



ФАНО России

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
НАУЧНЫЙ ЦЕНТР ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(НЦВО РАН)**

Вавилова ул., д. 38, Москва, 119333
Тел. (499)135-74-49. Факс: (499)135-81-39
E-mail: post@fo.gpi.ru
<http://www.fibopt.ru>
ОКПО 29187456, ОГРН 1037739479580,
ИНН/КПП 7736006597/773601001

29.05.2017 №11219+31- *6215/63*

На № _____ от _____

Уважаемый Александр Алексеевич!

Направляю Вам отзыв ведущей организации на диссертацию Ф.А. Егорова
«Взаимодействие микрооптомеханических резонансных систем с лазерным излучением»,
сведения о ведущей организации и список основных публикаций сотрудников НЦВО РАН по
теме диссертации за 2012-2016 гг.

Полное название ведущей организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Научный центр волоконной оптики Российской академии наук
Сокращенное название: НЦВО РАН
Адрес: Вавилова ул., д. 38, Москва, 119333
Тел. (499)135-74-49. Факс: (499)135-81-39
E-mail: post@fo.gpi.ru
<http://www.fibopt.ru>

Список публикаций:

1. Беловолов М.И., Дианов Е.М., Заренбин А.В., Туртаев С.Н., «Распределенная волоконно-оптическая система регистрации виброакустических сигналов», Решение о выдаче патента на изобретение № 2011125945/28(038345) от 25 октября 2012 г.
2. Валявин Г.Г., Бычков В.Д., Юшкин М.В., Галазутдинов Г.А., Драбек С.В., Шергин В.С., Саркисян А.Н., Семенко Е.А., Бурлакова Т.Е., Кравченко В.М., Кудрявцев Д.О., Притыченко А.М., Крюков П.Г., Семёнов С.Л., Мусаев Ф.А., Фабрика С.Н., “Эшельный спектрограф высокого спектрального разрешения с оптоволоконным входом для БТА. I. оптическая схема, размещение, система контроля” // Астрофизический Бюллетень, 69(2), 239–255 (2014)
3. Беловолов М.И., Парамонов В.М., Туртаев С.Н., «Распределенные волоконно-оптические системы мониторинга. Возможности волоконной виброакустики» // Фотон-Экспресс, 118, (2014)

4. Садовникова Я.Э., Камынин В.А., Курков А.С., Медведков О.И., Маракулин А.В., Минашина Л.А., «Модуляции добротности тулиевого волоконного лазера с использованием гольмиевого волоконного затвора» // Квантовая электроника, 44(1), 4-6 (2014)
5. Kotov L.V., Likhachev M.E., Bubnov M.M., Paramonov V.M., Belovolov M.I., Lipatov D.S., Guryanov A.N., "Record-peak-power all-fiber single-frequency 1550 nm laser" // Laser Physics Letters, 11(9), 095102 (2014).
6. Коптев М.Ю., Анашкина Е.А., Бобков К.К., Лихачев М.Е., Левченко А.Е., Алешкина С.С., Семенов С.Л., Денисов А.Н., Бубнов М.М., Липатов Д.С., Лаптев А.Ю., Гурьянов А.Н., Андрианов А.В., Муравьев С.В., Ким А.В., «Волоконный усилитель на основе активного иттербиевого световода-конуса для получения ультракоротких оптических импульсов с мегаваттным уровнем пиковой мощности» // Квантовая электроника, 45(5), 443–450 (2015)
7. Федотов М.Ю., Шиенок А.М., Гуляев И.Н., Васильев С.А., Медведков О.И., «Исследование влияния ударных воздействий на спектральные характеристики оптоволоконных сенсоров на основе волоконных брэгговских решеток, интегрированных в полимерный композиционный материал» // Вопросы материаловедения. 2015. № 4 (84). С. 100-108.
8. Kotov L., Likhachev M., Bubnov M., Medvedkov O., Lipatov D., Guryanov A., Zaytsev K., Jossent M., Février S. "Millijoule pulse energy 100-nanosecond Er-doped fiber laser" // Optics Letters, 40(7), 1189-1192 (2015)
9. Krylov A.A., Sazonkin S.G., Lazarev V.A., Dvoretzkiy D.A., Leonov S.O., Pnev A.B., Karasik V.E., Grebenyukov V.V., Pozharov A.S., Obraztsova E.D., Dianov E.M., "Ultra-short pulse generation in the hybridly mode-locked erbium-doped all-fiber ring laser with a distributed polarizer" // Laser Physics Letters, 12(6), 065001 (2015)
10. Paramonov V.M., Kurkov A.S., "Q-switched Er-doped fiber source based on electrooptical modulator application" // Laser Physics, 25(6), 065103 (2015)
11. В.М.Парамонов, М.И.Беловолов, В.Ф.Хопин, А.Н.Гурьянов, С.А.Васильев, О.И.Медведков, М.А.Мелькумов, Е.М.Дианов, «Волоконный висмутовый лазер с непрерывной перестройкой длины волны генерации в диапазоне 1,36 -1,51 мкм.» // Квантовая электроника, Том 46(12), с.1068 – 1070 (2016)
12. С.С.Алешкина, О.И.Медведков, М.И.Беловолов, М.М.Бубнов, М.Е.Лихачев, «Стабилизация длины волны излучения наносекундного волоконного лазера на основе пассивного нелинейного кольцевого зеркала» // Квантовая электроника, Том 46, № 12, с1089-1091 (2016)
13. Aleshkina S.S., Bubnov M.M., Senatorov A.K., Lipatov D.S., Likhachev M.E., "Impact of dispersion on the output characteristics of an all-fiber Er-doped nanosecond mode-locked figure-eight laser with passive nonlinear optical loop mirror" // Laser Physics Letters, 13(3), 035104 (2016)

