

1. Исследование фундаментальных физических процессов при генерации мощного суперконтинуума в оптических волокнах.

2. Состав коллектива исполнителей:

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

к.ф.-м.н. Смирнов Сергей Валерьевич

к.ф.-м.н. Кукарин Сергей Владимирович

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.

Исследование фундаментальных физических процессов при генерации мощного суперконтинуума в оптических волокнах, создание исследовательского задела в области нового поколения генераторов суперконтинуума с высоким уровнем энергии импульсов.

4.2 Современное состояние проблемы.

В настоящее время очень актуальной для целого ряда научных исследований и высоких технологий является задача разработки и создания источников когерентного оптического излучения нового поколения, отличающихся существенно более расширенным диапазоном параметров – длин волн и мощности излучения, энергии и длительности импульсов и т.д. Высокоперспективной основой для таких универсальных источников является эффект генерации суперконтинуума (СК) – спектрального суживания когерентного излучения в оптических волокнах. Широкий спектр СК позволяет выделять излучение на необходимых для различных применений длинах волн, а также оперативно выполнять спектральную перестройку селективируемых линий. К настоящему времени широкополосные и перестраиваемые генераторы СК уже нашли применение при решении широкого круга задач в области биомедицины, нанотехнологий, метрологии, спектроскопии и других областях. В перспективе источники излучения нового поколения позволят во многих применениях отказаться от использования большого количества ”одноволновых” лазеров, заменив их универсальным генератором суперконтинуума. Функциональность существующих генераторов СК может быть

существенно расширена, если их спектральная универсальность будет дополнена возможностями достижения высоких мощностей / энергий и малых длительностей импульсов излучения, высокой пространственной когерентности и низкого уровня шумов. Задача получения высокой энергии импульсов суперконтинуума является наиболее сложной, т.к. в общем случае при генерации СК импульс излучения накачки распадается на множество импульсов СК, характеризующихся относительно малой энергией. В одной из последних работ авторов данного проекта (S.Kobtsev, S.Kukarin, Y.Fedotov, S.Smirnov. All-fiber supercontinuum generator with high-energy pulses CLEO/Europe-EQEC 2009, 14-19 June 2009, Munich, Germany, C.J.P.16) был найден новый подход к получению высокоэнергетичных импульсов и генерации мощного суперконтинуума – использование импульсов накачки с гигантской фазовой модуляцией. Такие импульсы, имеющие относительно большую длительность, открывают путь к получению мощного СК в силу того, что на микро-, наносекундном временном масштабе импульс СК сохраняет целостность и может характеризоваться определённой энергией в отличие от многоимпульсных сложноструктурированных цугов суперконтинуума с фемтосекундной или пикосекундной накачкой. Несмотря на то, что эффект генерации СК в высоконелинейных оптических волокнах активно исследуется во всем мире на протяжении уже более десяти лет, до настоящего времени остается слабоизученным еще ряд важных фундаментальных вопросов, связанных с механизмами генерации и свойствами СК в некоторых перспективных режимах, в частности, при накачке относительно длинными (нано- и микросекундными) импульсами, в том числе с гигантской фазовой модуляцией, при их относительно высокой энергии (1 мкДж - 1 мДж). Планируемые в данном проекте исследования позволят достичь энергий импульсов СК в диапазоне 100 мкДж – 1 мДж и выявить принципиальные ограничения на мощность / энергию импульсов СК.

#### 4.3 Ожидаемые результаты.

Впервые будет разработана методология численного и аналитического анализа генерации суперконтинуума с высокой энергией импульсов, будут выявлены факторы, приводящие к насыщению энергии импульсов суперконтинуума, будет изучена степень влияния различных фундаментальных нелинейно-оптических процессов на свойства высокоэнергетичного суперконтинуума при генерации в микроструктурных волокнах с различной дисперсией, а также в нелинейных волоконных усилителях, будут определены условия, при которых импульсы суперконтинуума могут иметь относительно высокую энергию (1 мкДж – 1 мДж), в том числе при их спектральной селекции, будут найдены

пороговые условия сохранения временной структуры входных импульсов на собственном масштабе длительностей, будет экспериментально реализовано спектральное суживание излучения нано- и микросекундной накачки с энергией 100 мкДж – 1 мДж в диапазоне, перекрывающем 1-2 октавы по спектру. Планируемая работа лежит в фарватере современных научных исследований этой тематики, что подтверждается значительным количеством ссылок (>80) на предыдущие работы по этой теме авторов данного проекта за последние 5 лет (по данным ISI Web of Knowledge).

