

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте прикладной физики РАН (г. Нижний Новгород)

На правах рукописи

АНДРИАНОВ Алексей Вячеславович

**ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ
УЛЬТРАКОРОТКИХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ,
ПЕРЕСТРАИВАЕМЫХ В БЛИЖНЕМ
ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ**

01.04.21 – лазерная физика

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2011

Научный руководитель:

чл.-кор. РАН, д.ф.-м.н. Сергеев А.М.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор П.Г. Крюков
доктор физико-математических наук,
профессор Е.М. Громов

Ведущая организация:

Международный учебно-научный лазерный центр
Московского государственного университета
им. М.В. Ломоносова

Защита состоится «__» _____ 2011 г. в _____ на заседании диссертационного совета Д 002.069.02 в Учреждении Российской академии наук Институте прикладной физики (603950, г. Н. Новгород, ул. Ульянова, 46).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института прикладной физики РАН.

Автореферат разослан «__» _____ 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
профессор



Ю.В. Чугунов

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации. Бурное развитие волоконных лазерных систем в последние десятилетия определяет все большее их распространение в различных областях науки и технологий от медицинских и промышленных применений до сверхточных измерений. Широкий спектр приложений волоконных фемтосекундных лазеров обусловлен рядом таких их свойств, как компактность, высокая надежность, стабильность выходного излучения и отсутствие необходимости настройки в процессе работы. Эти свойства волоконно-оптических лазеров определяются, в первую очередь, их полностью волоконным исполнением, а также наличием высокостабилизированной диодной накачки. Несколько уступая по энергетическим характеристикам современным твердотельным лазерам, волоконные лазеры имеют значительные преимущества в частоте повторения импульсов (свыше 10 ГГц) и долговременной стабильности частоты (~0.01 Гц). В последнее время волоконные лазеры все в большей степени способны решать и такие актуальные задачи современной лазерной физики, как генерация ультракоротких, в том числе и предельно коротких оптических импульсов в ближнем и среднем инфракрасном диапазонах, где традиционно применяются твердотельные лазеры [1]. Использование волоконных и нелинейно-оптических технологий открывает уникальные возможности для управления параметрами выходного излучения, в частности, перестройку излучения в сверхшироком диапазоне частот, сверхширение спектра, а также сжатие импульса до предельно короткой длительности.

При использовании традиционного метода лазерной генерации оптического излучения диапазон перестройки длины волны имеет фундаментальное ограничение, обусловленное шириной полосы активных сред. Доступный диапазон длин волн фемтосекундного излучения может быть до некоторой степени расширен с помощью подходов нелинейной оптики, основанных на использовании нелинейного смещения частот волн, генерации новых спектральных компонент в процессах вынужденного рассеяния, а также при параметрических процессах, в которых возможно реализовать плавную перестройку частоты излучения. В волоконных системах перестраиваемое по частоте фемтосекундное излучение может быть получено как в процессе генерации суперконтинуума, так и с помощью рамановской перестройки длины волны солитонных импульсов в высоконелинейных волокнах. В этом отношении интересным представляется использование кварцевых световодов с уменьшающейся по длине дисперсией групповых скоростей (DDF, dispersion-decreasing fiber), которые, как и стандартные световоды, могут быть легко включены в состав полностью волоконных систем, но представляют дополнительные возможности для управления параметрами импульса. До настоящего времени такие световоды использовались для сжатия импульсов и генерации суперконтинуума [2-6].

Проблема генерации предельно коротких лазерных импульсов, длительностью вплоть до периода оптического колебания, продолжает привлекать к себе пристальное внимание широких кругов исследователей [7, 8]. В последние годы проявляется устойчивый интерес к генерации таких сверхкоротких импульсов с помощью оптических систем в полностью волоконном исполнении [9-12]. Надо отметить, что в отношении генерации предельно коротких импульсов в системах, базирующихся на волоконных эрбиевых лазерах [11, 12], уже достигнуты определенные успехи: были продемонстрированы такие приложения волоконных систем, как многофотонная микроскопия и спектроскопия с высоким временным разрешением [13], генерация и детектирование терагерцового излучения [14, 15], возбуждение наноразмерных нелинейных структур [16]. Для этих и многих других приложений весьма важным является не просто получение предельно коротких импульсов на фиксированной длине волны, но и возможность их частотной перестройки. Таким образом, актуальной является задача построения полностью волоконного источника предельно коротких импульсов с возможностью перестройки центральной длины волны их спектра.

