

1. Наименование темы работы: Эффективные гибридные лазерные системы с высокой энергией сверхкоротких импульсов излучения.

2. Состав коллектива исполнителей:

зав.ЛЛС НГУ, к.ф.-м.н., с.н.с Кобцев Сергей Михайлович

проф. Турицын Сергей Константинович

к.ф.-м.н. Смирнов Сергей Валерьевич

к.ф.-м.н. Кукарин Сергей Владимирович

к.ф.-м.н. Нюшков Борис Николаевич

аспиранты Иваненко Алексей Владимирович, Федотов Юрий Сергеевич, студенты (6 чел.)

3. Контактное лицо

Смирнов Сергей Валерьевич, н.с. ЛЛС, к.ф.-м.н. тел. 339-41-65, моб. +7-923-222-8007

Кобцев Сергей Михайлович, зав. ЛЛС НИЧ НГУ, к.ф.-м.н., тел. 339-42-65.

4. Научное содержание работы

4.1 Постановка задачи. Проводимая в ЛЛС НГУ работа направлена на создание исследовательского задела в области новых более совершенных источников лазерного излучения с высокой энергией ультракоротких импульсов излучения. В частности, задачами проводимой работы являются определение области параметров стабильной генерации в длинных ( $> 1-10$  км) оптических резонаторах, выявление путей уменьшения длительности импульсов излучения в лазерных системах с синхронизацией мод и длинными ( $> 1-10$  км) резонаторами; определение предельно возможных параметров – минимальной частоты повторения импульсов, максимальной энергии импульсов – волоконно/гибридных лазерных систем с синхронизацией мод и длинными ( $> 1-10$  км) резонаторами. Объектом исследований являются лазеры с пассивной синхронизацией мод за счёт эффекта нелинейного вращения поляризации и насыщающихся поглотителей – углеродных нанотрубок.

4.2 Современное состояние проблемы. Высокоэнергетичные импульсы излучения малой длительности требуются в самых разных областях: от спектроскопии с высоким временным разрешением, позволяющей исследовать быстропротекающие процессы, до записи волноводов в прозрачных средах и лазерного ускорения частиц. Методы генерации таких импульсов излучения весьма разнообразны и постоянно совершенствуются. В последние годы в связи с бурным развитием волоконных и гибридных (волоконно-

дискретных) систем и технологий появился большой интерес к генераторам высокоэнергетических импульсов излучения малой длительности на основе этих систем и технологий, обеспечивающих ряд преимуществ по сравнению с традиционными твердотельными системами. К этим преимуществам относятся как высокая эффективность генерации и повышенная стабильность её параметров, так и компактность, простота эксплуатации, помехозащищенность, повышенный ресурс работы. Кроме того, волоконные и гибридные системы позволяют реализовать такие схемы и параметры, которые являются недостижимыми или чрезвычайно трудно достижимыми в традиционных твердотельных системах. В качестве примеров можно привести кольцевые резонаторы без использования отражающих элементов, протяженную активную среду (ее протяженность может составлять как метры, так и километры), относительно высокую пространственную плотность мощности излучения и т.д. Особый интерес при этом представляют предложенные недавно новые лазерные системы с полностью положительной дисперсией внутрирезонаторной среды, работающие в режиме синхронизации мод. Выходные импульсы этих систем характеризуются значительной фазовой модуляцией, что позволяет усиливать их до высоких энергий без традиционного временного «растяжения». Уникальные возможности, открываемые новыми волоконными и гибридными технологиями, позволяют создавать более совершенные источники излучения, однако эта работа требует определенного исследовательского задела.

4.3 Ожидаемые результаты. В ходе НИР впервые планируется определить области параметров стабильной генерации в длинных ( $> 1-10$  км) оптических резонаторах, выявить пути уменьшения длительности импульсов излучения в лазерных системах с синхронизацией мод и длинными резонаторами; определить предельно возможные параметры – минимальную частоту повторения импульсов, максимальную энергию импульсов – гибридных лазерных систем с синхронизацией мод в длинных резонаторах.

4.4 К настоящему времени получены следующие основные научные результаты: разработана численного и аналитического анализа режимов синхронизации мод излучения в сверхдлинных лазерных резонаторах. Создана основа для последующего рассмотрения режимов синхронизации мод в таких лазерах. Получено хорошее качественное согласие аналитического рассмотрения, численного моделирования и экспериментов по лазерной генерации в различных режимах. Дано объяснение необычной двухкомпонентной автокорреляционной функции лазерных импульсов. Установлено, что основным физическим механизмом переключения режимов генерации и возникновения

квазистохастической генерации является неустойчивость, обусловленная спецификой зависимости кривой усиления от мощности для лазеров с пассивной синхронизацией мод за счёт эффекта нелинейного вращения поляризации. Установлена корреляция длительности и энергии лазерных импульсов. Исследованы зависимости длительности и энергии лазерных импульсов от длины резонатора; установлено, что длительность и энергия генерируемых лазерных импульсов возрастают при увеличении длины резонатора вне зависимости от настройки поляризационных элементов. Усовершенствована технология изготовления тонких полимерных плёнок с содержанием углеродных нанотрубок. Проведено экспериментальное исследование стабильной синхронизации мод при различных длинах резонатора и мощностях накачки – определены области стабильности. Исследованы ширины областей стабильности, получены зависимости энергии генерируемых лазерных импульсов от параметров настройки внутрирезонаторных поляризационных оптических элементов. Разработан и апробирован алгоритм автоматической стабилизации лазерной генерации.

