

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук Юлина Алексея Викторовича  
на диссертационную работу Анашкиной Елены Александровны  
«УПРАВЛЕНИЕ НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИМИ И ЛАЗЕРНЫМИ ПРОЦЕССАМИ  
В ВОЛОКНАХ И МИКРОРЕЗОНАТОРАХ»,  
представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук  
по специальности 1.3.19 – лазерная физика

Диссертация Анашкиной Е. А., оформленная в виде научного доклада, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и списка научных публикаций автора, в которых изложены основные научные результаты диссертации (всего 35 статей в научных журналах 1-го и 2-го квартилей Q1 и Q2 по базе данных Scopus).

*Во введении* обоснована актуальность выбранной темы и сделан краткий, и вместе с тем достаточно полный обзор современных исследований в области нелинейной динамики света в оптоволокнах и микрорезонаторах. В частности, автор диссертации убедительно показывает перспективность использования низкотемпературных стекол для генерации оптического излучения ближнего и среднего ИК диапазонов. В диссертации проведен обзор различных типов низкотемпературных стекол и рассмотрены особенности их использования в различных нелинейных оптических устройствах, в частности, в микрорезонаторах и волоконных лазерах.

На основании проведенного систематического и последовательного обзора автор формулирует цели и задачи своей диссертационной работы. Я с удовольствием отмечаю системный подход автора, полноту проведённого обзора современного состояния исследований, четкость и обоснованность поставленных целей.

Во введении к диссертации убедительно и конкретно (в 13 пунктах) сформулировано, в чем состоит новизна исследований, вошедших в диссертацию. Обсуждая теоретическую и практическую значимость проведённых исследований, диссертант демонстрирует, что достигнутые результаты имеют не только фундаментальную, но и практическую ценность.

При описании методов исследования автор диссертации с достаточной степенью детализации обсуждает адекватность использованных математических моделей, методы численного моделирования и особенности их использования в контексте решаемых в диссертации задач. При выполнении численного моделирования использовались как

компьютерные программы, разработанные автором диссертации, так и коммерческие программные продукты (COMSOL Multiphysics). Используемые численные методы являются хорошо апробированными, их эффективность и надёжность не вызывают сомнений.

По результатам проведенных исследований автором диссертации сформулировано девять положений, выносимых на защиту. Считаю, что положения являются хорошо сформулированными и в полной мере отражают новизну и высокую научную значимость диссертации.

Все результаты получены с помощью хорошо апробированных методов, продемонстрировано хорошее соответствие теории и эксперимента. Все представленные в диссертации результаты органично вписываются в картину современных оптических исследований. Результаты диссертации докладывались на многочисленных конференциях и семинарах, на их основе опубликовано 35 статей в авторитетных научных изданиях. Все это не оставляет сомнений в достоверности и научной значимости результатов диссертации.

Личный вклад автора в представленные в диссертации результаты четко сформулирован. Нет сомнений, что автор диссертации внес решающий вклад во все выносимые на защиту положения и результаты.

*В первой главе* диссертации подробно рассмотрено распространение оптического излучения в диапазоне длин волн 2-5 микрон в оптоволокнах на основе теллуридных стекол. В первой части этой главы проведен анализ усиления излучения и лазерной генерации на длинах волн 1.9 и 2.3 микрон в волокнах, легированных тулием при разных типах накачки (попутной накачки, встречной накачки, а также накачки, состоящей из встречной и попутной волн). Для этого выполнены анализ структуры оптических переходов и численное моделирование совместной динамики населенностей уровней и амплитуд волн накачки и генерируемого излучения. Теоретические результаты были подтверждены экспериментальными исследованиями, в которых наблюдалась лазерная генерация с параметрами, близкими к расчетным.

