УТВЕРЖДАЮ:
Директор ИАиЭ СО РАН
чл.-корр. РАН
Бабин Сергей Алексеевич
_____
«18» февраля 2022 г.
М.П.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук (ИАиЭ СО РАН)

на диссертационную работу Анашкиной Елены Александровны «Управление нелинейно-оптическими и лазерными процессами в волокнах и микрорезонаторах», оформленную в виде научного доклада и представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.19– лазерная физика.

Диссертация Анашкиной Е.А. посвящена разработке и исследованию источников когерентного оптического излучения с контролируемыми параметрами на основе специальных оптических волокон и микрорезонаторов, а также развитию методов управления характеристиками таких источников. Работа является **актуальной**, имеющей важное значение как для фундаментальных исследований, так и для многочисленных практических применений. В частности, самым известным приложением волоконных систем являются телекоммуникации. Волоконные лазерные источники также активно применяются в медицине, спектроскопии, прецизионной обработке материалов, они играют важную роль в развитии квантовых технологий. Известными приложениями микрорезонаторов с модами шепчущей галереи (МШГ) являются сенсоры, оптическая фильтрация и переключение, стабилизация частоты, обужение лазерной линии, а также детектирование и дистанционная диагностика различных молекул. В нелинейных микрорезонаторах возможна генерация керровских оптических частотных гребенок, представляющих собой последовательности ультракоротких импульсов (УКИ), спектр которых состоит из эквидистантных узких линий. Поскольку в спектральный диапазон генерации попадают "окна прозрачности" атмосферы, такие волоконные источники могут стать составной частью лидаров и оптических линий связи следующего поколения, а также применяться для мониторинга окружающей среды с помощью дистанционной спектроскопии. Не менее важной проблемой остаётся проблема измерения параметров УКИ. Особенно большое значение имеет разработка простых, надежных и недорогих

методов измерения формы и фазы УКИ, что является весьма актуальной задачей для сверхбыстрой фотоники с малыми энергиями импульса. Предлагаемая диссертационная работа имеет **целью** исследование нелинейно-оптических и лазерных процессов, возникающих при распространении излучения в оптических волокнах и микрорезонаторах на основе различных стекол и позволяющих осуществить управляемое преобразование излучения для решения фундаментальных и прикладных задач. Проведённое исследование вносит значительный вклад в разработку источников оптического излучения в диапазоне длин волн более 2-х мкм с управляемыми параметрами, в развитие оптики микрорезонаторов, а также в развитие методов характеризации широкого класса импульсов в различных лазерных системах, включая волоконные и твердотельные лазерные системы в ближнем и среднем ИК диапазонах.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка используемой литературы и списка научных публикаций, в которых изложены основные научные результаты диссертации. Общий объем диссертационной работы составляет 64 страницы, включая 22 рисунка и список литературы из 79 наименований.

Во введении изложены актуальность, научная новизна и практическая значимость диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, приведены положения, выносимые на защиту и сведения об апробации полученных результатов.

Первая глава посвящена исследованию широкополосного лазерного усиления и лазерной генерации на длинах волн более 2.3 мкм в волокнах из теллуритных стекол, в том числе легированных редкоземельными металлами. Теоретически показана возможность создания лазерных источников мощностью порядка 1 Вт на длине волны 2.3 мкм. В волокнах, легированных Er^{3+}, впервые теоретически исследована лазерная генерация в диапазоне 2.7-2.8 мкм в трех различных схемах, позволяющих эффективно управлять инверсией населенностей между верхним и нижним лазерными уровнями.

Вторая глава посвящена исследованию генерации суперконтинуума в халькогенидных волокнах. В частности впервые теоретически показано, что в халькогенидных волокнах со специальными конструкциями при использовании в качестве накачки стандартных источников УКИ на длине волны 2 мкм могут быть сгенерированы суперконтинуумы со спектральной шириной более 3х октав с длинноволновой границей ~10 мкм. Также впервые исследовано широкополосное лазерное усиление УКИ со спектральным ограничением ~100 фс в среднем ИК диапазоне в халькогенидных волокнах, легированных Pr^{3+}, Tb^{3+} и Dy^{3+}, при оптической накачке в ближнем ИК. Для ионов Pr^{3+} и Tb^{3+} энергия усиленных в диапазоне 4-5 мкм импульсов на порядок больше, чем для ионов Dy^{3+} для тех же параметров системы.