4.5 Использование кластера для решения задач НИР позволило существенно расширить возможности численного моделирования, что обусловлено высокой вычислительной сложностью решаемой задачи. Проводимые расчёты основаны на решении системы связанных обобщённых нелинейных уравнений Шрёдингера (НУШ), описывающих эволюцию двух компонент поляризации оптического импульса в лазерном резонаторе. Система НУШ интегрируется вдоль кольцевого лазерного резонатора. Интегрирование проводится многократно, от нескольких сотен до ~10 тысяч раз, до установления режима лазерной генерации. При этом интегрирование проводится для большого числа различных параметров настройки волоконных контроллеров поляризации, что обуславливает необходимость в большом количестве вычислительных ресурсов. Решение такой задачи на обычных персональных компьютерах крайне проблематично даже для одного набора физических параметров лазерной системы с относительно коротким (~5 м) резонатором. При увеличении длины резонатора вычислительная сложность задачи возрастает нелинейно, что связано с одновременным увеличением длины волокна (области интегрирования НУШ), ростом длительности лазерных импульсов за счёт хроматической дисперсии групповых скоростей и увеличением энергии импульсов. Использование кластера ИВЦ НГУ обеспечило уникальную возможность проведения серии расчётов для лазерных систем с различной длиной резонатора – от 2 м до 1 км, что позволило получить целый ряд новых важных научных результатов.

#### 4.6 Иллюстрации

Fig 1. Квазистохастический режим лазерной генерации в моделировании и эксперименте;

Fig 2. Многообразие режимов генерации, найденных при различных настройках внутрирезонаторных контроллеров поляризации.

#### 5. Публикации по теме работы и гранты.

Гранты:

- ✓ ФЦП «Кадры», мероприятие 1.5, гос. контракт № 02.740.11.5065 от «20» июля 2009 г. на проведение НИР коллективами под руководством приглашенных исследователей в области физики по теме: «Эффективные гибридные лазерные системы с высокой энергией ультракоротких импульсов излучения» (2009-2010 гг).
- ✓ FP7-People-2010-IRSES. “Carbon nanotubes technologies in pulsed fibre lasers for telecom and sensing applications” («Технологии на основе углеродных нанотрубок в импульсных волоконных лазерах для телекоммуникаций и сенсоров», 2010-2013).

Основные публикации по теме работы за 2010-2009 гг:

1. S.M.Kobtsev, S.V.Kukarin, S.V.Smirnov, Y.S.Fedotov. High-energy mode-locked all-fiber laser with ultralong resonator. *Laser Physics*, v. 20, N2, pp. 351-356 (2010).
2. S.M.Kobtsev, S.Kukarin, S.Smirnov, Y.Fedotov. Ultra-wide-tunable fibre source of femto- and picosecond pulses based on intracavity Raman conversion. *Proc. SPIE*, v. 7580, p. 758023 (2010).
3. S.M.Kobtsev, S.Kukarin, S.Smirnov. Different generation regimes of mode-locked all-positive-dispersion all-fiber Yb laser. *Proc. SPIE*, v. 7580, p. 758028 (2010).
4. B.N.Nyushkov, V.I.Denisov, S.M.Kobtsev, V.S.Pivtsov, N.A.Kolyada, A.V.Ivanenko, S.K.Turitsyn. Generation of 1.7-uJ pulses at 1.55um by a self-modelocked all-fiber laser with a kilometers-long linear-ring cavity. *Laser Physics Letters*, v. 7, N9, pp. 661-665 (2010).
5. S.Kobtsev, S.Kukarin, S.Smirnov, S.Turitsyn, A.Latkin. Generation of double-scale femto/pico-second optical lumps in mode-locked fiber lasers. *Optics Express*, v. 17, N 23, pp. 20707-20713 (2009).
6. S.Kobtsev, S.Kukarin, S.Smirnov, S.Turitsyn, A.Latkin. Mode-locked all-positive-dispersion long-resonator fiber lasers: features of femto- and picosecond pulses generation regime. *ACOFT/ACOLS 2009 Conference and Workshop on Dissipative Solitons*, Nov 29 - Dec 03 2009, Adelaide, Australia.
7. S.Kobtsev, S.Kukarin, S.Smirnov, A.Latkin, S.Turitsyn. High-energy all-fiber all-positive-dispersion mode-locked ring Yb laser with 8 km optical cavity length. *CLEO/Europe-EQEC 2009*, 14-19 June 2009, Munich, Germany, CJ8.4.