Ученый секретарь НЦВО РАН
 к.ф.-м.н.
 Тел. (499) 503-82-93



Машинский В.М.

Приложение.

1. Отзыв ведущей организации – 2 экз.

«Утверждаю»

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки

Научный центр волоконной оптики
Российской академии наук



С.Л.Семенов

« 29 » 05 2017 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Егорова Федора Андреевича
«ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МИКРООПТОМЕХАНИЧЕСКИХ
РЕЗОНАНСНЫХ СИСТЕМ С ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ»,
представленную на соискание ученой степени доктора физико-
математических наук по специальности 01.04.03 – Радиофизика

Диссертационная работа Егорова Ф.А. посвящена исследованию эффектов взаимодействия микрооптомеханических резонансных систем с лазерным излучением. Сформулированная тема исследований не тождественна исследованиям взаимодействия лазерного излучения с веществом, являющимся признанным научным направлением, а напротив, имеет предметом исследований механических устройств с элементами оптики (зеркала, волноводы, активные среды) на упругих конструктивных элементах, обладающих своими механическими резонансными частотами колебаний, возбуждаемых лазерным излучением. Многие разновидности современных лазеров могут быть выбраны для возбуждения и исследования механических резонансов в микромеханических устройствах благодаря безинерционному способу связи и передачи энергии в систему, особенно в

условиях резонанса, и удобному считыванию производимых эффектов по изменению частот колебаний этим или другим лазером.

Особенностью научного подхода к предмету исследований в диссертации является то, что микромеханические резонансные устройства (кремниевые микромембраны, вибрирующие волоконные консоли и др.) изготавливались для работы средствами интегральной оптики при высокой повторяемости механических свойств микроконструкций. Это позволило при исследовании с помощью лазерного излучения воспроизводимо получать эффекты резонансной передачи энергии и возбуждения собственных механических колебаний и создавать миниатюрные измерительные устройства и высокочувствительные датчики с частотным выходом, удобным для считывания и дальнейшей обработки. Уже одна эта разновидность резонансных микромеханических устройств в составе систем с лазерами образуют направление исследований, богатое на новые физические эффекты и применения на практике.

У данного направления исследований и разработок имеются аналоги в природе, которые представляют самостоятельный интерес. В качестве примера, можно привести сверхчувствительные механические колебательные системы ворсинок покрова морских животных (у ластоногих, например, тюленей), акустические вибрации с которых считываются нервными окончаниями с высокой спектральной и амплитудной чувствительностью. Связанные системы лазеров с вибрирующими отрезками оптических волокон могут быть трехмерными аналогами природных датчиков и их исследование представляет большой практический интерес. В диссертации получен обширный экспериментальный материал, содержащий знания об особенностях возбуждения резонансных колебаний и влияния на них окружающей среды. Речь идет о эффектах, которые невозможно реализовать другими известными способами при максимальном сходстве с природными «датчиками».