Третья глава посвящена описанию оригинального метода нахождения профиля интенсивности и фазы УКИ на основе трех спектров: фундаментального (исходного) спектра импульса и двух дополнительных спектров, полученных в результате преобразования измеряемого импульса в элементах с керровской нелинейностью, в частности, в нелинейных волокнах, для различных значений B-интеграла. Предложенный метод не требует генерации второй гармоники, поэтому нет принципиального ограничения на спектральную ширину измеряемых сигналов, связанного с шириной полосы синхронизма нелинейных кристаллов. Впервые с помощью данного метода измерены различные УКИ с использованием кварцевых и теллуритных волокон в качестве нелинейных элементов. Результаты подтверждены независимыми измерениями методом SHG FROG (для которых направление временной оси выбрано в соответствии с результатами, полученными разработанным методом).

Четвёртая глава посвящена детальному исследованию процессов, обусловленных керровской и рамановской нелинейностями, в кварцевых микросферах при накачке в областях нормальной и аномальной дисперсии, а также вблизи длины волны нулевой дисперсии. Достигнуты новые режимы генерации рамановских частотных гребенок с солитоноподобным спектром как в одном, так и в двух разных семействах мод. Впервые в микросферах из халькогенидного стекла получена одномодовая рамановская генерация, перестраиваемой в широком диапазоне длин волн, за счет перестройки частоты накачки, а также исследовано влияние отстройки накачки от точного резонанса на процесс каскадной генерации.

В заключении перечислены основные результаты проведённого диссертационного исследования.

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались автором и обсуждались на семинарах в ИПФ РАН, Институте телекоммуникаций Рижского технического университета (Латвия), Латвийском университете (Латвия), а также на множестве международных и российских конференций (более 9-ти мероприятий).

Публикации по теме диссертации. По теме диссертации опубликовано 35 работ в рецензируемых научных изданиях первого и второго квартилей, индексируемых в базах Web of Science и Scopus.

Научная новизна диссертационной работы заключается в детальном исследовании процессов генерации и нелинейных преобразований оптического излучения в теллуритных и халькогенидных волокнах, в обнаружении новых режимов генерации рамановских оптических частотных гребенок в кварцевых микросферах, а также в разработке оригинального метода нахождения профиля интенсивности и фазы УКИ. В

частности впервые в теллуритных волокнах, легированных ионами Tm3+, продемонстрированы широкополосное лазерное усиление и непрерывная генерация одновременно на двух переходах на длинах волн 2.3 мкм и 1.9 мкм соответственно. Теоретически показана возможность создания лазерных источников с мощностью излучения порядка 1 Вт на длине волны 2.3 мкм. Предложена новая схема двухцветной накачки теллуритных волокон, легированных ионами эрбия, для лазерного усиления и генерации излучения на длине волны около 2.7 мкм. Впервые показано, что в халькогенидных волокнах со специальными конструкциями при накачке УКИ на длине волны 2 мкм может быть сгенерирован суперконтинуум со спектральной шириной более 3х октав с длинноволновой границей ~10 мкм. Впервые теоретически продемонстрирована возможность использования полых тонкостенных сферических микрорезонаторов на основе теллуритного TeO_2-WO_3-La_2O_3 и халькогенидного As_2S_3 стекол для генерации оптических частотных гребенок в режиме диссипативных солитонов.

