

На правах рукописи



Симонов Виктор Александрович

**РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ
ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ НА ОСНОВЕ ТОНКОЙ
МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛЕНКИ ДЛЯ СЕЛЕКЦИИ МОД
ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРОВ**

Специальность 01.04.05 —
«Оптика»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск — 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте «Автоматики и электрометрии» Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник
Терентьев Вадим Станиславович

Официальные оппоненты: **Иванов Олег Витальевич**,
доктор физико-математических наук,
Ульяновский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова Российской академии наук,
ведущий научный сотрудник

Бельтюгов Владимир Николаевич,
кандидат физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук,
старший научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Новосибирский национальный исследовательский государственный университет

Защита состоится 27 декабря 2019 г. в 9:30 на заседании диссертационного совета Д 003.005.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте автоматике и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИАиЭ СО РАН.

Автореферат разослан __ ноября 2019 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 003.005.01,
доктор физико-математических наук



Ильичев Л.В.

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

В настоящее время одной из актуальных проблем волоконной оптики является создание перестраиваемых источников узкополосного излучения (≤ 1 пм), способных работать во всей области усиления лазерных сред, например, эрбиевых волокон (1520-1575 нм) [1], а также для создания компактных лазерных спектрометров. При этом, не менее важным параметром является высокая частота сканирования (> 10 кГц). Такие устройства востребованы, например, для устройств опроса датчиков на основе волоконных брэгговских решёток (ВБР) [2, 3]. Характеризовать степень селекции удобно в сравнении с ацетиленовым эталоном, который используется для точной привязки к длине волны. Характерная ширина резонансов поглощения в таких эталонах 10 пм [4]. Фильтры с шириной полосы меньше этой величины в данной работе будут считаться узкополосными.

Несмотря на то, что существуют коммерчески доступные волоконные интерферометры Фабри-Перо (ВИФП) [5, 6], обладающие высокой селективностью, большой скоростью перестройки с помощью пьезоактюаторов и сравнительно низкими вносимыми потерями, их применение возможно только в сложносоставной кольцевой схеме, так как такое устройство имеет узкие интерференционные полосы в пропускании. Так как ВИФП работает только в проходящем свете, его нельзя непосредственно применить, например, в случае, когда требуется селекция излучения в отражённом свете. Селекция мод в лазерах с линейным резонатором [7] имеет преимущества перед кольцевыми схемами для генерации на одной продольной моде из-за возможности существенно укоротить резонатор, если интерферометр селектирует излучение в отражённом свете. Использование для этой цели многозеркальных схем на основе ВИФП приводит к сложным конструкциям [8], кроме того, из-за большой длины резонатора трудно получать одночастотную генерацию в такой схеме.

Брэгговские решётки, используемые для селекции мод волоконных лазеров, хотя и позволяют получить достаточно большой диапазон перестройки, ограничены в скорости сканирования, так как перестройка возможна только за счёт растяжения/сжатия волокна или температурной подстройки [9, 10]. Кроме того, спектральная ширина таких фильтров составляет порядка 0,1 нм, что может не обеспечить условий для стабильной одномодовой генерации. Полностью волоконный ВИФП на основе ВБР может обладать высокой селектирующей способностью, но только в узком спектральном диапазоне. Это связано с методом изготовления ВБР, который не позволяет создавать в кварцевом волокне достаточно большую величину вариации коэффициента преломления. Использование чирпованных ВБР может расширить область работы до нескольких десятков нанометров, но не область свободной дисперсии, которая в этом случае также не превышает нескольких нанометров [11].

Волоконные лазеры с распределённой обратной связью способны генерировать одномодовое излучение, но скорость сканирования аналогична таковой у

ВБР [12, 13]. Существует способ выделения узкой линии в пропускании за счёт комбинации нескольких кольцевых резонаторов с разными длинами баз [14], которой иногда называют «эффект Вернье». Такие устройства обладают высокой селективностью и большой областью свободной дисперсии, но непрерывная перестройка длины волны в таких резонаторах представляет собой нетривиальную задачу. Метод совмещения объёмной дифракционной решётки и поворотного зеркала с волоконным световодом, по видимому, наиболее универсален. Он позволяет получать перестройку в широком диапазоне с большой скоростью, но требует точной юстировки и систем управления зеркалом [15]. Кроме того, полоса отражения такого фильтра достаточно широкая и составляет несколько гигагерц.

Отражательный интерферометр (ОИ), обладающий всеми преимуществами ИФП, но имеющий «необращённый» профиль спектра отражения – узкие светлые полосы на тёмном фоне, – по видимому, является наиболее перспективным устройством для получения волоконного источника одночастотной генерации с возможностью быстрой (1 кГц) перестройки в широком диапазоне (1500-1600 нм). Можно сказать, что оптические свойства ОИ расширяют и дополняют свойства ИФП. В общем случае профиль интенсивности интерференционных полос ОИ асимметричен, но при специальном подборе параметров зеркал, ОИ формирует «трансмиссионную» картину, которая имеет симметричный профиль интенсивности, подобный профилю Эйри у ИФП в проходящем свете.

Работа в отражённом свете даёт преимущество ОИ при применении его в качестве дискриминатора мод для получения одночастотной генерации (одной продольной моды) в лазере с линейным резонатором по сравнению с методами, перечисленными выше. Во-первых, снижается до минимума количество компонентов в резонаторе лазера. Во-вторых, существует возможность укорачивать резонатор, тем самым увеличивать расстояние между собственными модами резонатора и, таким образом, достигать одночастотной генерации. Применение ОИ в волоконной оптике даёт возможность получать перестраиваемые в широком спектральном диапазоне (>100 нм) лазерные источники, генерирующие одну продольную моду. Подобные устройства уже нашли применение в объёмной оптике [16, 17], но в волоконной такое не показано.

Исходя из вышесказанного, цель данной работы состоит в разработке отражательных интерферометров на основе тонкой металлической плёнки для селекции мод волоконных лазеров.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. исследование применимости объёмного отражательного интерферометра на основе тонкой металлической плёнки для селекции мод волоконного лазера;
2. создание волоконного варианта отражательного интерферометра на основе тонкой металлической плёнки и исследование его свойств;

3. поиск методов повышения селективирующей способности волоконного отражательного интерферометра на основе тонкой металлической плёнки;
4. применение волоконного отражательного интерферометра на основе тонкой металлической плёнки для получения одночастотной генерации в волоконном лазере.