Не менее актуальной проблемой современной нелинейной физики является генерация излучения с высокой пиковой интенсивностью и малой длительностью, которое также может быть получено с помощью волоконных систем. Последние достижения в области иттербиевых лазерных систем демонстрируют продвижение в область достаточно высокой энергии и малой длительности импульса, а соответственно, большой интенсивности, достаточной для изучения процессов взаимодействия сверхсильных лазерных полей с веществом, таких как генерация высоких гармоник и аттосекундных импульсов [17, 18]. Тем не менее, несмотря на хорошую проработку иттербиевых усилителей, позволяющих достичь высокого уровня энергии и средней мощности, в силу отсутствия стандартных волокон с аномальной дисперсией в области 1 мкм, генерация коротких фемтосекундных импульсов в этом диапазоне в полностью волоконных системах является достаточно сложной задачей.

Целью настоящей работы являются разработка и изучение перестраиваемых волоконных источников ультракоротких импульсов, включая

1. разработку и экспериментальную реализацию методов плавной перестройки фемтосекундных импульсов в области длин волн 1.5-2 мкм в полностью волоконной системе на основе волокон с уменьшающейся по длине дисперсией групповых скоростей,
2. экспериментальное и теоретическое исследование возможностей уширения спектра и сжатия перестраиваемого по длине волны импульса до предельно короткой длительности,
3. исследование нелинейного полностью волоконного преобразования излучения эрбиевого волоконного лазерного источника на длине волны 1.56 мкм в диапазон 1 мкм и разработку на этой базе двухдиапазонной

оптически синхронизированной эрбиево-иттербиевой системы для генерации мощных фемтосекундных импульсов.

Новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые предложено использовать световоды с плавно уменьшающейся по длине дисперсией (DDF) для широкополосной перестройки центральной длины волны солитонного импульса. На основе световода DDF создана компактная полностью волоконная лазерная система, позволяющая генерировать солитонные импульсы, плавно перестраиваемые в диапазоне длин волн от 1.6-2.2 мкм.
2. Найдено семейство квазисолитонных импульсов, распространяющихся с сохранением формы и длительности при непрерывном уменьшении несущей частоты в световодах с плавно уменьшающейся по длине дисперсией.
3. На основе полностью волоконной эрбиевой системы предложена и экспериментально реализована новая схема создания оптических импульсов предельно короткой длительности с малым числом периодов оптического поля с плавно перестраиваемой центральной длиной волны в диапазоне 1.7-1.9 мкм.
4. Предложена и экспериментально реализована новая полностью волоконная схема создания оптически синхронизированных фемтосекундных импульсов на двух сильно различающихся длинах волн (1-1.1 мкм и 1.6-1.8 мкм) в ближнем ИК диапазоне на базе эрбиевого волоконного лазера и кварцевого световода со смещенной точкой нулевой дисперсии.

На защиту выносятся следующие основные положения

1. В полностью волоконной системе на базе световода с уменьшающейся по длине аномальной дисперсией (DDF – dispersion-decreasing fiber) осуществлена плавная перестройка центральной длины волны солитонного импульса в широком диапазоне 1.5-2.2 мкм за счет совместного действия эффектов адиабатического сжатия солитона в DDF и вынужденного рамановского рассеяния.
2. В световоде с плавно уменьшающейся по длине дисперсией могут распространяться устойчивые квазисолитонные импульсы, у которых отстройка центральной частоты от точки нуля дисперсии и длительность зависят только от их энергии.
3. Полностью волоконная система, состоящая из эрбиевого задающего лазера с синхронизацией мод, волоконного усилителя с диодной накачкой, световода с плавно уменьшающейся дисперсией, высоконелинейного световода с нормальной дисперсией и линейного волоконного компрессора, способна генерировать предельно короткие импульсы,

содержащие 4 периода колебаний поля, перестраиваемые по длине волны в диапазоне 1.7-2 мкм.

4. В полностью волоконной гибридной эрбиево-иттербиевой системе фемтосекундные импульсы высокого качества в диапазоне длин волн 1-1.1 мкм могут быть получены с помощью нелинейного преобразования излучения эрбиевого задающего лазера в кварцевом волокне со смещенной дисперсией, и могут быть далее усилены в мощном иттербиевом усилителе до уровня энергии 100 нДж.