Практическая значимость результатов работы не вызывает сомнений. Результаты исследований новых источников оптического излучения в диапазоне длин волн >2 мкм с управляемыми параметрами на основе нелинейно-оптических и лазерных эффектов в волокнах из теллуритных и халькогенидных стекол с накачкой в ближнем ИК диапазоне могут применяться при разработке лазерных систем для практических применений, включая дистанционный мониторинг атмосферы, дистанционное обнаружение вредных или опасных веществ, биомедицинские приложения. Результаты исследований нелинейно-оптического преобразования и лазерной генерации в микросферах во многом имеют фундаментальный характер и вносят вклад в развитие оптики микрорезонаторов. Предложенный полуаналитический метод для описания непрерывной лазерной генерации с учетом конкуренции мод в микрорезонаторах, легированных РЗИ, может применяться при исследовании микролазеров на основе различных материалов. Кроме того, результаты диссертационной работы могут применяться при разработке миниатюрных фотонных устройств для многих приложений. Например, результаты исследований оптических частотных гребенок в кварцевых микросферах могут использоваться в телекоммуникационных системах при разработке пассивных оптических сетей с мультиплексированием с разделением по длине волны. Предложенный метод измерения профилей интенсивности и фазы УКИ, имеющий ряд преимуществ перед распространенными коммерчески доступными реализациями методов АКФ и SHG FROG, может применяться в качестве основного или дополнительного инструмента для характеризации широкого класса импульсов в различных лазерных системах.

Достоверность представленных результатов обусловлена использованием надежных и хорошо апробированных методов математического моделирования и численных расчетов, проверенных на известных моделях и откалиброванных по экспериментальным данным. Моделирование нелинейной динамики УКИ в теллуритных и халькогенидных волокнах выполнено в рамках обобщенного нелинейного уравнения Шрёдингера на основе метода Фурье с расщеплением по физическим факторам. В модели учтены: керровская и рамановская нелинейности, расчетная дисперсия, нелинейная дисперсия, зависимость эффективного размера фундаментальной моды от частоты, а также зависимость оптических потерь от частоты. При анализе генерации СК в халькогенидных волокнах также учтено двухфотонное поглощение. Теоретические исследования нелинейно-оптических процессов в микрорезонаторах на основе кварцевого, теллуритных и халькогенидных стекол выполнены в рамках обобщенного уравнения Луджиато-Лефевра.

По содержанию диссертационной работы могут быть сделаны следующие замечания:

1. В работе не обсуждается ресурсоёмкость предложенного метода восстановления формы и фазы УКИ, не приводится типичных значений времён, необходимых для проведения процедуры восстановления.

2. Также в реализации предложенного метода упомянут такой шаг, как нелинейное обратное распространение, но нет ни дополнительных пояснений, ни ссылок, позволяющих понять, что именно под этим подразумевается.

3. Работа содержит незначительное число опечаток и жаргонизмов

Перечисленные замечания не влияют на общую высокую положительную оценку работы и нисколько не снижают ценность полученных результатов. Диссертационная работа Анашкиной Е. А. «Управление нелинейно-оптическими и лазерными процессами в волокнах и микрорезонаторах» является законченным научным исследованием и отвечает требованиям установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 г. (ред. от 11.09.2021 г.), а ее автор, Анашкина Елена Александровна, заслуживает присуждения ей степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.19 – лазерная физика.

Доклад по диссертации заслушан на семинаре УНЦ «Квантова оптика» «27» января 2022 г.

Отзыв составил главный научный сотрудник лаборатории фотоники
Института автоматики и электрометрии СО РАН,
доктор физико-математических наук
Подивилов Евгений Вадимович
630090 г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, д.1, ИАиЭ СО РАН
Тел.: 8 (383) 330-79-69
E-mail: podivilov@iae.nsk.su

Подпись Подивилова Е. В. удостоверяю

Учёный секретарь
Института автоматики и электрометрии СО РАН,
кандидат физико-математических наук
Донцова Е. И.