Во втором разделе первой главы аналогичное исследование проведено для оптических волокон, легированных эрбием. Особенностью таких стекол является то, что в них возможен излучательный переход на длинах волны 2.7-2.8 микрон. Исследованы режимы генерации излучения при импульсной накачке на длине волны 0.98 микрон; режим каскадной генерации при непрерывной накачке на длине волны 0.98 микрон; режим непрерывной двухчастотной накачки на длинах волн 0.98 и 1.7 микрон. Путём численного моделирования показан принципиальный вклад ап-конверсии в увеличение коэффициента усиления и мощности лазерной генерации в предложенных схемах.

В третьем разделе этой главы исследовано распространение оптических солитонов и генерация резонансного излучения в теллуридных стёклах. Изучен распад исходного импульса на последовательность солитонов и сдвиг частот солитонных импульсов из-за эффекта Рамана. Исследовано распространение оптических импульсов в волокнах с различным диаметром сердцевины и для разных мощностей накачки. Проведённые измерения полностью подтвердили результаты численного моделирования.

*Во второй главе* рассматривается динамика света в халькогенидных оптоволоконках. В первом разделе этой главы рассмотрена генерация оптического суперконтинуума при распространении в волноводе интенсивного импульса с частотой, лежащей в области аномальной дисперсии. Особенностью халькогенидных стёкол является большой коэффициент керровской нелинейности, но точка нулевой дисперсии может быть сильно смещена в область больших длин волн. В диссертации показано, что подбором материала и диаметра сердцевины оптоволоконка точка нулевой дисперсии может быть сдвинута в диапазон длин волн 2-3 микрона. Путем численного моделирования продемонстрировано, что в таких волокнах возможна генерация оптического суперконтинуума с шириной в три октавы (2-8 микрон) при длине распространения порядка 2 сантиметров.

Второй раздел этой главы посвящен генерации оптического суперконтинуума в микроструктурированных волокнах, когда центральная часть волновода окружена воздушными отверстиями. Была проанализирована дисперсия таких волокон и показано, что при достаточно малом диаметре сердцевины в диапазоне длин волн  $< 5$  микрон находятся две точки нулевой дисперсии. С точки зрения экспериментальной реализации эффективным решением является использование волокон с биконусной перетяжкой длиной порядка сантиметра. В диссертации выполнено исследование распространения импульсов в таких волокнах и продемонстрирована возможность генерации суперконтинуума.

В третьем разделе второй главы исследовано широкополосное усиление света при попутной накачке в волокнах, легированных атомами Pr, Tb и Dy. Показано, что влияние керровской нелинейности приводит к спектральному уширению, в то же время влияние эффекта Рамана незначительно при данных параметрах.

*В третьей главе* разработан новый метод определения профилей импульсов интенсивности и фазы сверхкоротких импульсов. Особенностью данного метода является то, что в нем не используется генерация второй гармоники, что уменьшает требования к спектральной ширине измеряемых сигналов. Проведено критическое сравнение данного метода с хорошо известными методами АКФ, SHG XFROG и SPIDER. В первом разделе третьей главы рассмотрена идея и алгоритмическая реализация метода.

Во втором разделе изложены результаты применения данного метода для различных тестовых примеров. Работоспособность и эффективность метода была продемонстрирована как теоретически, так и экспериментально при использовании различных нелинейных элементов (отрезков нелинейных оптоволокон). Показано, что при работе с достаточно короткими импульсами необходимо учитывать дисперсию оптоволокон. Результаты, полученные автором диссертации, хорошо коррелируют с результатами, полученными другими исследователями.

В четвертой главе рассмотрены различные нелинейные процессы, протекающие в оптических микрорезонаторах. В качестве математической модели в теоретической части исследования использовалась широко известная модель Луджиато-Лефевра. В экспериментах применялись сферические микрорезонаторы (кварцевые, теллуритные и халькогенидные) оптически связанные с оптоволоконными в месте их биконусной перетяжки. Для накачки использовалось непрерывное лазерное излучение с длиной волны в диапазоне 1.517-1.576 микрон.