Научное и практическое значение

1. Созданы компактные волоконные лазерные системы, позволяющие генерировать перестраиваемые в диапазоне 1.6-2.2 мкм высококачественные фемтосекундные импульсы, которые могут найти применения для таких научных, биомедицинских и технических приложений, как нелинейная спектроскопия и микроскопия, телекоммуникации и генерация терагерцового излучения, наномодификация материалов.
2. Разработанные в диссертации методы плавной высокоэффективной перестройки длины волны импульса в световодах с переменной дисперсией могут быть положены в основу создания источника фемтосекундных импульсов в среднем ИК-диапазоне до 4-5 мкм с использованием прозрачных в этом диапазоне волокон переменного диаметра из стекол специального состава.
3. Создана мощная двухдиапазонная волоконная система, генерирующая импульсы в диапазонах 1-1.1 мкм и 1.6-1.8 мкм, которая может быть использована как задающий источник оптически синхронизированных импульсов для каналов накачки и сигнала мощных параметрических усилителей света, а также в экспериментах типа "накачка-зондирование".

Достоверность полученных результатов подтверждается хорошим согласием экспериментальных результатов с численными расчетами и приближенными аналитическими оценками. По первой главе - полученные в эксперименте спектры и автокорреляционные функции перестраиваемых по длине волны солитонов в световоде DDF, а также зависимости длины волны и длительности солитонов от энергии согласуются с результатами численного моделирования и аналитическими оценками. По второй главе - имеется согласие измеренного спектра суперконтинуума и восстановленной из автокорреляционных измерений формой импульса с результатами численного моделирования. По третьей главе - имеется соответствие картины эволюции спектра мощного фемтосекундного импульса в световоде со смещенной дисперсией с численным моделированием. Также имеется согласие измеренного положения спектрального пика излучения дисперсионных волн с расчетным значением, полученным из условий фазового синхронизма.

Апробация результатов. Основные результаты работы докладывались на российских и международных научных конференциях International Conference on Laser Optics (St.Petersburg, 2006, 2008), International Conference on High Power Laser Beams (HPLB 2006, Nizhny Novgorod), XI Нижегородской сессии молодых ученых (естественнонаучные дисциплины, 2006 г., Н. Новгород), International Conference on Coherent and Nonlinear Optics/International Conference on Lasers, Applications, and Technologies (ICONO/LAT 2007, Minsk, Belarus), International Conference CLEO/Europe-IQEC (Munich, Germany, 2007, 2009 - приглашенный доклад), Всероссийской конференции по волоконной оптике (Пермь, 2007 г.), Российском семинаре по волоконным лазерам (Новосибирск, 2007 г.), International Conference Photonics West (2008, San Jose, California USA), 17-th International Laser Physics Workshop (LPHYS 2008, Trondheim, Norway), 4th International Symposium on High-Power Fiber Lasers and Their Applications (St. Petersburg, 2008), 26th Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2009, Moscow), IX Международном симпозиуме по фотонному эхо и когерентной спектроскопии (ФЭКС 2009, Казань), семинарах ИПФ РАН, семинарах университета г. Ноттингем и Астон Университета (Великобритания). Результаты, полученные в ходе выполнения работы, вошли в Отчет РАН за 2006 г.

По теме диссертации опубликовано 20 работ, из которых 5 статей в реферируемых научных журналах, 3 статьи в сборниках трудов и 12 тезисов докладов.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, библиографии и трех приложений. Общий объем диссертации 156 страниц, включая 51 рисунок. Библиография включает 130 наименований.

Краткое содержание диссертации

Во Введении обоснована актуальность работы, сформулированы ее цели, изложена структура диссертации, приведены выносимые на защиту положения.

В первой главе, посвященной изучению нелинейной динамики фемтосекундных импульсов в световодах с уменьшающейся по длине дисперсией (DDF), теоретически и экспериментально исследуется возможность использования таких волокон для сверхширокополосной перестройки длины волны фемтосекундных импульсов и для их компрессии.