Сведения о ведущей организации:
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук» (ИАиЭ СО РАН)
630090 г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, д.1, ИАиЭ СО РАН
Контактный телефон: 8 (383) 330-79-69
Интернет-сайт: www.iae.nsk.su, e-mail: iae@iae.nsk.su

Список основных публикаций работников ведущей организации по теме диссертации за последние 5 лет (не более 15):

1. *Babin, S.A., Kuznetsov, A.G., Sidelnikov, O.S., Wolf, A.A., Nemov, I.N., Kablukov, S.I., Podivilov, E.V., Fedoruk, M.P., Wabnitz, S.* Spatio-spectral beam control in multimode diode-pumped Raman fibre lasers via intracavity filtering and Kerr cleaning // Scientific Reports 2021, 11(1), p 21994, DOI: 10.1038/s41598-021-01491-0, Q1
2. *Smirnov, S., Andryushkov, V., Podivilov, E., Sturman, B., Breunig, I.* Soliton based χ(2) combs in high-Q optical microresonators // Optics Express 2021, 29 (17), p. 27434, DOI: 10.1364/OE.432529, Q1
3. *Bednyakova, A.E., Kharenko, D.S., Zhdanov, I., Podivilov, E.V., Fedoruk, M.P., Babin, S.A.* Raman dissipative solitons generator near 1.3 mkm: Limiting factors and further perspectives // Optics Express 2020, 28 (15), p. 22179, DOI: 10.1364/OE.393603 Q1
4. *Smirnov, S., Sturman, B., Podivilov, E., Breunig, I.* Walk-off controlled self-starting frequency combs in X(2) optical microresonators // Optics Express 2020, 28 (12), p. 18006, DOI: 10.1364/OE.395360 Q1
5. *Podivilov, E., Smirnov, S., Breunig, I., Sturman, B.* Nonlinear solutions for χ(2) frequency combs in optical microresonators //Physical Review A 2020, 101 (2), p. 023815, DOI: 10.1103/PhysRevA.101.023815 Q1
6. *Drobyshev, R.R., Lobach, I.A., Podivilov, E.V., Kablukov, S.I.* Spectral characterization technique of self-organized distributed feedback in a self-sweeping fiber laser // Optics Express 2019, 27 (15), p. 21335, DOI: 10.1364/OE.27.021335 Q1
7. *Sturman, B., Podivilov, E., Werner, C.S., Breunig, I.* Vectorial perturbation theory for axisymmetric whispering gallery resonators // Physical Review A 2019, 99 (1), p. 013810, DOI: 10.1103/PhysRevA.99.013810 Q1
8. *Podivilov, E.V., Kharenko, D.S., Gonta, V.A., Krupa, K., Sidelnikov, O.S., Turitsyn, S., Fedoruk, M.P., Babin, S.A., Wabnitz, S.* Hydrodynamic 2D Turbulence and Spatial Beam Condensation in Multimode Optical Fibers // Physical Review Letters 2019, 122 (10), p. 103902, DOI: 10.1103/PhysRevLett.122.103902 Q1
9. *Werner, C.S., Sturman, B., Podivilov, E., Manjeshwar, S.K., Buse, K., Breunig, I.* Control of mode anticrossings in whispering gallery microresonators // Optics Express 2018, 26 (2), p. 762, DOI: 10.1364/OE.26.000762 Q1
10. *Podivilov, E.V., Kharenko, D.S., Bednyakova, A.E., Fedoruk, M.P., Babin, S.A.* Spectral comb of highly chirped pulses generated via cascaded FWM of two frequency-shifted dissipative solitons // Scientific Reports 2017, 7 (1), p. 2905, DOI: 10.1038/s41598-017-03092-2 Q1
11. *Kharenko, D.S., Zhdanov, I.S., Bednyakova, A.E., Podivilov, E.V., Fedoruk, M.P., Apolonski, A., Turitsyn, S.K., Babin, S.A.* All-fiber highly chirped dissipative soliton generation in the telecom range // Optics Letters 2017, 42 (16), p. 3221, DOI: 10.1364/OL.42.003221 Q1
12. *Lobach, I.A., Drobyshev, R.V., Fotiadi, A.A., Podivilov, E.V., Kablukov, S.I., Babin, S.A.* Open-cavity fiber laser with distributed feedback based on externally or self-induced dynamic gratings // Optics Letters 2017, 42 (20), p. 4207, DOI: 10.1364/OL.42.004207 Q1