Научная новизна: в работе впервые получены волоконные варианты отражательных интерферометров на основе тонкой металлической плёнки. Представлен отражательный интерферометр с ВБР в качестве заднего зеркала, который позволяет получить узкополосную фильтрацию в отражении с полосой менее 100 МГц. Показана возможность применения отражательного интерферометра для селекции мод волоконного лазера. Определены параметры такого интерферометра, необходимые для получения одномодовой генерации в волоконном лазере. Получена генерация на одной продольной моде в волоконном лазере на основе полупроводникового оптического усилителя в линейной схеме резонатора с ВБР в качестве одного из зеркал и отражательным интерферометром в качестве другого.

Практическая значимость работы состоит в том, что изложенные в диссертации результаты могут быть использованы для создания волоконных источников одномодового излучения с возможностью быстрой, плавной и широкополосной перестройки длины волны генерации в инфракрасном и других диапазонах. Предложенные волоконный и торцевой отражательные интерферометры могут использоваться как статичные спектральные фильтры и отражательные датчики. Отражательный интерферометр с ВБР в качестве заднего зеркала можно использовать для узкополосной фильтрации излучения в отражении и в качестве зеркала линейного лазерного резонатора для получения одночастотной генерации.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Объёмный отражательный интерферометр может быть применён для селекции и перестройки длины волны волоконного эрбиевого лазера, а также получения генерации одномодового излучения в волоконных лазерах с кольцевым и линейным резонатором.
2. Волоконный отражательный интерферометр на основе асимметричного зеркала с тонкой металлической плёнкой в сочетании с диэлектрическим многослойным покрытием может быть изготовлен в одномодовом оптическом волокне.
3. Использование волоконной брэгговской решётки в качестве заднего зеркала отражательного интерферометра на основе тонкой металлической плёнки позволяет добиться узкополосной фильтрации излучения в отражении.
4. Волоконный отражательный интерферометр на базе тонкой металлической плёнки позволяет получить одночастотную генерацию в волоконном лазере с линейным резонатором.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на:

1. 49-я международная научная студенческая конференция «Студент и научно-технический прогресс», Новосибирск, 2011;
2. Всероссийская конференция по волоконной оптике, Пермь, 2011;
3. 50-я международная научная студенческая конференция «Студент и научно-технический прогресс», Новосибирск, 2012;
4. 4th annual International Laser Physics Workshop, Шанхай, КНР, 2015;
5. Российский семинар по волоконным лазерам, Новосибирск, 2016;

Личный вклад. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причём вклад диссертанта был определяющий. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 11 печатных изданиях, 6 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 5 — в тезисах докладов.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы. Также приводится информация о количестве публикаций автора по теме исследования, список конференций и семинаров, на которых была представлена работа. В конце введения сформулированы положения, выносимые на защиту.

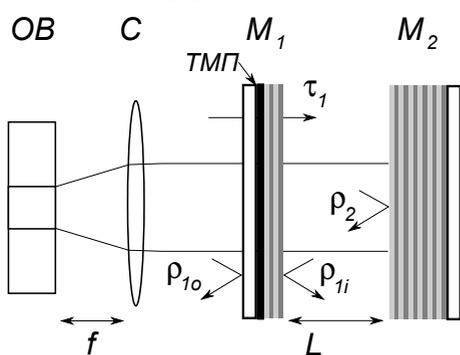


Рис. 1

Первая глава посвящена теоретическому описанию свойств отражательных интерферометров. В первом разделе приводится описание в приближении плоских волн и рассматриваются условия на получение «трансмиссионной» аппаратной функции в отражении на примере объёмного отражательного интерферометра на Рис. 1, где M_1 – тонкойслоиная металло-диэлектрическая структура на стеклянной подложке, ТМП – тонкая металлическая плёнка

и M_2 – диэлектрическое зеркало на подложке. Амплитудные коэффициенты отражения соответствующих зеркал M_1 и M_2 интерферометра выражаются через энергетические следующим образом: $\rho_{1o,1i} = \sqrt{R_{1o,1i}} e^{i\Psi_{1o,1i}}$, $\rho_2 = \sqrt{R_2} e^{i\Psi_2}$, $\tau_1 = \sqrt{T_1} e^{i\Phi_1}$, $\tau_2 = \sqrt{T_2} e^{i\Phi_2}$. Представлена общая формула отражения от двух-

зеркального интерферометра с поглощающими зеркалами, полученная М. Ами:

$$\tilde{R} = R_{1o} + T_1 \frac{R_2 T_1 + 2\sqrt{R_{1o} R_2} \cos(2\phi + \theta) - 2R_2 \sqrt{R_{1i} R_{1o}} \cos(\theta)}{R_{1i} R_2 - 2\cos(2\phi) \sqrt{R_{1i} R_2} + 1},$$

и некоторые частные следствия. В формуле $\phi = \frac{2\pi nL}{\lambda} - \frac{\Psi_{1i} + \Psi_2}{2}$ (n – показатель преломления базы интерферометра, L – расстояние между зеркалами); $\theta = \Psi_{1o} + \Psi_{1i} - 2\Phi_1$ – комбинированная фаза. Второй раздел посвящён матричному методу расчёта многослойных структур, в том числе с поглощающими металлическими плёнками. В третьем разделе показаны некоторые свойства ОИ на основе моделей из первых двух разделов, такие как изменение аппаратной функции ИФП при добавлении ТМП и в зависимости от её толщины, спектральные профили отражения, пропускания и вносимых потерь, а также зависимость аппаратной функции в отражении от толщины диэлектрических слоёв асимметричного зеркала (АЗ). Четвёртый раздел посвящён проблеме сопряжения объёмного интерферометра с оптическим волноводом. Выведено выражение для приближенной оценки потерь на сопряжении для малых угловых отстроек. В последнем разделе приведены условия на получение одномодовой генерации в лазерном резонаторе с ОИ. Показано, что для плавной перестройки длины волны лазера необходимо одновременно изменять длину базы самого лазерного резонатора и ОИ.