4.4 К настоящему времени получены следующие основные научные результаты:

В ходе проведенного моделирования физических процессов при генерации мощного суперконтинуума в условиях длинноимпульсной накачки с энергией импульсов в диапазоне 1 мкДж - 100 мкДж выявлены факторы, приводящие к насыщению энергии импульсов суперконтинуума (вынужденное комбинационное саморасcеяние (самосдвиг частоты оптических солитонов) и линейные потери излучения в длинноволновой и коротковолновой частях спектра). Исследованы временные и энергетические характеристики суперконтинуума с энергией импульсов 1-10 мкДж; изучена степень влияния разных нелинейно-оптических эффектов на свойства мощного суперконтинуума при генерации в микроструктурных волокнах с различной дисперсией, а также в нелинейных волоконных усилителях; выявлены условия, при которых импульсы суперконтинуума могут иметь относительно высокую энергию (100 мкДж – 1 мДж), в том числе при их спектральной селекции.

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 обобщённого нелинейного уравнения Шрёдингера (GNLSE), интегрируемого вдоль оптического волокна. Специфика решаемой в ходе данной НИР определяется, прежде всего, большой длительностью (вплоть до 1..10 нс) импульсов возбуждения, распадающихся на большое число фемтосекундных и суб-пикосекундных импульсов в процессе генерации СК. Вместе с большой шириной спектра СК данное обстоятельство обуславливает высокую ресурсоёмкость расчётов – необходимы сетки с числом узлов  $2^{20}$  и более. Сверх того, в условиях длинноимпульсной накачки ключевая роль в процессе спектрального суживания принадлежит модуляционной неустойчивости, приводящей к усилению спонтанного излучения. Как следствие, спектры СК сильно варьируются от одного импульса накачки к другому, и для адекватного моделирования получаемых

в эксперименте результатов необходимо проводить усреднение по большому (~100) числу случайных реализаций спонтанного излучения. Поскольку проведение расчётов для одного фиксированного набора параметров на обычном ПК может занимать порядка месяца, проведение НИР без использования кластера ИВЦ НГУ было бы невозможным.

#### 4.6 Иллюстрации

Fig 3. Спектры суперконтинуума, генерируемые в высоконелинейном волокне при разных уровнях мощности;

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

Гранты:

- ✓ ФЦП «Кадры», мероприятие 1.2.2, гос. контракт № П2489 от «20» ноября 2009 г. на проведение НИР по теме: «Исследование фундаментальных физических процессов при генерации мощного суперконтинуума в оптических волокнах» (2009-2011 гг).
- ✓ Совет по грантам Президента Российской Федерации: «Нелинейная спектроскопия и фотоника наноструктур, микроструктурированных волоконных световодов и атомов», грант Президента РФ НШ-4339.2010.2, 2010 г., (ведущая научная школа РФ чл.-корр. РАН А.М.Шалагина).
- ✓ Грант мэрии г. Новосибирска молодым учёным на НИР по теме: «Разработка генераторов суперконтинуума нового поколения для биотехнологий» (исп. С.В. Смирнов).

Основные публикации по теме работы за 2010-2009 гг:

1. S.M.Kobtsev, S.V.Kukarin, S.V.Smirnov. All-fiber high-energy supercontinuum pulse generator. *Laser Physics*, v. 20, N2, pp. 375-378 (2010).
2. S.M.Kobtsev, S.V.Kukarin. All-fiber Raman supercontinuum generator. *Laser Physics*, v. 20, N2, pp. 372-374 (2010).
3. С.М.Кобцев, С.В.Смирнов. Волоконные генераторы суперконтинуума с расширенным набором управляемых параметров в реальном масштабе времени. *Оптика и спектроскопия*, т. 107, № 3, с. 363-367 (2009).
4. S.Kobtsev, S.Kukarin, Y.Fedotov, S.Smirnov. All-fiber supercontinuum generator with high-energy pulses CLEO/Europe-EQEC 2009, 14-19 June 2009, Munich, Germany, CJ.P.16.
5. S.Kobtsev, S.Smirnov. Supercontinuum generators with CW and pulsed pump: temporal structure and dynamic control of parameters. *Proc. SPIE*, v. 7197, p. 71971A (2009).