В начале главы приводятся основные уравнения, используемые для теоретического описания распространения ультракоротких импульсов в одномерных волоконных световодах. От полного волнового уравнения делается переход к уравнению однонаправленного распространения импульса в приближении малости отраженного сигнала, распространяющегося навстречу основному. Далее производится переход к обобщенному (модифицированно-

му) нелинейному уравнению Шредингера (ОНУШ) [19] для огибающей поля $A(z,t)$

$$\frac{\partial A(z,t)}{\partial z} - i\hat{\beta}\left(z, i\frac{\partial}{\partial t}\right)A(z,t) = i\gamma\left[1 + \frac{i}{\omega_0}\frac{\partial}{\partial t}\right]A(z,t)\int_{-\infty}^t R(t-t')|A(z,t')|^2 dt', \quad (1)$$

где ω_0 - несущая (оптическая) частота, γ - коэффициент нелинейности световода, $R(t)$ - полная функция нелинейного отклика (сумма мгновенной электронной и задержанной (рамановской) составляющих). Дисперсия волокна описывается оператором $\hat{\beta}$, который в частотном представлении есть не что иное как локальная постоянная распространения $\beta(z,\omega)$, плавно зависящая от координаты z вдоль трассы распространения.

В численном моделировании обнаружено, что в световоде DDF, где точка нулевой дисперсии плавно смещается в длинноволновую область, возможно распространение квазисолитонных импульсов, у которых приближенно сохраняется форма огибающей, длительность и энергия, а центральная частота плавно уменьшается таким образом, что спектр импульса всегда находится в области аномальной дисперсии (рис. 1).

На основе аналитической модели, построенной в предположении, что скорость рамановского частотного сдвига солитонного импульса, имеющего форму гиперболического секанса, при его распространении равна скорости движения точек нулевой дисперсии в частотном пространстве, получены аналитические выражения для длительности T и частотной отстройке солитона Ω (в неявном виде):

$$T = \frac{30^{2/3}}{15} \left(\frac{T_R \gamma W}{s} \right)^{1/3}, \quad \beta_2(\Omega, z) = \left(\frac{T_R \gamma^4 W^4}{30s} \right)^{1/3}. \quad (2)$$

Здесь $\beta_2(\Omega, z)$ - зависимость коэффициента дисперсии второго порядка DDF от частоты и координаты вдоль световода, $s = d\omega_c/dz$ (где $\beta_2(\omega_c, z) = const$) - скорость движения точек постоянной дисперсии в частотном пространстве, T_R - характерное время рамановского отклика и W - энергия солитона.

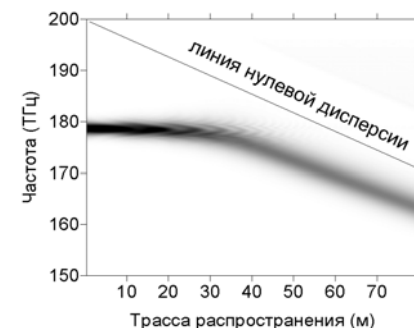


Рис. 1. Эволюция импульса, запущенного в область аномальной дисперсии в DDF, к частотносдвигаемому квазисолитону, движущемуся параллельно линии нулевой дисперсии.

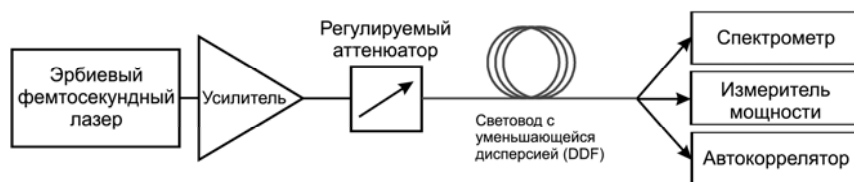


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для исследования световода DDF.

Численное моделирование показывает, что исходный импульс достаточной мощности эволюционирует к одному или нескольким квазисолитонным импульсам, параметры которых определяются выражениями (2) и зависят только от энергии квазисолитонов. Таким образом, можно говорить об однопараметрическом (параметр I) семействе частотносмещаемых квазисолитонов в DDF, найденных в данной работе. Показано, что режим распространения квазисолитонного импульса в DDF является самостабилизирующимся, и при наличии не слишком сильных возмущений импульс теряет энергию за счет излучения линейных волн, но не разрушается, а лишь переходит на линии с меньшим по абсолютной величине значением аномальной дисперсии.

Важно отметить, что длительность частотносмещаемого солитона уменьшается с уменьшением его энергии. Это связано с тем, что отстройка солитона с малой энергией от частоты нулевой дисперсии мала и импульс распространяется по линии малой дисперсии. В работе найдены ограничения минимальной длительности и соответствующей минимальной энергии квазисолитона, связанные с влиянием эффектов высших порядков, в частности, дисперсии третьего порядка.

Численное моделирование выявило пороговую природу эффекта формирования квазисолитонов в DDF. В настоящей работе получены приближенные пороговые условия, определяющие область параметров входного импульса, при которых возможно формирование квазисолитона в DDF.

