

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук, члена-корреспондента РАН
Колачевского Николая Николаевича

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

Диссертационная работа Анашкиной Е.А. посвящена разработке и исследованию новых источников когерентного оптического излучения на основе специальных волокон и микрорезонаторов, а также развитию методов управления их характеристиками. Применение волокон на основе специальных теллуритных и халькогенидных стекол с подходящими физико-химическими свойствами позволяет использовать их для среднего инфракрасного диапазона, расширяя тем самым границы возможностей лазерных систем на основе традиционных кварцевых волокон, что является весьма актуальной задачей. Исследование генерации узкополосного перестраиваемого излучения и оптических частотных гребенок в микрорезонаторах также актуально для многих фундаментальных и прикладных задач, включая разработку многоканальных источников излучения для телекоммуникационных систем. Также в работе предложен и исследован новый оригинальный метод характеристики ультракоротких импульсов с простой аппаратно программной реализацией, позволяющий однозначно восстановить сигналы без ограничения на их спектральную ширину. Данный метод является перспективным для реализации в устройствах интегральной фотоники и волоконной оптики.

Все научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, обладают новизной, являются обоснованными и достоверными. Автором получено много новых результатов, связанных с лазерной генерацией и усилением излучения в специальных волокнах и микрорезонаторах, а также с развитием метода характеристики оптических импульсов. Ряд эффектов и режимов преобразования излучения в микрорезонаторах обнаружен и исследован впервые. Достоверность подтверждается хорошим соответствием экспериментальных и теоретических результатов, применением надежных и хорошо апробированных моделей и методов исследования.

Диссертация, оформленная в виде научного доклада, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и списка научных публикаций, в которых изложены основные научные результаты (всего 35 статей в журналах первого и второго квартилей Q1 и Q2 по международной базе данных Scopus, опубликованных в 2015-2021 гг).

Введение содержит информацию об актуальности темы, степени ее разработанности, целях и задачах исследования, научной новизне, теоретической и практической значимости работы, методологии и методах исследования, положениях, выносимых на защиту, степени достоверности и апробации результатов, личном вкладе автора.

В первой главе Анашкина Е.А. исследует возможности создания новых оптических источников на основе волокон из теллуритных стекол в важном с точки зрения приложений спектральном диапазоне 2-5 мкм. Теллуритные стекла представляют большой интерес для задач волоконной оптики в данном диапазоне, так как имеют относительно небольшие потери, высокую нелинейность и позволяют использовать излучательные переходы активных ионов в диапазоне 2.3-3 мкм, что не доступно для кварцевых стекол. Анашкина Е.А. впервые в

теллуритных волокнах, легированных редкоземельными ионами, исследовала широкополосное лазерное усиление и лазерную генерацию на длинах волн ≥ 2.3 мкм: около 2.3 мкм в легированных ионами Tm^{3+} волокнах, и в диапазоне 2.7-2.8 мкм в легированных ионами Er^{3+} волокнах. В диссертационной работе также теоретически показана возможность получения частотно-перестраиваемых солитонов с максимальной центральной длиной волны >4 мкм и дисперсионных волн на длине волны >5 мкм в микроструктурированных волокнах из нелегированного теллуритного стекла с сердцевинной, окруженной воздушными отверстиями.

Во второй главе диссертант исследует возможности создания оптических источников на основе халькогенидных волокон в спектральном диапазоне 2-10 мкм. Следует отметить, что в настоящее время халькогенидные волокна применяются для генерации суперконтинуумов в среднем инфракрасном диапазоне, но для их накачки, как правило, используются сложные параметрические системы, изначально производящие импульсы в среднем инфракрасном диапазоне. Практический интерес представляет переход к накачке в ближнем инфракрасном диапазоне с целью упрощения и удешевления источников суперконтинуумов. Анашкина Е.А. впервые теоретически показала, что в халькогенидных волокнах со специальными конструкциями могут быть сгенерированы суперконтинуумы с шириной спектра, превышающей 3 октавы в диапазоне 1-10 мкм, при накачке стандартными волоконными лазерами на длине волны 2 мкм. Также исследована проблема лазерного усиления ультракоротких импульсов в активных халькогенидных волокнах в среднем инфракрасном диапазоне. Диссертантом предложены и исследованы широкополосные усилители в диапазоне 4-5 мкм на основе легированных ионами Pt^{3+} , Tb^{3+} или Dy^{3+} волокон с непрерывной оптической накачкой в ближнем инфракрасном диапазоне. Результаты данной главы могут быть востребованы при разработке простых, недорогих и компактных источников когерентного излучения в среднем инфракрасном диапазоне на основе халькогенидных волокон и стандартных диодных или волоконных лазеров накачки.