Особенностью рассматриваемой диссертационной работы является достаточно широкий набор реализованных и изученных автором связанных систем микромеханических резонансных устройств с современными лазерами, когда образуются составные или активные резонаторы этих лазеров. Из лазерной физики известно, что внешняя оптическая связь и возврат излучения обратно в резонатор может радикально изменить спектральный состав, резонансные частоты и когерентные свойства генерируемого излучения. Эти эффекты широко исследованы в диссертационной работе и получены новые научные результаты и знания об особенностях возбуждения и измерений возникающих резонансных колебаний. Полученные результаты относятся как к эффектам модуляции и управления на оптической несущей лазерного излучения, так и к усиленным механическим резонансам, а также, что весьма важно, на комбинированных лазерных и механических частотах вследствие параметрических преобразований при проявлении нелинейности в связанной оптомеханической системе с лазерами. Актуальность и практическую ценность разработкам придает то, что в качестве основного оптического элемента связанных резонансных систем используются современные одномодовые оптические волокна, активные волокна и волоконные лазеры.

Диссертация Егорова Ф.А. состоит из вводной части, пяти глав и заключения. В достаточно подробном введении представлен обзор работ, связанных с исследованием и применениями микрооптомеханических резонансных систем, взаимодействующих как с широкополосным оптическим, так и высококогерентным лазерным излучением. Обоснована актуальность исследуемой проблемы, определены цели и задачи диссертационной работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту положения, а также описана структура диссертации.

Следует отметить ценные методологические особенности диссертационной работы: в ней при исследовании новых явлений широко и

эффективно использован метод аналогий; анализ сложных систем, включающих подсистемы разной физической природы (механические, оптические, электронные) проводится на основе единых, базовых методов, принятых в теории колебаний. Это позволило автору предложить простые, и, в то же время, достаточно точные теоретические модели, описывающие динамику сложнейших нелинейных систем, например, системы из нескольких микроосцилляторов, одновременно взаимодействующих с излучением многомодовых волоконных лазеров (ВЛ) в условиях сильной оптической связи микроосцилляторов с лазерным резонатором.

Диссертационная работа Егорова Ф.А. имеет междисциплинарный характер и полученные в ней результаты относятся к разным областям радиофизики – от колебаний в механических системах до взаимодействия интенсивного когерентного (лазерного) излучения с искусственными средами, что, безусловно, предполагает высокую квалификацию автора в разных областях физики.

В диссертационной работе на основе анализа различных механизмов пондеромоторного действия оптического излучения на среду и с учетом существующих методов получения и обработки материалов (плазмохимии, анизотропного травления), а также технологий волоконной оптики (а именно - специальных световодов) разработаны и изготовлены микрооптомеханические резонансные системы разных типов (микрообъемные, волноводные – в оптоволоконном и интегрально-оптическом исполнении), характеризующиеся широким спектром ключевых параметров: собственных частот и добротности мод упругих колебаний; глубиной модуляции параметров света в условиях резонансных колебаний; эффективности лазерного возбуждения упругих колебаний; коэффициенты отражения, пропускания и др. Разработаны физико-математические модели взаимодействия микроосцилляторов с лазерным излучением.

На основе анализа свойств существующих классов лазеров определены оптимальные с точки зрения реализации внутренних резонансов типы

лазеров - источников высококогерентного излучения: лазеры на оптических волокнах, активированных редкоземельными элементами (волоконные лазеры). Предложены и разработаны физико-математические модели сложных систем на основе микроосцилляторов, взаимодействующих с излучением волоконных лазеров, в которых микроосциллятор и ВЛ могут рассматриваться как сосредоточенные, так и распределенные системы. Разработанные модели позволяют описывать как низкочастотные, так и высокочастотные радиофизические процессы в соответствии с тем, больше или меньше характерные длительности интересующих процессов по сравнению с временем полного пробега светом оптического резонатора ВЛ.