В первом разделе четвертой главы исследовано формирование частотных гребёнок в кварцевых микросферах. Показано, что формирование частотной гребёнки происходит вследствие формирования оптического солитона, распространяющегося по микросфере. В диссертационной работе показана важность учета эффекта Рамана на распространение солитонов и генерацию частотной гребёнки. Также в этом разделе обсуждаются частотные гребёнки, возникающие при мультисолитонном режиме распространения света в резонаторе.

Во втором разделе четвертой главы обсуждается возможность использования частотных гребёнок, генерируемых в кварцевых микросферах для телекоммуникационных применений.

Динамика диссипативных солитонов в тонкостенных теллуритных и халькогенидных микросферах рассмотрена в третьем разделе четвертой главы. В этом случае можно осуществлять управление дисперсией волноводных мод путём изменения диаметра и толщины микросферы. Это позволяет сместить точку нулевой дисперсии в область более коротких длин волн. В работе теоретически показано, что, оптимизируя параметры, можно получить частотные гребёнки с ширинами 200 (теллуритные стёкла) и 700 (халькогенидные стёкла) нанометров на уровне 30 дБ.

В четвертом разделе рассмотрена рамановская генерация в халькогенидных микросферах. В диссертации экспериментально показана возможность одномодовой рамановской генерации в таких системах. Наблюдаемые в эксперименте результаты хорошо объясняются проведённым численным моделированием. В работе теоретически

исследовано влияние частотной отстройки на режим генерации, в частности показано, что в таких системах возможна каскадная рамановская генерация.

Пятый раздел четвертой главы посвящён исследованию лазерной генерации, в том числе многочастотной генерации в микросферах, изготовленных из теллуридных стёкол. В работе предложен оригинальный метод решения скоростных уравнений, самосогласованно описывающих динамику населённостей различных атомных уровней и амплитуд различных мод резонатора. Проведено прямое сравнение развитого в диссертации полуаналитического метода с результатами прямого численного моделирования и показано, что при не слишком большом превышении порога лазерной генерации результаты, полученные обоими методами, совпадают. В то же время предложенный в диссертации метод позволяет значительно сократить время вычислений. С помощью нового метода были исследованы различные режимы генерации и показано, что в зависимости от параметров в данной лазерной системе может происходить одноцветная, двухцветная или трехцветная генерация. Следует заметить, что теоретические результаты данного раздела были убедительно подтверждены в экспериментах. Важным результатом данного раздела является то, что используемый подход к моделированию лазерной динамики может быть применён для исследования широкого класса лазерных систем.

*В заключении* изложены итоги выполненного исследования, рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы.

Характеризую диссертацию, я с удовольствием отмечаю, что она легко читается, в ней с необходимой полнотой отражено содержание диссертационного исследования. Результаты, представленные в диссертации, несомненно, обладают высокой научной ценностью и соответствуют передовому уровню исследований в области лазерной физики. Диссертация представляет собой хорошо структурированное, комплексное исследование широкого класса лазерных систем и является существенным вкладом в развитие современной оптики. При выполнении диссертационной работы соискатель Анашкина Е.А. продемонстрировала фундаментальный подход к анализу разнообразных научных проблем, умение получать интересные результаты, широкий научный кругозор и богатый арсенал используемых методов. Результаты диссертации опубликованы в авторитетных изданиях и были представлены на различных научных конференциях. Следует особо отметить, что в диссертации систематически проводится сопоставление полученных автором теоретических и экспериментальных результатов, сравнение их с результатами, полученными другими исследователями. Все это не оставляет сомнений в обоснованности научных положений и выводов, представленных в диссертации.

Отмечая высокий уровень работы я, тем не менее, хотел бы сформулировать ряд вопросов по содержанию диссертации.