Вторая глава посвящена исследованию применимости отражательных интерферометров в волоконной оптике. Для этого предлагается использовать ВИОИ – объёмный вариант ОИ и схему сопряжения с волоконно-оптическим лазерным резонатором (Рис. 1, где OB – оптическое волокно, C – коллиматорная линза с фокусным расстоянием f). Такой подход позволяет качественно проверить работу металл-диэлектрического зеркала в диапазоне длин волн 1500-1600 нм, а также спектральные свойства самого ОИ в том числе в процессе сканирования его базы. В первом разделе описаны процессы изготовления и характеристики объёмного ОИ. Так как конструктивно объёмный вариант представляет собой аналог ИФП, то необходимо изготовить и отъюстировать два зеркала. Заднее зеркало M_2 является четвертьволновым с многослойной структурой (29 слоёв (TiO_2 , SiO_2) на кварцевой подложке) с коэффициентом отражения $> 99.8\%$ в спектральном интервале 1500-1600 нм. Метод его изготовления не представляет трудностей, если контролировать в процессе напыления коэффициент отражения или пропускания покрытия по экстремумам на одной длине волны или в широком спектральном диапазоне. Интерес представляет процесс изготовления зеркала M_1 с асимметричным коэффициентом отражения. Для получения оптимальных параметров ОИ необходимо контролировать энергетические коэффициенты отражения и пропускания металлической плёнки в процессе изготовления. Если наносить плёнку с произвольными параметрами, то можно получить нежелательное снижение коэффициента отражения ОИ (если плёнка недостаточно тонкая),

либо низкий контраст интерференционных полос, что снизит эффективность селекции мод лазера.

Для непрерывной регистрации энергетических коэффициентов реализована волоконно-оптическая система оптического контроля для установки термического распыления в вакууме. Система позволяет определять коэффициент отражения изготавливаемого зеркала по отражению от скола оптического волокна – «свидетеля», – помещаемого вблизи подложки, на которую наносится многослойное отражающее покрытие, либо он сам может являться подложкой.

В связи с тем, что покрытие, наносимое на подложку, является поглощающим, то в нём часть излучения выделяется в виде тепла. При определённой мощности излучения плёнка интенсивно нагревается и испаряется в области большей интенсивности света. Для определения пороговой мощности, при которой ТМП испаряется с торца волокна, были проведены эксперименты по определению лучевой стойкости тонкой никелевой плёнки. Для этого излучение волоконного иттербиевого Yb^{3+} лазера направлялось на плёнку через волоконно-оптический циркулятор, при этом регистрировались отражение от плёнки и опорный сигнал лазера. При превышении мощности излучения над пороговой ожидалось резкое уменьшение коэффициента отражения. Измеренная пороговая мощность составила 1,2 мВт, что соответствует плотности мощности 12 Вт/мм².

Переднее зеркало изготавливалось по методике [18] с контролем по пропусканию. На кварцевую подложку методом резистивного напыления в вакууме наносилась тонкая никелевая плёнка (в расчётах толщина принималась равной 14,5 нм, $n_{Ni} = 2,89 - i5,08$). Нанесённая плёнка отражала со стороны кварцевой подложки 15% света, хотя из условий согласования следует, что нанесение плёнки необходимо остановить, когда $R_{1o} = 14\%$. На никелевую плёнку были нанесены четыре слоя диэлектриков $(MgF_2, ZnS)^2$ с оптической толщиной $\lambda/4$. Энергетические коэффициенты изготовленного зеркала имели следующую величину ($\lambda = 1550$ нм): $R_{1o} = 0,06$, $R_{1i} = 0,71$, $T_1 = 0,13$. Расчётная резкость полос F , соответствующая данным величинам и плотному заднему зеркалу, около 18,3.

Для исследования свойств и юстировки ОИ использовался кольцевой волоконный лазер, генерирующий на длине волны 1550 нм. Длина волны лазера стабилизировалась по пику отражения волоконной брэгговской решётки (ВБР), а на выходе лазера размещалась система из волоконного циркулятора, самого ОИ и фотодетектора, который последний измерял интенсивность отражённого от интерферометра света. Так как частота света, падающего на ОИ, была постоянной, сканируя заднее зеркало ОИ по направлению оптической оси системы, т.е. изменяя набег фаз $\psi = 2\pi L/\lambda$ между зеркалами, можно наблюдать аппаратную функцию в отражении и юстировать зеркала.

Экспериментальные аппаратные функции ВИОИ представлены на Рис. 2. Два профиля коэффициента отражения ВИОИ R в зависимости от расстояния

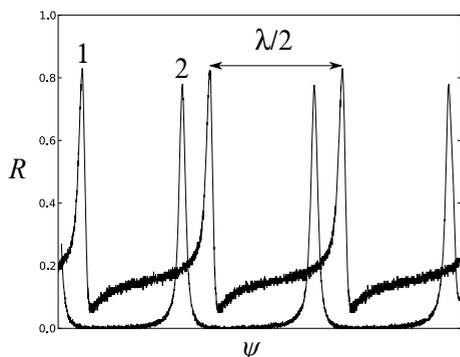


Рис. 2

уменьшается коэффициент отражения нулевого луча. Можно предположить полное отсечение моды, возбуждаемой нулевым лучом ОИ, при распространении по волоконной оптической системе. В данном конкретном случае волоконная система действует избирательно только на нулевой луч, то включая, то исключая его из оптической системы. Максимальный коэффициент отражения ВИОИ по расчётам достигал 83%, что является хорошим результатом. Профиль 2 имеет большую контрастность, чем профиль 1, что полезно при селекции излучения с точки зрения дискриминации мод по добротности резонатора. Резкость полос ОИ $F = 14,5$, что близко к величине 18,3 из расчётов для измеренных параметров зеркала M_1 , но меньше расчётной в 2 раза. Контраст (отношение R_{max}/R_{min}) составил 7,5 дБ для асимметричной и 17,5 дБ для симметричной аппаратных функций.