Теоретически и экспериментально исследованы режимы синхронных автоколебаний в рассматриваемых сложных системах, выявлена сложная структура зоны возбуждения указанных автоколебаний, изучена динамика систем в условиях свободных, вынужденных, параметрических и флуктуационных колебаний. Установлены общие закономерности и особенности в динамике рассматриваемых систем. Большой интерес представляют, в частности, результаты, свидетельствующие о возможности стабилизации частоты лазерных импульсов с помощью микроосцилляторов, которые, в известной мере, напоминают эффект «кварцевой» стабилизации в радиотехнике.

Отдельная глава посвящена исследованиям, направленным на разработку теоретических основ и методов создания нового класса резонансных волоконно-оптических датчиков (ВОД) различных физических величин (статического и акустического давления, силы, перемещения, температуры). Результаты испытаний созданных ВОД в условиях промышленной эксплуатации подтвердили возможность их длительного функционирования с приемлемой точностью в достаточно жестких условиях работы (климатические изменения, наличие внешних электромагнитных помех, вибрационные возмущения). В частности, продемонстрирована возможность контроля упруго-механических характеристик грунта

фундамента здания, которые использованы для оптимизации технологических режимов упрочнения грунта при строительстве ответственного объекта.

Отметим наиболее значимые научные и практические результаты диссертационной работы.

1. Разработаны новые классы связанных оптических систем лазеров с микрооптомеханическими резонансными устройствами и исследованы различные режимы возбуждения периодических колебаний, регистрируемых по параметрам лазерного излучения. Показано, что регулярные автоколебания, в том числе направления поляризации, могут реализовываться, в основном, на собственных частотах микроосцилляторов при малых расстройках собственных резонансов по отношению к релаксационным колебаниям в лазере.
2. Предложена «гидродинамическая» модель взаимодействия микросветовода с распространяющимся интенсивным излучением, с помощью которой исследована статическая и динамическая неустойчивости оптоволоконных микроосцилляторов на основе микросветоводов. Получены приближенные формулы, описывающие зависимости критической силы Эйлеровой неустойчивости и собственных частот мод поперечных колебаний микросветоводов от мощности излучения, установлена возможность параметрического возбуждения мод изгибных колебаний. Показано, что в консольных микросветоводах с непрерывным излучением возможны автоколебания по второй моде изгибных колебаний.
3. Обнаружены сложная структура зон возбуждения автоколебаний в связанных системах эрбий-иттербиевыми волоконных лазеров с микроосцилляторами в зависимости от уровня накачки и влияние отражения на границе кварцевой оболочки с внешней средой на частоту автоколебаний, которое объясняется дополнительным снятием инверсии населенностей в активной среде под действием рассеянного

- спонтанного излучения. Существенная оптическая нелинейность активной среды приводит к наблюдению ряда характерных эффектов, таких как хаотизация автоколебаний, жесткое возбуждение, гистерезис и бистабильность. Отмечен также режим с повышенной стабильностью частоты автоколебаний.
4. Предложены математические модели взаимодействия лазерного излучения в связанных системах с учетом оптической нелинейности активной среды и промоделированы переходные процессы при возбуждении и срыве автоколебаний. Впервые рассмотрены особенности динамики волоконных лазеров и порога возбуждения в связанных системах с микрорезонаторами, обусловленные зависимостью времени жизни метастабильного уровня в активном световоде от условий на границе кварцевая оболочка – внешняя среда.
 5. Впервые показана возможность пассивной синхронизации мод лазеров с помощью микроосцилляторов. Установлена возможность пассивной синхронизации мод в условиях комбинационного резонанса частот: межмодовых биений, релаксационных колебаний в волоконном лазере и собственной частоты микроосциллятора. Установлены закономерности изменений режимов пассивной синхронизации мод от параметров системы (микроосцилляторов, волоконного лазера), возможность существования режимов с одним и двумя импульсами в оптическом резонаторе.
 6. Показано, что модуляция накачки в связанной системе волоконного лазера с микрорезонатором приводит к существенному повышению чувствительности по отношению к возбуждению вынужденных колебаний микрорезонансных устройств, что открывает возможности для создания нового класса высокочувствительных резонансных волоконно-оптических датчиков физических воздействий, которые могут возбуждаться от термических флуктуаций.