1. Во втором разделе первой главы исследуется вопрос, как оптимальная длина оптоволокна и мощность каскадной генерации зависят от коэффициента отражения. При этом предполагается, что коэффициенты отражения одинаковы для излучения с длинами волн 1.555 и 2.8 микрон. В связи с этим возникает вопрос о возможности дальнейшей оптимизации параметров лазерной системы путем индивидуального подбора коэффициента отражения как на длине волны 1.555 микрон, так и на длине волны 2.8 микрона.
2. Третий раздел первой главы посвящён исследованию сдвига частоты солитонов, распространяющихся в оптоволокнах, изготовленных из теллуритного стекла. При заданной длине волокна и мощности исходного импульса максимальный сдвиг солитонной частоты достигается при диаметре сердцевинки оптоволокна около 2-х микрон. Разумно ожидать, что, изменяя параметры системы, например, увеличивая длину и диаметр сердцевинки волокна, можно добиться большего сдвига солитонной частоты. Я хотел бы задать вопрос о том, какие факторы ограничивают максимальный сдвиг частоты солитонов, распространяющихся в теллуритных оптоволокнах.
3. В первом разделе второй главы рассмотрена генерация оптического суперконтинуума в режиме импульсной накачки с длиной волны, лежащей в области нормальной дисперсии вблизи точки нулевой дисперсии. В диссертации, а также в оригинальной статье приведены спектры, убедительно показывающие генерацию оптического суперконтинуума. При этом, однако, остается вопрос о том, какую роль в этом играют солитоны, которые могут формироваться в частотной области, соответствующей аномальной дисперсии.
4. Во втором разделе второй главы исследована генерация суперконтинуума в халькогенидных волокнах с тонкой сердцевинкой, окруженной воздушными отверстиями. В этом разделе утверждается, что при распространении в таком волокне мощный импульс разбивается на последовательность солитонов. Затем, под действием эффекта Рамана, происходит сдвиг частот солитонов. Этот сценарий хорошо известен, например, в случае генерации оптического суперконтинуума в кварцевых волокнах. Однако, на мой взгляд, в диссертации недостаточно точно сформулировано, как именно из проведённого численного моделирования следует вывод о распаде исходного импульса на последовательность солитона.

5. Формирование частотных гребёнок в кварцевых микросферах обсуждается в первом разделе четвертой главы. Моделирование динамики света в таких микросферах выполнено в рамках скалярного уравнения Луджиато-Лефевра. Проведённые исследования позволили обнаружить два новых типа генерации частотной гребёнки. В частности, было экспериментально показано, что существуют частотные гребёнки с солитоноподобными спектрами, содержащими как ТЕ, так и ТМ моды. В связи с этим возникает вопрос о том, можно ли в этом случае говорить о формировании эллиптически поляризованного солитона. Связано ли формирование такого солитона с неустойчивостью солитона, содержащего только одну моду? Воспроизводятся ли экспериментальные результаты при моделировании векторного уравнения Луджиато-Лефевра?
6. В последнем разделе четвёртой главы рассматривается лазерная генерация в микросферах из теллуритных стёкол. В диссертации развит оригинальный метод нахождения стационарных состояний, основанный на предположении, что на каждом атомном переходе возбуждается не более одной моды. В то же время в качестве рабочих мод используются моды шепчущей галереи, которые, очевидно, являются вырожденными. Я хотел бы попросить автора пояснить, каким образом осуществляется селекция мод и почему наличие инверсии приводит к возбуждению только моды, распространяющейся в том же направлении, что и волна накачки.

Считаю необходимым отметить, что заданные вопросы не ставят под сомнение результаты, изложенные в диссертации, и не влияют на общую положительную оценку работы.

#### **Заключение.**

Диссертационная работа Анашкиной Елены Александровны «Управление нелинейно-оптическими и лазерными процессами в волокнах и микрорезонаторах» представляет собой завершённое научное исследование, квалифицируемое как научное достижение, и удовлетворяет всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 N 842 (ред. от 11.09.2021), а ее автор Анашкина Елена Александровна заслуживает присуждения ей ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.19 – лазерная физика.