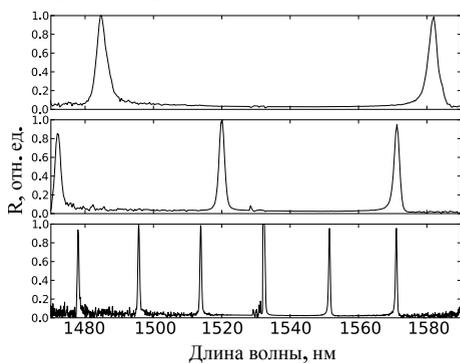


Рис. 3

зеркал, как и для ИФП. Минимальный коэффициент отражения, который порождался остаточным отражением от торца волокна, имел сравнительно высокое значение $R_{min}=0,025$ и однозначно влиял на спектральную ширину перестройки излучения лазера. Проблема контраста в данном случае возникает из-за технологического несовершенства процесса изготовления составных частей ОИ. Теоретически же ОИ может иметь идеальный контраст, что прин-

между зеркалами L записаны с помощью цифрового осциллографа Tektronix TDS 3032B. Профиль 1 имеет ярко выраженную асимметрию, профиль 2 – с малой степенью асимметрии, подобный аппаратной функции ИФП в пропускании. В отражении ВИОИ наблюдались оба профиля, причём один переходил в другой скачкообразно. Из теории отражательных интерферометров известно, что асимметрия профиля в отражении ОИ стремится к симметричной, если

Спектры отражения ВИОИ представлены на Рис. 3. Нижний профиль соответствует базе ОИ в $L = 60$ мкм, средний – 24 мкм, верхний – 12 мкм. Профили нормированы на максимальное значение в пределах спектрального интервала. Сближение зеркал ОИ позволяло получать область свободной дисперсии до 120 нм ($L \approx 10^{-5}$ мкм), которая может быть больше и ограничивается спектральной шириной коэффициента отражения

ципально недоступно для ИФП [18]. Для плавной перестройки длины волны у ВИОИ, изменялась длина базы (заднее зеркало сканировалось с помощью пьезокерамики). Частота перестройки максимального коэффициента отражения ОИ по спектру в данной схеме с неволоконными компонентами достигала 500 Гц.

Далее описано применение ВИОИ для селекции и перестройки длины волны генерации кольцевого эрбиевого лазера. Резонатор (Рис. 4(а)) состоял из волокна *SMF-28e* (15 м), в т.ч. Er^{3+} легированного волокна (5 м). Накачка от лазерного диода *ЛД* на длине волны 980 нм производилась через спектрально-селективный волоконный ответвитель *WDM*, направление обхода задавалось волоконным циркулятором *ВЦ*. Вывод излучения осуществлялся через широкополосный волоконный ответвитель *ВО* с коэффициентом ответвления 5%. Такая схема позволяет получить в резонаторе бегущую волну и эффективно снимать инверсию активной среды. В данной конфигурации удалось плавно перестраивать длину волны излучения волоконного кольцевого лазера в спектральном диапазоне

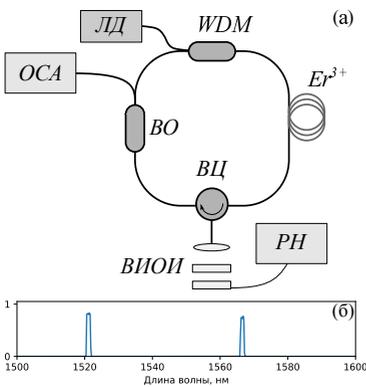


Рис. 4

1520-1566 нм (46 нм) изменяя напряжение на пьезоактюпторе с помощью регулятора напряжения *PH*. Для крайних положений длины волн генерации зафиксированы с помощью анализатора спектра (Рис. 4(б)). Мощность генерации лазера составила порядка 1 мВт. Дальнейшее повышение мощности может быть сопряжено с риском повреждения плёнки из-за нагрева, о чём говорилось выше. Спектральная ширина линии генерации лазера составляла не более 0,02 нм, что является пределом разрешающей способности оптического спектроанализатора (*OCA*).

Следующий раздел описывает применение объёмного ИО в эрбиевом волоконном лазере с линейным резонатором. В лазере (Рис. 5) накачка производилась лазерным одномодовым диодом *ЛД* на длине волны 980 нм с максимальной мощностью 150 мВт через спектрально-селективный ответвитель *WDM*, который располагался внутри резонатора. Общая длина резонатора $L_{рез} = 10$ м, длина активного участка, состоящего из волокна легированного Er^{3+} *AB* – 4,5 м. Пассивная часть резонатора состояла из волокна *SMF-28e*. Так как волокна

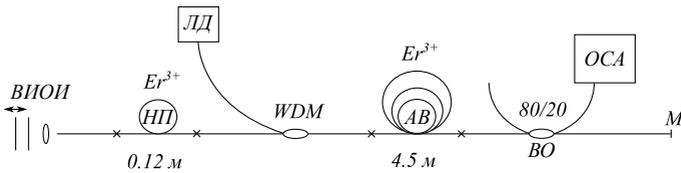


Рис. 5

имеют различный диаметр основной моды, то в местах сварок (обозначены крестиками) всегда присутствовали спектрально зависимые потери около 0,5 дБ, что снижало добротность резонатора. Эти потери удваивались, когда для стабилизации длины волны генерации использовался насыщающийся поглотитель *НП*, который представлял собой ненакачиваемый отрезок активного волокна длиной 12 см. Из резонатора излучение выводилось на *ОСА* с помощью волоконного ответвителя *ВО* с коэффициентом ответвления 20%. Торцевое зеркало *М* – спектрально широкополосное с коэффициентом отражения 70%. Свойства активного волокна, измеренные экспериментально: поглощение излучения слабого сигнала – 3 дБ/м (1530 нм), поглощение накачки – 4,3 дБ/м (980 нм). Для приближенного математического моделирования характеристик генерации лазера (мощности, порога генерации и эффективности) в модели [19] использовались спектральные распределения сечений поглощения и испускания накачки и сигнальной волны, взятые из работы [1] для волокна типа Al/P-Silica. Также на их основе рассчитывались спектральные зависимости мощностей насыщения накачки и сигнала, которые нормировались на экспериментально измеренные величины на длинах волн 980 нм и 1547 нм. Расчёты показали хорошее соответствие с экспериментальными результатами: основные характеристики лазера такие, как мощность и дифференциальная эффективность генерации, диапазон перестройки совпадали по порядку величины при потерях, параметрах активной среды, элементов схемы и накачки, которые были измерены экспериментально. Это рассматривалось, как обоснование применимости данной теории для расчёта характеристик селектора для получения генерации на одной продольной моде в лазере с коротким резонатором о котором будет сказано в следующей главе.