В третьей главе автором предложен, разработан и исследован новый, оригинальный, простой метод нахождения профилей интенсивности и фазы ультракоротких импульсов на основе измерения 3х спектров: фундаментального и 2х дополнительных, полученных в результате преобразования измеряемого импульса в нелинейных волокнах или других элементах с кубической керровской нелинейностью для 2х различных значений V -интегралов. С помощью разработанных автором итерационных алгоритмов производится обработка экспериментальных данных, что позволяет восстановить форму и фазу сигналов. В предложенном методе отсутствуют неоднозначности при восстановлении фазы, связанные с выбором ее знака, направлением временной оси, неопределенностью в точках с нулевой спектральной интенсивностью. Метод не требует генерации второй гармоники, поэтому нет принципиального ограничения на спектральную ширину измеряемых сигналов. Метод применим как к волоконно-оптическим источникам, так и к другим лазерным системам и системам телекоммуникаций. Впервые с помощью данного метода измерены различные импульсы с использованием нелинейных кварцевых и теллуритных волокон.

В четвертой главе Анашкина Е.А. исследует фундаментальные и прикладные вопросы оптики микрорезонаторов, изготавливаемых на основе волокон из кварцевого, теллуритных и халькогенидных стекол. Выполнены детальные исследования процессов, обусловленных керровской и рамановской нелинейностями, в кварцевых микросферах. Некоторые нелинейно-оптические режимы обнаружены впервые. В качестве прикладного аспекта показана возможность применения оптических частотных гребенок в качестве источников многоканального лазерного излучения в пассивных оптических сетях с мультиплексированием с разделением по длине волны (WDM-PON). В халькогенидных микросферах впервые получена

одномодовая рамановская генерация, перестраиваемая в широком диапазоне длин волн. В теллуридных микросферах, легированных редкоземельными ионами, теоретически и экспериментально исследована лазерная генерация, включая режимы одновременной генерации на различных лазерных переходах и режимы переключения между длинами волн.

В заключении подведены итоги проведенного исследования, сформулированы основные результаты, а также рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

Работа представляет собой законченное крупное научное исследование, в результате которого достигнуты значимые и практически важные результаты в области создания новых источников когерентного излучения, методов характеристики лазерных импульсов и физики микрорезонаторов. Совокупность полученных результатов квалифицируется как значимое научное достижение в области лазерной физики. Особенно хочется отметить высокую актуальность исследований с новыми типами активных оптических волокон, оригинальный и апробированный метод характеристики ультракоротких импульсов, а также обоснованные предложения по использованию микрорезонаторов для современных задач телекоммуникаций.

К изложению работы можно сделать несколько замечаний, которые носят несущественный характер и не влияют на основные результаты исследования.

- 1) В разделе “Методология и методы исследований” подробно изложены математические модели и численные схемы, использовавшиеся автором в работе. Также хотелось бы видеть краткое описание методов изготовления оптических волокон с указанием воспроизводимости полученных результатов. Оптические волокна разного состава и структуры использовались в ряде основных разделов диссертации, для читателя существенно понимание особенностей их изготовления. Краткий комментарий по этому вопросу дан в разделе “Личный вклад автора”, но на мой взгляд, он не достаточно информативен.
- 2) В разделе 2 (2.1, 2.2) представлены результаты по генерации суперконтинуумов со спектральной шириной до $3x$ октав в сплошных и полых волокнах с высокими коэффициентами керровской нелинейности. Однако, в тексте не затронут вопрос о структуре этого суперконтинуума (что зависит от процессов его формирования). Был бы полезен комментарий о возможности генерации гребенки частот с выделенными отдельными модами и большим спектральным контрастом компонентов гребенки над спектрально-непрерывным пьедесталом.
- 3) В главе 3 предложен новый метод характеристики параметров ультракоротких импульсов и результаты его экспериментальной апробации в нескольких режимах. Хотелось бы также иметь описание границ применимости метода - какая минимальная и максимальная длительность импульса может быть охарактеризована, чем определяется предельная чувствительность метода по интенсивности.
- 4) В главе 4 представлены результаты генерации полихроматического когерентного излучения с использованием микрорезонаторов, в том числе для задач современных телекоммуникаций. Какова добротность использовавшихся микрорезонаторов? Насколько существенны процессы деградации Q -фактора и условий возбуждения (связь волокно-резонатор) в процессе экспериментов и на длительных временах? Достаточно ли воспроизводимость для поставленной задачи? В задачах телекоммуникаций важно отношение сигнал/шум, поэтому хотелось бы иметь оценку на отношение мощности в несущей (одной из когерентных компонентов спектра) к мощности излучения в определенном спектральном диапазоне вокруг нее (близком к полосе передаваемого сигнала) и сравнение с классическими лазерными источниками.

Диссертационная работа Анашкиной Елены Александровны «Управление нелинейно-оптическими и лазерными процессами в волокнах и микрорезонаторах» представляет собой целостное завершённое исследование, которое можно квалифицировать 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:

Колачевский Николай Николаевич, член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук по специальности 01.04.05 - оптика, директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им.П.Н. Лебедева Российской академии наук

Почтовый адрес: 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53

Адрес сайта: <https://www.lebedev.ru/>

Телефон: +7(499) 132-68-10

E-mail: kolachevsky@lebedev.ru

Я, Колачевский Николай Николаевич, выражаю свое согласие на обработку моих персональных данных, связанных с защитой диссертации.

01.02.2022

д.ф.-м.н., чл-корр. РАН

Колачевский Н.Н.