Далее, в работе рассматривается обобщение модели квазисолитонного импульса на случай его перестройки в сверхшироком диапазоне, сравнимом с несущей частотой, что требует учета зависимости коэффициента нелинейности от частоты, а также учета уменьшения энергии импульса при приближенном сохранении числа фотонов импульса. На основе построенных аналитических моделей получены приближенные выражения для отстройки частоты, темп которой замедляется по мере распространения импульса, максимального сдвига частоты и максимальной трассы распространения импульса. Предложен оптимизированный профиль уменьшения диаметра световода DDF, который позволяет достичь большей перестройки частоты и меньших потерь энергии импульса.

Основные особенности распространения фемтосекундных квазисолитонных импульсов в световодах DDF были исследованы экспериментально в схеме, показанной на рис. 2. Источником световых импульсов служил за-

дающий генератор – эрбиевый волоконный лазер с пассивной синхронизацией мод на высокой гармонике кольцевого резонатора, сигнал с которого далее усиливался в эрбиевом волоконном усилителе с диодной накачкой и через регулируемый аттенюатор поступал в световод DDF. На входе в DDF импульсы имели длительность ~ 230 фс, максимальную среднюю мощность 105 мВт при частоте повторения 630 МГц. Сигнал на выходе DDF анализировался с помощью спектрометра, автокоррелятора и измерителя мощности. Для экспериментов был разработан и изготовлен в ИЦВО РАН световод DDF длиной 36 м, диаметр которого изменялся от 140 до 115 мкм, закон изменения диаметра соответствовал равномерному смещению точки нуля дисперсии в диапазоне 1.4-1.65 мкм, нелинейность составляла ~ 5 Вт $^{-1}$ км $^{-1}$.

Было установлено, что существует порог по энергии импульса (около 0.05 нДж), при превышении которого на выходе световода формируется импульс на смещенной частоте, который соответствует спектрально-ограниченному квазисолитонному импульсу, что было подтверждено автокорреляционными измерениями. Зависимости длительности квазисолитона и сдвига его частоты от энергии, полученные в эксперименте, хорошо согласовывались с результатами численного моделирования, а также находились в соответствии с аналитическими оценками. Квазисолитонный импульс в DDF перестраивался в диапазоне 1.65-2.1 мкм, минимальная длительность импульса составила 50 фс.

Далее в работе исследуется вопрос о возможности увеличения энергии импульса в полностью волоконной перестраиваемой системе на основе DDF. Для достижения большей энергии необходимо, во-первых, более мощный источник исходных импульсов, а во-вторых, для сдвига длины волны должен использоваться специальный световод DDF, поддерживающий распространение частотносмещаемых солитонов с высокой энергией. На основе анализа выражений, связывающих параметры квазисолитонов, были сформулированы требования к световоду DDF для перестройки мощных импульсов, и, исходя из этих требований, был разработан и изготовлен световод, в котором диаметр изменялся с 160 до 80 мкм на длине около 1.3 м. С этим световодом и с модернизированным более мощным эрбиевым источником, работающем на частоте повторения 50 МГц, в эксперименте была достигнута

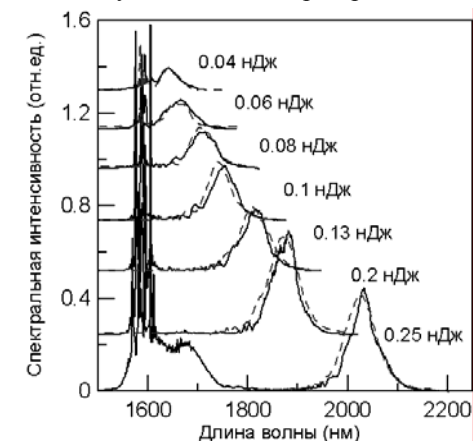


Рис. 3. Измеренные (сплошные кривые) и рассчитанные численно (пунктирные кривые) спектры сигнала на выходе DDF при различной энергии импульса.

сформулированы требования к световоду DDF для перестройки мощных импульсов, и, исходя из этих требований, был разработан и изготовлен световод, в котором диаметр изменялся с 160 до 80 мкм на длине около 1.3 м. С этим световодом и с модернизированным более мощным эрбиевым источником, работающем на частоте повторения 50 МГц, в эксперименте была достигнута

перестройка импульса в диапазоне 1.6-2.2 мкм при минимальной длительности 45 фс, максимальной энергии 1.7 нДж и средней мощности 85 мВт.

