

ОТЗЫВ

на диссертационную работу Андрианова Алексея Вячеславовича
**«Увеличение мощности и расширение диапазонов перестройки длины волны и
частоты повторения ультракоротких импульсов в волоконных лазерных
системах»**,
представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук
по специальности 1.3.19 – лазерная физика

Диссертация Андрианова А. В., оформленная в виде научного доклада, состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и списка научных публикаций автора, в которых изложены основные научные результаты диссертации (всего 33 статьи в научных журналах 1-го и 2-го квартилей Q1 и Q2 по базе данных Scopus и Web of Science).

Во введении обоснована актуальность выбранной темы и сделан краткий обзор современных исследований в области разработки новых подходов к повышению пиковой и средней мощности волоконных лазеров ультракоротких импульсов. В частности, автор диссертации убедительно показывает перспективность использования многосердцевидных оптических волокон для многократного повышения мощности выходного излучения волоконных импульсных лазеров. На основании проведенного систематического и последовательного обзора автор формулирует цели и задачи своей диссертационной работы. Можно отметить системный подход автора, полноту проведенного обзора современного состояния исследований, четкость и обоснованность поставленных целей.

Во введении к диссертации также сформулированы новизна исследований, теоретическая и практическая значимость проведенных исследований. 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. Диссертант убедительно демонстрирует навыки уверенного владения математическим аппаратом при выполнении численного моделирования. Используемые численные методы, в том числе разработанные самим автором диссертации, являются хорошо апробированными, их эффективность и надёжность не вызывают сомнений.

По результатам проведенных исследований автором диссертации сформулировано десять положений, выносимых на защиту. Положения хорошо сформулированы и в полной мере отражают новизну и высокую научную значимость диссертации.

Все результаты получены с помощью хорошо апробированных методик и подходов, продемонстрировано хорошее соответствие результатов численного

моделирования и полученных экспериментальных данных. Проведен тщательный анализ и обсуждение диссертантом результатов собственных исследований в сопоставлении с современными литературными данными. Результаты диссертации докладывались на многочисленных конференциях и семинарах, на их основе опубликовано 33 статьи в авторитетных научных изданиях. Все это подтверждает достоверность и научную значимость результатов диссертации. Автор диссертации внес решающий вклад во все выносимые на защиту положения и результаты.

В первой главе диссертации рассматривается предложенная и разработанная автором численная модель для расчета распространения и усиления оптических лазерных импульсов в волоконных системах. Данная модель использует улучшенный метод расщепления по физическим параметрам с использованием намного меньшего числа точек разбиения временных и спектральных сеток по сравнению числом точек, требуемых для стандартного сплит-степ метода. Теоретические результаты были подтверждены экспериментальными исследованиями, в которых для проверки работоспособности метода были проведены численные расчеты волоконного лазерного усилителя и параметрического усилителя. Также в первой главе рассматривается предложенный автором способ восстановления интенсивности и фазы ультракоротких оптических импульсов основанный на модификации метода оптического стробирования со спектральным разрешением на основе генерации второй гармоники с использованием асимметричной спектральной интерферометрии. Разработан итерационный алгоритм, который хорошо работает на зашумленных данных и имеет быструю сходимость даже для очень сложных импульсов.

Во второй главе приведены сведения о разработке и построении волоконных лазерных систем с высокой пиковой мощностью, созданных по технологии волокон с увеличенной площадью моды и на основе конусных волокон. Было экспериментально показано, что использование конусных волокон с большой площадью выходной моды имеет хороший потенциал для повышения пиковой мощности в лазерных усилителях чирпированных импульсов до мультимегаваттного уровня. При этом основные части системы, включая задающий фемтосекундный осциллятор, предусилители и сам конусный усилитель могут быть выполнены в полностью волоконном формате, что дает перспективы для использования таких волокон в многоканальных массивах с когерентным суммированием пучков для дальнейшего повышения мощности.