Подпись заверена
Ученый секретарь ФИАН
к.ф.-м.н.



Колобов А.В.

Список основных публикаций Колачевского Николая Николаевича по теме диссертации в рецензируемых научных журналах за последние 5 лет (не более 15)

1. IV Zalivako, IA Semerikov, AS Borisenko, MD Aksenov, K Yu Khabarova, **NN Kolachevsky**, Experimental Study of the Optical Qubit on the 435-nm Quadrupole Transition in the 171Yb^+ Ion //JETP Letters. – 2021. – Т. 114. – №. 2. – С. 59-64.
2. A. Golovizin, D. Tregubov, E. Fedorova, D. Mishin, D. Provorchenko, K. Khabarova, V. Sorokin, **N. N Kolachevsky**, "Simultaneous bicolor interrogation in thulium optical clock providing very low systematic frequency shifts." Nature communications 12.1 (2021): 1-9.
3. A Golovizin, D Tregubov, D Mishin, D Provorchenko, **N Kolachevsky**, "Compact magneto-optical trap of thulium atoms for a transportable optical clock." Optics Express 29.22 (2021): 36734-36744.
4. D Mishin, D Provorchenko, D Tregubov, **N Kolachevsky**, A Golovizin, "Continuous operation of a bicolor thulium optical lattice clock." Applied Physics Express 14.11 (2021): 112006.
5. NO Zhadnov, KS Kuderyarov, DS Kryuchkov, GA Vishnyakova, K Yu Khabarova, **NN Kolachevsky**, 48-cm-long room-temperature cavities in vertical and horizontal orientations for Sr optical clock //Applied Optics. – 2021. – V. 60. – №. 29. – P. 9151-9159.
6. KS Kuderyarov, AA Golovizin, AS Borisenko, NO Zhadnov, IV Zalivako, DS Kryuchkov, EO Chiglintsev, GA Vishnyakova, K Yu Khabarova, **NN Kolachevsky**, Comparison of Three Ultrastable Lasers with a Femtosecond Frequency Comb //JETP Letters. – 2021. – V. 114. – №. 5. – P. 243-249.
7. GA Vishnyakova, KS Kuderyarov, EO Chiglintsev, NO Zhadnov, DS Kryuchkov, K Yu Khabarova, **NN Kolachevsky**, Ultra-Stable Atmospheric Short Link for the Optical Frequency Signal Transfer //2021 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF/IFCS). – IEEE, 2021. – P. 1-3.
8. E Fedorova, A Golovizin, D Tregubov, D Mishin, D Provorchenko, V Sorokin, K Khabarova, **N Kolachevsky**, "Simultaneous preparation of two initial clock states in a thulium optical clock." Physical Review A 102.6 (2020): 063114.
9. M. Aksenov, I. Zalivako, N. Semenin, V. Smirnov, I. Zhuravlev, P. Vishnyakov, P. Sidorov, A. Borisenko, I. Semerikov, K. Khabarova, **N. Kolachevsky**, "Photoionization dynamics of Mg atoms during Paul trap loading using a two-color UV laser system", 2020 Laser Phys. Lett. 17 125501, (2020)
10. NO Zhadnov, KS Kuderyarov, DS Kryuchkov, GA Vishnyakova, K Yu Khabarova, **NN Kolachevsky**, "Long ULE Cavities with Relative Fractional Frequency Drift Rate below $5 \times 10^{-16}/\text{s}$ for Laser Frequency Stabilization », Bull. Lebedev Phys. Inst. 47, 257–261 (2020)
11. D. Kryuchkov, N. Zhadnov, K. Kuderyarov, G. Vishnyakova, K. Khabarova, **N. Kolachevsky**, «Compensation of residual amplitude modulation fluctuations in an optoelectronic system for laser radiation frequency», Quantum Electron. 50, 590 (2020)
12. K. Kuderyarov, D. Kryuchkov, G. Vishnyakova, N. Zhadnov, K. Khabarova, **N. Kolachevsky**, "Frequency transfer via an ultra-stable free-space link", Quantum Electron 50, 267–271 (2020)
13. Zalivako, I; Borisenko, A; Semerikov, I; Sidorov, P; Vishnyakov, P; Khabarova, K; **Kolachevsky, N**, Nonselective Paul ion trap loading with a light-emitting diode, Applied Physics Letters 115, 104102 (2019).

14. A.K. Fedorov, A.V. Akimov, J.D. Biamonte, A.V. Kavokin, F.Ya. Khalili, E.O. Kiktenko, **N.N. Kolachevsky**, Y.V. Kurochkin, A.I. Lvovsky, A.N. Rubtsov, G.V. Shlyapnikov, S.S. Straupe, A.V. Ustinov, and A.M. Zheltikov, "Quantum Technologies in Russia", *Quantum Science and Technologies*, 4 040501 (2019)
15. Golovizin, A; Fedorova, E; Tregubov, D; Sukachev, D; Khabarova, K; Sorokin, V; **Kolachevsky, N** "Inner-shell clock transition in atomic thulium with a small blackbody radiation shift", *Nature Communications* 10 1724 (2019)