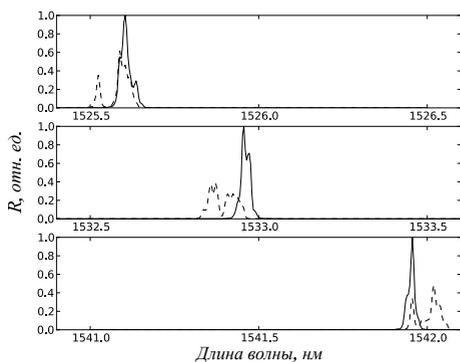


Рис. 6

Излучение лазера носило многомодовый характер, что было обусловлено большим количеством продольных мод, попадающих в спектральную область высокого коэффициента отражения ВАОИ. Число генерируемых мод можно оценить, если взять отношение области свободной дисперсии ОИ и резонатора лазера и разделить все на резкость F : $N_{modes} \sim L_{рез}n/LF$, где n – коэффициент преломления вещества волокна. В данном случае $N_{modes} \sim 10^3$, что приводит к конкуренции продольных мод между собой. Это вызывает нестабильность длины волны излучения лазера от времени, например, в следствие эффекта выжигания пространственных дыр в активной среде. На Рис. 6 показываются спектральные профили генерации лазера. Профили представлены для трёх диапазонов в пределах области перестройки: 1525,5, 1533, 1542 нм, причём для каждого диапазона построено по два профиля, чтобы показать характерную

нестабильность спектра. Генерация продольных мод происходила в диапазоне 0,1 нм. Для лазеров с линейным резонатором для уменьшения нестабильности генерации из-за эффекта выжигания пространственных дыр усиления обычно применяют насыщающийся поглотитель (Рис. 5). В данном случае это не приводило к существенному сужению спектра генерации лазера, однако при этом улучшалась временная стабильность генерации. Одновременно происходило сужение спектрального диапазона перестройки излучения, снижение мощности и эффективности генерации лазера. Спектры на Рис. 6 получены без насыщающегося поглотителя в схеме лазера. Отдельная мода генерации изображается характерным профилем с шириной на полувысоте равной минимальному спектральному разрешению ОСА – 20 пм. Возможна генерация на нескольких модах внутри этого интервала, что не разрешается спектроанализатором. Максимальный диапазон перестройки, которого удалось достичь без насыщающегося поглотителя, составил около 20 нм. Соответствующая этому интервалу (области свободной дисперсии) база ОИ равна 60 мкм, а спектральная ширина на полувысоте коэффициента отражения ОИ – 0,5 нм. Большого диапазона перестройки добиться не удалось по причине недостаточного контраста профиля аппаратной функции интерферометра. Максимальная дифференциальная эффективность лазера составила величину около 5%. Мощность генерации с одного порта ответвителя - до 1 мВт в зависимости от мощности накачки.

Третья глава посвящена разработке волоконного варианта отражательно-го интерферометра на основе тонкой металлической пленки, исследованию его свойств и применению для получения одночастотной генерации.

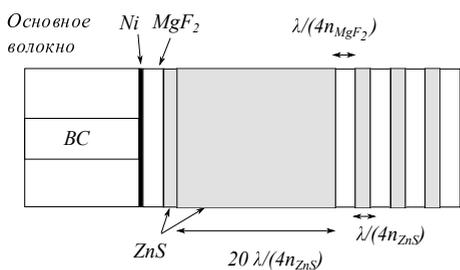


Рис. 7

В первом разделе представлен промежуточный вариант между волоконно-интегрированным и волоконным ОИ – торцевой отражательный интерферометр (ТОИ) на основе тонкой металлической плёнки, который представлял собой многослойную металл-диэлектрическую структуру, сформированную на торце волокна (Рис. 7, BC – волноводная

сердцевина). Он состоит из тонкой (около 10 нм) никелевой плёнки (Ni) и диэлектрического многослойного покрытия из двух материалов (MgF₂, ZnS).

Структуру из никелевой плёнки и первых двух слоёв можно рассматривать как переднее зеркало ТОИ, имеющее свойство асимметричности по коэффициенту отражения с разных сторон. База ТОИ состоит из более толстого слоя ZnS с оптической толщиной $20\lambda/4$. На базу наносится заднее зеркало из шести слоёв (ZnS, MgF₂)³. Из-за того, что заднее зеркало недостаточно плотное, теоретический максимальный коэффициент отражения ТОИ меньше единицы (около 0,9). Есть и другие факторы, приводящие к снижению максимального коэффициента отражения. Например, данное покрытие представляет собой многомодовый вол-

новод, что, из-за несогласованности собственных мод, может приводить к снижению коэффициента отражения интерферометра, уменьшению добротности его резонатора. В данной схеме ТОИ является статичным фильтром.

Коэффициент отражения заднего зеркала равен 0,81. На Рис. 7 (сплошная линия) представлен спектр отражения ТОИ. В сравнении с расчётным профилем имеется хорошее совпадение спектров отражения как по области свободной дисперсии, так и по фазе и относительным амплитудам максимумов. Совпадают и резкости полос, которые имеют величину $F = 3,5$. Максимальный коэффициент отражения отличается от расчётного, но возможна ошибка до 10% из-за нормировки по отражению от скругленного торца волокна. Контраст профиля аппаратной функции составил около 30 дБ.

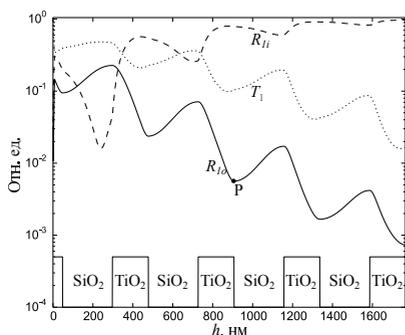


Рис. 8

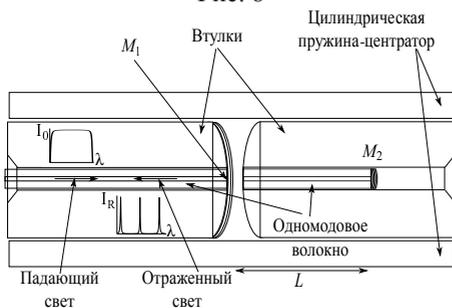


Рис. 9

Заднее диэлектрическое зеркало интерферометра формировалась из отрезка волокна, на которое нанесено заднее зеркало. Для этого волокно с зеркалом заводилось в пустую керамическую втулку на нужную глубину, заклеивалось и обламывалось. Торцевой поверхности зеркала внутри полировалась до достижения длины базы $L \approx 26$ мкм. В итоге был сформирован резонатор интерферометра, схематично показанный на Рис. 9.