7. Разработаны полностью оптические резонансные волоконно-оптические датчики с повышенной чувствительностью, использующие модуляцию лазерного излучения в связанных системах с микрооптомеханическими резонансными устройствами. Предложена модуляция за счет оптического туннелирования, межмодовой связи и многомодовой интерференции в отрезках специальных световодов в условиях лазерного возбуждения изгибных колебаний и волн. Реализованы многоканальные, многопараметрические волоконно-оптические датчики, которые прошли апробацию в промышленности в качестве составных частей систем мониторинга строительных сооружений.

Полученные результаты убедительно свидетельствуют, что автором создано и развито на современном научном и технологическом уровне новое научно-техническое направление исследования эффектов и закономерностей взаимодействия микрооптомеханических резонансных устройств с лазерным излучением, имеющих непосредственную практическую значимость и расширяющее знания о природе проявляемых резонансных явлений. Данное заключение подтверждают научные работы других авторов, включая и зарубежных, которые приступили к целенаправленным разработкам нано- и микрорезонаторных систем на рубеже 2010-х годов. Приоритет автора закреплен в 30 научных публикациях в реферируемых изданиях из списка ВАК, докладах на многих международных и Всероссийских конференциях и 7 патентах РФ на изобретения.

Достоверность результатов диссертации подтверждается повторяемостью экспериментальных данных и согласием результатов с теоретическими исследованиями и опубликованными результатами других авторов.

Материал в диссертации изложен хорошим физическим языком и структурирован, что облегчает работу с ним и понимание разнородных задач. Диссертация хорошо оформлена.

По диссертационной работе имеются замечания.

1. Из введения недостаточно ясно, по каким методическим подходам и основным результатам данная работа отличается от докторской диссертации Буркова В.Д., защищенной в 1999 году на аналогичную тему?
2. Из результатов работы не ясно, достигаются ли величины «гигантской добротности» при возбуждении реализованных оптических микрорезонаторов, как описано в монографии Городецкого М.Л., и возможна ли работа датчиков физических воздействий при таких резонансах?
3. Несмотря на безусловную полезность и важность применения разработанных датчиков давления и деформации для контроля напряженно-деформированных состояний (НДС), применительно к регистрации ими запредельных изменений НДС твердотельных конструкций получаемых данных только от указанных двух типов датчиков явно не достаточно, так как не решается задача предупреждения катастрофических разрушений, которая может быть решена, если дополнить систему мониторинга датчиками акустической эмиссии. Мониторинг и накопление сигналов от датчиков акустической эмиссии свидетельствует о расходе ресурса прочности конструкции и остаточном ресурсе.
4. Импульсы акустической эмиссии имеют спектр частот от десятков кГц до ~ 1 МГц и эти сигналы могут вносить помехи микрорезонаторным системам и датчикам на их основе, работающим одновременно и имеющим резонансные частоты в указанном диапазоне частот. Как можно независимо производить измерения датчиками на микрорезонансных структурах и датчиками акустической эмиссии, например, на пьезоэлектрических преобразователях, без взаимных помех?

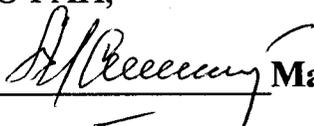
5. Недостатком диссертационной работы является отсутствие четких условий или регламентов применения разработанных микрорезонаторных датчиков физических воздействий на практике, и, в частности, на механических конструкциях, подвергаемых изменяемым деформациям с излучением импульсов акустической эмиссии с широкополосным спектром частот. Это необходимо будет сделать при массовом производстве и применениях разработанных датчиков.

Отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку диссертации, которая по научному уровню и значимости результатов полностью соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор Егоров Ф.А. заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук.

Автореферат полностью отражает основное содержание диссертации.

Диссертация заслушана и обсуждена на семинаре НЦВО РАН. Отзыв одобрен на заседании Ученого совета НЦВО РАН 29 мая 2017 г., протокол №7.

Ученый секретарь НЦВО РАН,
кандидат физ.-мат. наук



Машинский Валерий Михайлович

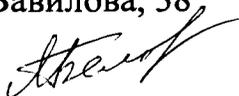
Отзыв составили:

Доктор физ.-мат. наук, профессор,
Зав. теоретическим сектором НЦВО РАН,
119333, г.Москва, ул.Вавилова, 38



Бирюков Александр Сергеевич

Кандидат физ.-мат. наук,
Ведущий научный сотрудник НЦВО РАН,
119333, г.Москва, ул.Вавилова, 38



Беловолов Михаил Иванович