В третьей главе проведены теоретические и экспериментальные исследования распространения мощного излучения в многосердцевинных волоконных световодах (МСВ), в которых показано, что перспективы многократного повышения мощности связаны с использованием МСВ, в которых сигнал распределен по многим сердцевинами

и когерентно суммируется на выходе. В МСВ с достаточно близко расположенными сердцевинами излучение может распространяться в виде коллективных мод всех сердцевин (супермод), при этом может сохраняться когерентность между сердцевинами, что существенно упрощает дальнейшее суммирование излучения в один оптический пучок. Автором диссертации убедительно показано, что использование противофазной супермоды (в отличие от синфазной супермоды) в волокне с 6 сердцевинами, расположенными на кольце является многообещающей перспективой для масштабирования мощности. В настоящей работе было проведено численное и, впервые, целенаправленное экспериментальное исследование распространения и усиления данной супермоды. Также были сделаны обобщения на более сложные структуры, включая, структуру с несколькими гексагональными кольцами, а также квадратную матрицу сердцевин.

В четвертой главе предложен новый метод высокоэффективного суммирования в схеме с мозаично заполненной апертурой. Автором диссертации успешно использовалось сочетание устойчивых противофазных супермод в многосердцевинных волокнах с методом когерентного суммирования, что открывает очень эффективный путь для построения относительно простых в технологическом плане волоконных лазерных систем с высокой пиковой мощностью

В пятой главе разработаны новые методы генерации и управления связанными состояниями из нескольких импульсов, так называемыми солитонными кристаллами (СК). Автору удалось разработать солитонный лазер для генерации таких сложных структур как СК с использованием контролируемой задержки в несимметричном интерферометре Маха-Цандера и, более того, показана возможность управления сборкой таких СК посредством синхронной импульсной посылки в резонатор солитонного лазера. Частота следования импульсов в таких посылках достигала субтерагерцового диапазона. Несомненно, контролируемое получение таких связанных высокочастотных импульсных состояний открывает новые возможности для оптических систем высокоскоростной связи и обработки информации.

В шестой главе исследованы несколько направлений управления параметрами ультракоротких импульсов, связанных с использованием рамановской перестройки длины волны солитонов, генерации суперконтинуума и уширения спектра в нелинейных волокнах, включая многосердцевинные волокна. Экспериментально продемонстрирована генерация суперконтинуума с перестраиваемой сверхвысокой частотой повторения в мультигигагерцовом диапазоне, профилированного по спектру и по времени с помощью нелинейного преобразования управляемых солитонных кристаллов. В полностью волоконной системе продемонстрирована сверхширокополосная перестройка до длины волны 2.65 мкм солитонных импульсов. В численном моделировании

продемонстрирована возможность сверхширокополосной перестройки до длины волны около 4.5 мкм ультракоротких солитонов в многосердцевинных световодах на основе теллуридных стекол. Проведены детальные экспериментальные исследования пространственно-временной динамики ультракоротких импульсов, распространяющихся в МСВ в режиме нелинейного подавления дискретной дифракции. Продемонстрирована работа МСВ в качестве быстрого насыщающегося поглотителя, что позволило улучшать контраст и сжимать мощные фемтосекундные импульсы в волоконной системе.

Диссертационное исследование Андрианова Алексея Вячеславовича содержит обоснованные и четкие выводы, закономерно обобщающие результаты теоретического и экспериментального исследований. Основные результаты исследования представлены в *Заключении*. Текст диссертации хорошо отредактирован, снабжен иллюстративными материалами, отражающими основные экспериментальные и теоретические зависимости. Диссертантом выполнено довольно трудоемкое, большое по количеству решаемых задач исследование. Наиболее привлекательными сторонами данной работы являются высокая научная новизна её результатов в сочетании с сильной прикладной стороной разработок автора. Отметим также тщательный, доказательный и корректный анализ экспериментальных данных на основе использования современных средств математикой обработки. К изложению работы можно сформулировать ряд вопросов, которые носят несущественный характер и не влияют на основные результаты исследования.