Измеренный спектр отражения ОИ в диапазоне 1450-1650 нм показан линией на Рис. 10. Область свободной дисперсии ВОИ – около 32 нм. Максимальный коэффициент отражения ОИ составил около 0,6. Спектральная ширина пиков, измеренная по уровню половины максимального коэффициента отражения,

Второй раздел посвящён созданию волоконного ОИ со световедущей базой. В качестве основания для формирования АЗ использовался предварительно отполированный торец оптического волокна *SMF-28e*, заклеенный в керамическую втулку. Структура зеркала состояла из тонкого слоя никеля (*Ni*), и пяти последовательных слоёв *TiO₂*, *SiO₂*, *TiO₂*, *SiO₂*, *TiO₂*, нанесённых методом магнетронного распыления в вакууме. Результирующий коэффициент отражения зеркала составил $R_{10} = 0,002$. На Рис. 8 показано моделирование зависимостей коэффициентов отражения и пропускания зеркала в процессе формирования АЗ. Точка *P* соответствует изготавливаемому зеркалу.

Заднее диэлектрическое зеркало интерферометра состояло из 10 слоёв (*SiO₂*, *TiO₂*)⁵. База интерферометра

равна 2,1 нм, резкость полос $F = 15$. Отношение максимума к минимуму отражения R_{max}/R_{min} около длины волны 1550 нм составляет 700. В отличие от ИФП, аппаратная функция ОИ асимметрична, что обусловлено отличием фаз отражения переднего зеркала M_1 от стандартных значений для непоглощающего зеркала. Следует заметить, что минимальный коэффициент отражения ОИ теоретически может быть равным нулю, что невозможно для минимума пропускания ИФП.

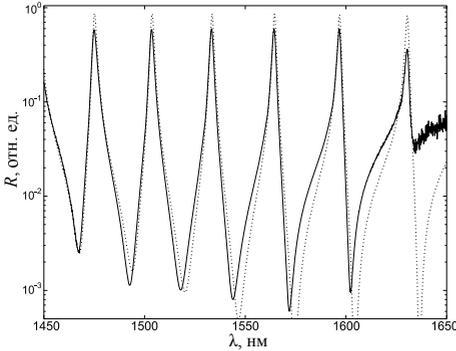


Рис. 10

ленной плёнки и диэлектрических слоёв от расчётных, получается хорошее качественное совпадение расчётного профиля с экспериментальным, в том числе их изгибов и перегибов. Отличие расчётов от эксперимента можно объяснить неучтенной дисперсией материалов, дополнительными потерями в резонаторе, связанными с несоосностью световедущих сердцевин в месте стыка торцов зеркала M_1 и торца резонатора (см. Рис. 9), снижением коэффициентов отражения, связанным с ошибкой в контроле максимумов и минимумов при нанесение диэлектрических покрытий, а также паразитным рассеянием при некачественной полировке торцов.

Как следует из схемы ОИ (Рис. 9), чтобы обеспечивать непрерывную перестройку максимального коэффициента отражения в пределах области свободной дисперсии, можно изменять длину резонатора на $\lambda_0/2$ с помощью пьезокерамического актюатора.

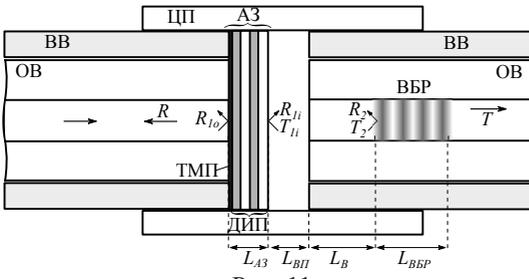


Рис. 11

В следующем разделе описывается узкополосный отражательный фильтр на основе ВОИ с волоконной брэгговской решёткой в качестве заднего зеркала. Схема фильтра приведена на Рис. 11 (ВВ – волоконная втулка, ОВ – оптическое волокно, ЦП – центрирующая пружина,

ДИП – диэлектрическое интерференционное покрытие). В правом ОВ сформи-

рована ВБР, на расстоянии L_B от торца. R_2 – коэффициент отражение ВБР, при этом отражение на границе торец-воздух не учитывается. ВБР сформировано в сердцевине одномодового волокна типа $SMF-28e$ методом лазерной УФ-записи (длина волны излучения ≈ 244 нм) через фазовую маску, закреплённую на моторизированном линейном трансляторе [20]. При согласовании длины воздушного промежутка $L_{ВП}$ в спектре отражения интерферометра можно получить один центральный высокий пик со значением \tilde{R}_{max} в максимуме на длине волны $\lambda_{ВБР}$ и два побочных меньших пика на длинах волн $\lambda_{ВБР} \pm \Delta\lambda$. Степень фильтрации излучения $\delta\lambda$ (спектральную ширину пика на полувысоте) можно определить через резкость полос F и допустимую область свободной дисперсии $\Delta\lambda$ (т.е. такую оптическую длину базы интерферометра $L \approx \lambda_{ВБР}^2/2\Delta\lambda$, при которой величина побочных пиков много меньше центрального): $\delta\lambda = \Delta\lambda/F$.

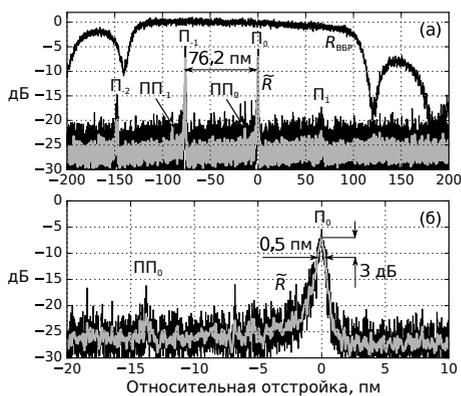


Рис. 12

P_0 показан на Рис. 12(б). Ширина по уровню -3 дБ составила $\delta\lambda = 0,5$ пм ($\delta\nu \approx 62$ МГц, $Q \sim 3 \cdot 10^6$), что соответствует $F \sim 150$. Второй высокий пик P_{-1} имеет ширину около 0,6 пм. Кроме этого, два высоких пика имеют ещё и два побочных поляризационных пика ($ПП_{-1}$, $ПП_0$), расположенных рядом с ними, которые можно подавить с помощью контроллера поляризации. Два боковых пика (P_{-2} , P_1) имеют гораздо меньшую интенсивность и большую спектральную ширину, что объясняется снижением отражения ВБР на краях полосы резонанса. В связи с малым уровнем интенсивности света, графики получились достаточно шумными, поэтому производилось гауссово сглаживание ($\sigma = 5$) исходных данных. Контраст интерферометра, определяемый отношением максимального коэффициента отражения к минимальному, как видно из Рис. 12(а), составляет около 20 дБ (может быть ограничен чувствительностью ОСА), при этом разница между максимумами пиков P_0 и P_{-2} около 13 дБ.