Интересной особенностью процесса перестройки мощных солитонов в световодах DDF являлась генерация видимого излучения, которое выходило как с торца световода, так и через оболочку со всей его поверхности, при этом цвет излучения, менялся от сине-зеленого на входном участке световода до темно-красного на выходе. Это излучение возникало в результате генерации третьей гармоники мощным квазисолитоном, распространяющимся в DDF с плавным смещением частоты, что подтверждалось соответствием частоты спектральных пиков видимого излучения утроенной центральной частоте квазисолитонов.

Вторая глава посвящена разработке полностью волоконной схемы получения предельно коротких импульсов, центральная длина волны которых может перестраиваться в достаточно широком диапазоне.

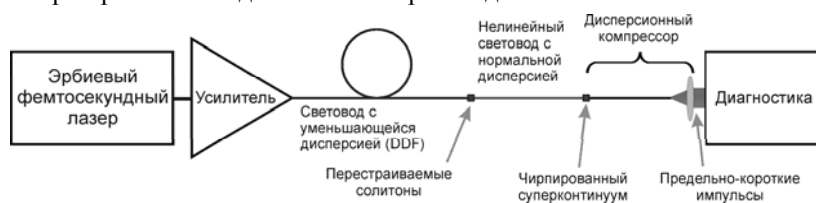


Рис. 4. Волоконная схема получения предельно коротких импульсов с перестраиваемой центральной длиной волны.

В начале главы описана предлагаемая схема получения предельно коротких импульсов с перестраиваемой центральной длиной волны (рис. 4). Она состоит из источника фемтосекундных импульсов на фиксированной длине волны (задающего осциллятора и усилителя), световода с уменьшающейся дисперсией DDF, кварцевого световода с малой нормальной дисперсией для контролируемого сверхуширения спектра и финального дисперсионного компрессора (волокна с малой нелинейностью или объемного элемента с аномальной дисперсией). Важной особенностью предлагаемой схемы является использование световода DDF на первом этапе нелинейного преобразования, что дает возможность стартовать при генерации континуума с высококачественного

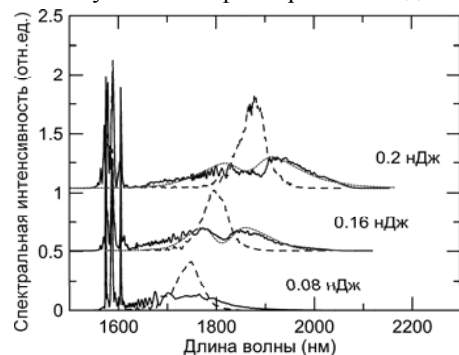


Рис. 5. Спектры суперконтинуума на выходе нелинейного волокна (сплошные кривые) при различной энергии исходных солитонов (спектры солитонов – пунктирные кривые) и результаты численного моделирования генерации суперконтинуума (точечные кривые).

ственного достаточно короткого импульса и позволяет реализовать широкополосную перестройку центральной длины волны результирующего предельно короткого импульса. В качестве световода для уширения спектра применялось кварцевое нелинейное волокно, вытянутое из заготовки, которая была использована для DFF, но с меньшим диаметром, за счет чего точка нулевой дисперсии была смещена до длины волны 2.2 мкм.

Измерения в экспериментальной схеме проводились с помощью широкополосного спектрометра и специального автокоррелятора, способного измерять импульсы минимальной длительностью до 10 фс. На основе измеренных спектров суперконтинуума после световода с нормальной дисперсией (рис. 5) показано, что происходит почти симметричное спектральное уширение исходного импульса, кроме того, спектр суперконтинуума перестраивается как целое вместе с перестройкой длины волны солитона, использованного для накачки. Для компенсации нелинейной фазовой самомодуляции и сжатия импульса был выбран отрезок стандартного световода SMF-28, длина которого подбиралась экспериментально по минимальной длительности импульса и составила 2 см.

Для выяснения формы и фазы короткого импульса применялась методика, использующая автокорреляционную функцию (АКФ) и спектр импульса, и сочетающая итерационный алгоритм, предложенный в [20], и алгоритм прямой минимизации разницы АКФ измеренного и восстановленного импульсов. АКФ наиболее короткого импульса и восстановленные профили интенсивности и фазы показаны на рис. 6. Длительность импульса по половине максимальной интенсивности составила 24.5 фс, что на центральной длине волны 1.85 мкм соответствует предельно короткому импульсу, содержащему четыре периода колебаний поля. При изменении длины волны солитонного импульса на выходе DDF (и соответствующем изменении его энергии) центральная длина волны континуума и предельно короткого импульса также изменялись в диапазоне 1.7-2.0 мкм, при этом длительность оставалась в пределах 35 фс.