**Официальный оппонент:**

Юлин Алексей Викторович, доктор физико-математических наук по специальности 01.04.05 – оптика, ведущий научный сотрудник Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»

Почтовый адрес: Российская Федерация, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, литер А.

Адрес сайта: <https://physics.itmo.ru/>

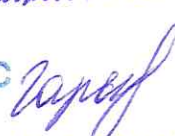
Телефон: +7(981)953-12-79

E-mail: a.v.yulin@corp.ifmo.ru

*Я, Юлин Алексей Викторович, выражаю свое согласие на обработку моих персональных данных, связанных с защитой диссертации.*

 Юлин А.В.  
16.02.2022

Подпись Юлина Алексея Викторовича удостоверяю

Подпись Юлина А.В.  
удостоверяю  
Менеджер ОПС  
Гарькина В.А.   
16.02.2022





**Список основных публикаций Юлина Алексея Викторовича по теме диссертации в рецензируемых научных журналах за последние 5 лет (не более 15)**

1. D.M. Di Paola, P.M. Walker, R.P.A. Emmanuele, A.V. Yulin, J. Ciers, Z. Zaidi, J.-F. Carlin, N. Grandjean, I. Shelykh, M.S. Skolnick, R. Butte, D.N. Krizhanovskii, "Ultrafast-nonlinear ultraviolet pulse modulation in an AlInGaN polariton waveguide operating up to room temperature", *Nat. Comm.*, 12:3504 (2021)
2. O. Melchert, A. Yulin, and A. Demircan, "Dynamics of localized dissipative structures in a generalized Lugiato–Lefever model with negative quartic group-velocity dispersion", *Optics Lett.*, Vol. 45, No. 10, 2764, (2020)
3. O. Melchert, A. Demircan, and A. Yulin, "Multi-frequency radiation of dissipative solitons in optical fiber cavities", *Scientific Reports*, 10:8849, (2020)
4. O. Melchert, S. Willms, S. Bose, A. Yulin, B. Roth, F. Mitschke, U. Morgner, I. Babushkin, and A. Demircan, "Soliton Molecules with Two Frequencies", *Phys. Rev. Lett.*, 123, 243905 (2019)
5. A. Zhizhchenko, S. Syubaev, A. Berestennikov, A.V. Yulin, Alexey Porfirev, Anatoly Pushkarev, I. Shishkin, K. Golokhvast, A.A. Bogdanov, A.A. Zakhidov, A.A. Kuchmizhak, Yu.S. Kivshar, and S.V. Makarov, "Single-Mode Lasing from Imprinted Halide-Perovskite Microdisks", *ACS Nano*, 13, 4140–4147, (2019)
6. L.E. Tapia Rodriguez, P.M. Walker, H. Sigurdsson, B. Royall, I. Farrer, D.A. Ritchie, A.V. Yulin, I.A. Shelykh, M.S. Skolnick, and D.N. Krizhanovskii, "Amplification of nonlinear polariton pulses in waveguides", *Optics Express*, Vol. 27, No. 8, 10692, (2019)
7. A. V. Yulin, "Inverse Cherenkov effect and control of optical solitons by resonant dispersive waves", *Phys. Rev. A*, **98**, 023833 (2018)
8. A. Yulin, I.V. Iorsh, I.A. Shelykh, "Resonant interaction of slow light solitons and dispersive waves in nonlinear chiral photonic waveguide", *New J. Phys.*, **20**, 053065 (2018)
9. A. Yulin, R. Driben and T. Meier, "Bloch oscillations and resonant radiation of light propagating in arrays of nonlinear fibers with high-order dispersion ", *Phys. Rev. A*, **96**, 033827, (2017)
10. I. Oreshnikov, R. Driben, and A. Yulin, "Dispersive radiation and regime switching of oscillating bound solitons in twin-core fibers near zero-dispersion wavelength", *Phys. Rev. A*, **96**, 013809, (2017)