1. Вопрос об эффективности накачки в случае использования многосердцевинных волоконных световодов. Полученная экспериментально величина в первом разделе третьей главы в режиме усиления при мощности накачки 12 Вт мощность сигнала 0.9 Вт дает невысокий процент эффективности преобразования мощности излучения накачки в излучение генерации. Рассматривалась ли оптимальная геометрия расположения сердцевин в МСВ для увеличения эффективности накачки?
2. Вопрос об устойчивости противофазной моды при усилении на больших пиковых мощностях в МСВ когда значительно проявляются фазовые и нелинейные флуктуации. Возможны ли перескоки из противофазной моды с синфазную и обратно при локальных температурных флуктуациях показателя преломления в оптических волокнах?
3. С точки зрения практических применений связанных импульсных состояний описанных в пятой главе, интересен вопрос о самовоспроизведении и долговременной стабильности солитонных кристаллов. Какое время жизни таких связанных импульсных состояний в работающем лазерном генераторе и сохраняется ли импульсный паттерн при следующем перезапуске импульсного лазерного генератора? Есть ли варианты самозапуска импульсных паттернов или же необходимо заново набирать структуру солитонного кристалла при очередном запуске генератора?

Список основных публикаций Худякова Дмитрия Владимировича по теме диссертации в рецензируемых научных журналах за последние 5 лет (не более 15)

- 1) D.V.Khudyakov, D.V.Ganin, A.D.Lyashedko, L.A.Frolova, P.A.Troshin, A.S.Lobach. "Thin films of MAPbI_3 and $\text{MA}_{0.15}\text{FA}_{0.75}\text{Cs}_{0.1}\text{PbI}_3$ perovskites under femtosecond laser irradiation: Nonlinear optical absorption and kinetics of photodegradation" //Mendeleev Communications. – 2021. – Т. 31. – №. 4. – С. 456-458.
- 2) D.V.Khudyakov, D.V.Ganin, A.D.Lyashedko, L.A.Frolova, P.A.Troshin, A.S.Lobach. "Nonlinear optical absorption in thin halide perovskite films under femtosecond excitation at wavelengths of 1064 and 532 nm" //Quantum Electronics. – 2021. – Т. 51. – №. 3. – С. 211.
- 3) V.F. Traven, D.A.Cheptsov, S.M.Dolotov, I.V.Ivanov, D.V. Khudyakov, V.A.Barachevsky, "7-Dialkylamino-3-[1, 5-diaryl (3-pyrazolinyl)] coumarins: two-photon absorption in solution and in polymer film" //Mendeleev Communications. – 2021. – Т. 31. – №. 4. – С. 520-522.
- 4) K.K.Bobkov, A.E.Levchenko, M.Yu.Salganskii, D.V.Ganin, A.D.Lyashedko, D.V.Khudyakov, M.E. Likhachev, "Triple-clad optical fibre for pulse stretching" //Quantum Electronics. – 2021. – Т. 51. – №. 10. – С. 894.
- 5) D.V.Khudyakov, D.V.Ganin, A.D.Lyashedko, M.E.Likhachev, A.K.Senatorov, M.Y.Salgansky, S.K.Vartapetov, "Application of dispersion-compensating fiber with W-type refractive index profile in stretcher of ultrashort laser pulses at a wavelength of $1.03 \mu\text{m}$ " //JOSA B. – 2019. – Т. 36. – №. 11. – С. 3066-3069.
- 6) D.V.Khudyakov, A.A.Borodkin, D.D.Mazin, A.S.Lobach, S.K.Vartapetov, "Optical nonlinear absorption of a few-layer MoS_2 under green femtosecond excitation" //Applied Physics B. – 2019. – Т. 125. – №. 5. – С. 1-6.
- 7) D.V.Khudyakov, A.S.Lobach, N.G.Spitsina, V.A.Kazakov, "Comparative analysis of nonlinear optical properties of single-layer graphene and few-layer graphene nanosheets" //Applied Physics B. – 2019. – Т. 125. – №. 12. – С. 1-7.
- 8) D.V.Khudyakov, A.A.Borodkin, D.V.Ganin, A.Lyashedko, M.E.Likhachev, S.K.Vartapetov, "Use of heavily doped germanosilicate fibres with a small core diameter in stretchers of ultrashort laser pulses at a wavelength of $1.03 \mu\text{m}$ " //Quantum Electronics. – 2019. – Т. 49. – №. 8. – С. 768.
- 9) D.V.Khudyakov, A.A.Borodkin, D.D.Mazin, A.S.Lobach, S.K.Vartapetov. "Optical nonlinear properties and dynamics of interband transitions in multilayer MoS_2 structures under femtosecond excitation at a wavelength of 514 nm " //Quantum Electronics. – 2018. – Т. 48. – №. 2. – С. 124.