Далее, для выяснения соответствия физической картины явления результатам измерений было проведено численное моделирование сверхуширения спектра в световоде с нормальной дисперсией и последующего сжатия в дис-

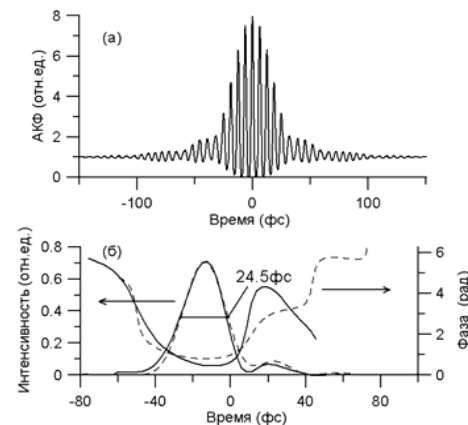


Рис. 6. Автокорреляционная функция предельно-короткого импульса (а). Восстановленные (б) и рассчитанные (б, пунктирные кривые) интенсивность и фаза сжатого импульса

персионном компрессоре. Рассчитанные на основе ОНУШ спектры суперконтинуума, профиль интенсивности и фазы показаны на рис. 5, 6 и находятся в хорошем соответствии с результатами измерений. Возможность использования модифицированного уравнения Шредингера для огибающей при моделировании сжатия импульсов, содержащих лишь небольшое число осцилляций поля, была проверена при сравнении результатов численного счета на основе ОНУШ и однонаправленного волнового уравнения, записанного непосредственно для электрического поля импульса. Сравнение показало практически идеальное соответствие результатов расчетов обоими методами, за исключением незначительных отличий, связанных с генерацией третьей гармоники.

Третья глава посвящена исследованию возможностей перестройки длины волны фемтосекундного излучения в коротковолновую область и построению гибридной эрбиево-иттербиевой волоконной системы, генерирующей мощные фемтосекундные импульсы 100 нДж уровня на длине волны около 1 мкм.

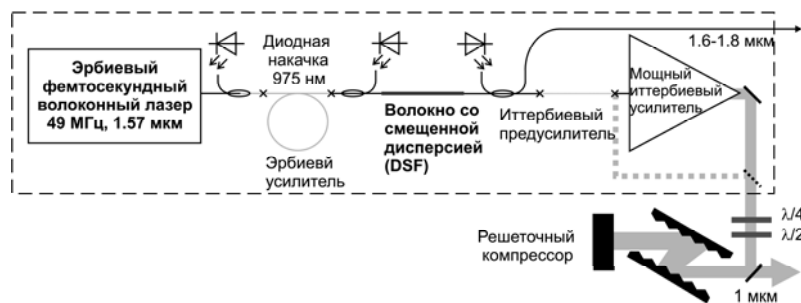


Рис. 7. Схема мощной эрбиево-иттербиевой волоконной системы.

Схема построения эрбиево-иттербиевой лазерной системы, показанная на рис. 7, включает задающий источник на длине волны 1.57 мкм, волоконный преобразователь фемтосекундного излучения в область длин волн около 1 мкм, и двухкаскадный иттербиевый усилитель с выходным компрессором.

В ходе работы была проведена оптимизация задающего лазера, работающего с низкой частотой повторения на основной гармонике резонатора, и усилителя для достижения высокой энергии исходного импульса. В оптимизированной схеме получены импульсы длительностью 70 фс с энергией 3 нДж на длине волны 1.6 мкм.