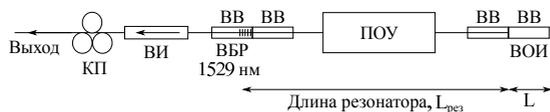


Рис. 13

Последний раздел посвящён применению ВОИ для селекции мод волоконного лазера. Параметры ВОИ

следующие: ОСД ВОИ на длине волны 1530 нм составила 0,86 нм, резкость полос около 25, ширина резонанса на полувысоте – 0,035 нм. Схема лазера (Рис. 13 включает минимальное количество компонентов. Активным элементом является полупроводниковый усилитель *ПДУ*. Выходные волокна были максимально укорочены, заклеены в волоконные втулки *ВВ* отполированы. *ВБР* также была заклеена во втулку и состыкована с ответной втулкой лазерного резонатора, как показано на Рис. 9. Спектральная ширина *ВБР* составляет 0,9 нм. С другой стороны присоединялся *ВОИ*. После выходного зеркала резонатора (*ВБР*) ставился волоконный изолятор *ВИ* на длину волны 1550 нм. Длина резонатора лазера составляла $L_{рез} = 0,135$ м. База *ВОИ* $L = 0,93$ мм была подобрана так, чтобы ОСД соответствовала спектральной ширине *ВБР*, обеспечивая генерацию на одной продольной моде.

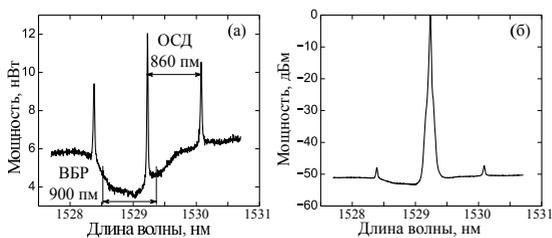


Рис. 14

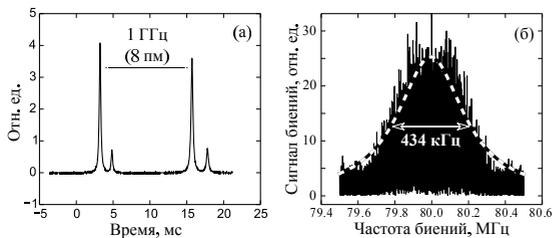


Рис. 15

разрешающей способностью 25 МГц. Наблюдался спектр излучения лазера для подтверждения генерации лазера на одной продольной моде (Рис. 15(а)). База эталона перестраивалась с помощью пьезокерамического актюатора на область свободной дисперсии. Было установлено, что в пределах области свободной дисперсии эталона генерируется только одна продольная мода при любых мощностях, вплоть до 1 мВт.

Для оценки ширины спектра генерации использовался метод самогетеродинамирования с задержкой. Длина линии задержки составляла 10 км в одном из плечей интерферометра Маха-Цандера. В другом плече размещался амплитудный модулятор (80 МГц). Сигнал биений представлен на Рис. 15(б). Характерная спектральная ширина генерации составила около 217 кГц.

Измеренная степень поляризации излучения составила 100 % при мощности -2 дБм, не зависела от тока накачки и была стабильна во времени. С помо-

На Рис. 14(а) показан выходной спектр в подпороговом режиме при токе накачки 94 мА. Видны пики отражения *ВОИ* на фоне свечения активной среды лазера. Генерация достигала значений мощности в 1 мВт при токе 155 мА с характерным контрастом сигнала к шумовой подложке 45-50 дБ (Рис. 14(б)).

Модовый состав излучения исследовался с помощью волоконного эталона Фабри-Перо с областью свободной дисперсии 1 ГГц (8 пм на длине волны 1550 нм) и

щью контроллера поляризации удавалось добиться соотношения осей поляризации >30 дБ. В подпороговом режиме генерации степень поляризации спонтанного излучения составляла около 95 %. Поляризованность излучения обусловлена свойствами конфигурации усиливающей среды *ПОВ*.

В **заключении** приведены основные результаты работы:

1. Объёмный отражательный интерферометр на основе тонкой металлической плёнки применён для селекции и перестройки длины волны излучения волоконных лазеров в области 1500-1600 нм: на 46 нм в схеме с кольцевым и 20 нм в схеме с линейным резонаторами.
2. Разработан торцевой вариант отражательного интерферометра на основе тонкой металлической плёнки без световедущей базы.
3. Разработан метод изготовления волоконного варианта отражательного интерферометра на основе тонкой металлической плёнки со световедущей базой.
4. При использовании ВБР в качестве заднего зеркала отражательного интерферометра получена узкополосная фильтрация с полосой отражения 0,5 пм (62 МГц).
5. Получена одночастотная генерация волоконного лазера с шириной линии 217 кГц в области 1550 нм на основе полупроводникового усилителя с использованием волоконного отражательного интерферометра.

Публикации автора по теме диссертации

- [A1] В А Симонов. “Волоконно-интегрированный отражательный интерферометр с «необращенной» аппаратной функцией”. В: *Материалы 49-й международной научной студенческой конференции “Студент и научно-технический прогресс”*. Физика. Новосибирск: НГУ, 2011, с. 132.
- [A2] В С Терентьев и В А Симонов. “Широкополосная спектральная перестройка длины волны излучения волоконного лазера с помощью отражательного интерферометра”. В: *Всероссийская конференция по волоконной оптике (Фотон-экспресс)*. Пермь, 2011, с. 230—231.
- [A3] В С Терентьев и В А Симонов. “О частотной селекции излучения волоконного лазера с отражательным интерферометром”. В: *Автометрия* 47.4 (2011), с. 41—48.
- [A4] В А Симонов. “Волоконный отражательный интерферометр с изменяемым профилем аппаратной функции”. В: *Материалы 50-й международной научной студенческой конференции “Студент и научно-технический прогресс”*. Квантовая физика. Новосибирск: НГУ, 2012, с. 23.
- [A5] V S Terentiev, A V Dostovalov и V A Simonov. “Reflection interferometers formed on the single-mode fiber tip”. В: *Laser Physics* 23.8 (2013), с. 085108.

