Cateye External Cavity Diode Laser Model CEL002, www.moglabs.com.
- [6] D. S. Chuchelov, V. V. Vassiliev, M. I. Vaskovskaya, et al., Physica Scripta **93**, 114002 (2018).

Поступила в редакцию 14 августа 2019 г.

После доработки 9 октября 2019 г.

Принята к публикации 10 октября 2019 г.