- [A6] В С Терентьев и В А Симонов. “Селекция излучения волоконного лазера с линейным резонатором с помощью отражательного интерферометра”. В: *Квантовая электроника* 43.8 (2013), с. 706—710.
- [A7] V S Terentyev и V A Simonov. “Fiber reflection interferometer in single-mode fiber”. В: *24th annual International Laser Physics Workshop*. Shanghai, 2015.
- [A8] V S Terentyev, V A Simonov и S A Babin. “Multiple-beam reflection interferometer formed in a single-mode fiber for applications in fiber lasers”. В: *Optics Express* 24.5 (2016), с. 4512.
- [A9] В С Терентьев, В А Симонов и С А Бабин. “Генерация на одной продольной моде в волоконном лазере с отражательным интерферометром”. В: *Материалы Российского семинара по волоконным лазерам*. Новосибирск, 2016, с. 236—237.
- [A10] V S Terentyev, V A Simonov и S A Babin. “Fiber-based multiple-beam reflection interferometer for single-longitudinal-mode generation in fiber laser based on semiconductor optical amplifier”. В: *Laser Physics Letters* 14.2 (2017), с. 025103.
- [A11] В С Терентьев и др. “Узкополосный волоконный отражатель на основе отражательного интерферометра с волоконной брэгговской решеткой”. В: *Квантовая электроника* 48.8 (2018), с. 728—732.

Список литературы

- [1] W.J.Miniscalco. “Erbium-doped glasses for fiber amplifiers at 1500 nm”. В: *Journal of Lightwave Technology* 9.2 (1991), с. 234—250.
- [2] Honglei Guo и др. “Fiber optic sensors for structural health monitoring of air platforms”. В: *Sensors* 11.4 (2011), с. 3687—3705.
- [3] V V Shishkin и др. “Experimental Method of Temperature and Strain Discrimination in Polymer Composite Material by Embedded Fiber-Optic Sensors Based on Femtosecond-Inscribed FBGs”. В: *Journal of Sensors* 2016 (2016), с. 1—6.
- [4] W. C. Swann и S. L. Gilbert. “Pressure-induced shift and broadening of 1510–1540-nm acetylene wavelength calibration lines”. В: *Journal of the Optical Society of America B* 17.7 (2000), с. 1263.
- [5] Namkyoo Park и др. “All fiber, low threshold, widely tunable single-frequency, erbium-doped fiber ring laser with a tandem fiber Fabry–Perot filter”. В: *Applied Physics Letters* 59.19 (1991), с. 2369.
- [6] Han Young Ryu и др. “Tunable erbium-doped fiber ring laser for applications of infrared absorption spectroscopy”. В: *Optics Communications* 275.2 (2007), с. 379—384.

- [7] Sergey A. Babin, Sergey I. Kablukov и Vadim S. Terentiev. “Reflection Interferometer Based on the Troitsky Thin Film for Frequency Selection in Fiber Lasers”. В: *Laser Physics* 18.11 (2008), с. 1241—1245.
- [8] Yang Zhao и др. “High-finesse cavity external optical feedback DFB laser with hertz relative linewidth”. В: *Optics Letters* 37.22 (2012), с. 4729.
- [9] Y.W. W. Song и др. “40-nm-Wide Tunable Fiber Ring Laser With Single-Mode Operation Using a Highly Stretchable FBG”. В: *IEEE Photonics Technology Letters* 13.11 (2001), с. 1167—1169.
- [10] Chien-Hung Yeh и др. “Use of fiber Bragg grating (FBG) for stable and tunable erbium-doped fiber ring laser with single-longitudinal-mode (SLM) output”. В: *Laser Physics* 25.11 (2015), с. 115101.
- [11] R. Slavik, Serge Doucet и S. LaRochelle. “High-performance all-fiber Fabry-Perot filters with superimposed chirped Bragg gratings”. В: *Journal of Lightwave Technology* 21.4 (2003), с. 1059—1065.
- [12] Sergey A. Babin и др. “Single frequency single polarization DFB fiber laser”. В: *Laser Physics Letters* 4.6 (2007), с. 428—432.
- [13] Bin Yin и др. “Single-Frequency and Single-Polarization DFB Fiber Laser Based on Tapered FBG and Self-Injection Locking”. В: *IEEE Photonics Journal* 7.3 (2015), с. 1—9.
- [14] Bo Meng и др. “Tunable single-mode slot waveguide quantum cascade lasers”. В: *Applied Physics Letters* 104.20 (2014), с. 201106.
- [15] Takanori Saitoh и др. “High-speed MEMS swept-wavelength light source for FBG sensor system”. В: *Proceedings of SPIE*. Т. 5855. 2005, с. 146—149.
- [16] Ю В Троицкий. “Использование многолучевого фазового интерферометра для получения одночастотной генерации в лазерах”. В: *Квантовая электроника* 2.11 (1975), с. 2444—2451.
- [17] Jan K. Jabczyński, Igor I. Peshko и Józef Firak. “Single-frequency, thin-film-tuned, 0.6-W, diode-pumped Nd:YVO₄ laser”. В: *Applied Optics* 36.12 (1997), с. 2484.
- [18] Ю В Троицкий. *Многолучевые интерферометры отраженного света*. Новосибирск: Наука, 1985, с. 207.
- [19] C. Barnard и др. “Analytical Model for Rare-Earth-Dope Fiber Amplifiers and Lasers”. В: *IEEE Journal of Quantum Electronics* 30.8 (1994), с. 1817—1830.
- [20] С Р Абдулина, И Н Немов и С А Бабин. “Метод подавления боковых резонансов в спектре волоконных брэгговских решёток за счёт поперечного сдвига фазовой маски относительно волоконного световода”. В: *Квантовая электроника* 42.9 (2012), с. 794—798.

Симонов Виктор Александрович

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ НА
ОСНОВЕ ТОНКОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛЕНКИ ДЛЯ СЕЛЕКЦИИ МОД
ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРОВ

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать ____ . ____ . ____ . Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____