Для преобразования длины волны фемтосекундного импульса в диапазон усиления иттербиевых волокон используется специальный нелинейный световод, в котором точка нуля дисперсии смещена в область длин волн 1.4-1.5 мкм (DSF, dispersion-shifted fiber – световод со смещенной дисперсией). В этом волокне происходит сильное уширение спектра как в область низких, так и высоких частот, причем за счет специального выбора дисперсионной кривой волокна эффективность генерации высокочастотных компонент в некоторой полосе, определяемой условиями синхронизма, может быть суще-

ственно повышена. В эксперименте были использованы короткие отрезки (менее 15 см) кварцевого волокна, в котором точка нулевой дисперсии расположена на длине волны 1.4 мкм (рис. 8в), нелинейность этого световода составляет величину порядка $2.5 \text{ Вт}^{-1} \text{ км}^{-1}$. На измеренном спектре (рис. 8а) хорошо виден пик на длине волны около 1.06 мкм, который соответствует импульсу длительностью 55 фс (рис. 8г), кроме того, присутствует широкий спектр, простирающийся от 1.3 мкм до 1.9 мкм с изрезанным максимумом на длине волны исходного импульса и локальным гладким максимумом на длине волны 1.75 мкм, который соответствует формирующемуся в области аномальной дисперсии солитону. Таким образом, в волокне DSF генерируются два синхронизированных фемтосекундных импульса на сильно различающихся длинах волн.

Механизм генерации высокочастотного излучения исследовался с помощью численного моделирования, которое показывает, что на начальной стадии распространения происходит постепенное уширение спектра и сжатие импульса во времени, которое может быть ассоциировано с начальным этапом динамики солитона высокого порядка. До начала процесса распада импульса на несколько солитонов спектр уширяется настолько, что существенная часть его высокочастотного крыла попадает в область нормальной дисперсии и становится источником цуга линейных дисперсионных волн [21]. Формирующийся и сжимающийся на первом этапе распространения солитон высокого порядка ведет себя как единое нелинейное образование, поэтому изменение фазы всех его спектральных компонент происходит согласованным образом, и определяется в основном волновым числом $\beta(\omega)$ на его центральной частоте ω_s и нелинейной добавкой порядка $\gamma P/2$ (P – пиковая мощность импульса) [22]. Эффективная генерация линейных волн около частоты ω_{HF} происходит при выполнении условия синхронизма

$$\beta(\omega_s) + \beta_1(\omega_s)(\omega_{HF} - \omega_s) + \frac{\gamma P}{2} \approx \beta(\omega_{HF}), \quad \beta_1 = \frac{\partial \beta}{\partial \omega}, \quad (3)$$

что было подтверждено численным моделированием.

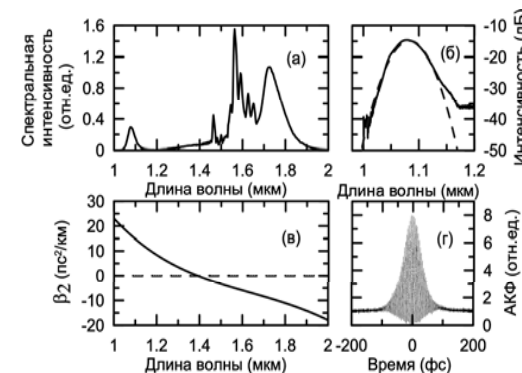


Рис. 8. Спектр сигнала на выходе световода DSF (а), увеличенный участок спектра (б), коэффициент квадратичной дисперсии DSF (в) и АКФ импульса на длине волны 1 мкм (г).

Экспериментально и численно показано, что центральная частота цуга линейных волн может быть подстроена в небольших пределах при изменении энергии входного импульса. В более широких пределах спектральный диапазон излучаемых дисперсионных волн может быть смещен как целое при выборе световода с другой дисперсионной характеристикой, а именно, положением длины волны нулевой дисперсии.

Энергия фемтосекундного импульса, генерируемого в световоде со смещенной дисперсией в диапазоне 1.0-1.1 мкм, который предварительно растягивался до длительности ~2 пс, увеличивалась в двухкаскадном усилителе на основе активных волокон, допированных иттербием. Первый каскад усиления (предусилитель) был выполнен на 30 сантиметровой отрезке одномодового иттербиевого волокна с диаметром моды 6 мкм и накачкой в сердцевину лазерным диодом мощностью 600 мВт. Автокорреляционные измерения показали, что длительность импульса после его сжатия в компрессоре на двух отражательных решетках составляла 85 фс при энергии 4 нДж.

Для демонстрации возможности дальнейшего увеличения мощности и энергии импульса к выходу предусилителя был пристыкован мощный усилитель, выполненный на 5 метрах иттербиевого волокна с двойной оболочкой и большим размером моды 14 мкм, накачиваемого многомодовым лазерным диодом. При максимальной мощности накачки выходной спектр заметно искажался (рис. 9), а на АКФ скомпрессированного импульса появлялся протяженный пьедестал. При этом центральная часть импульса могла быть сжата до длительности в диапазоне 130-180 фс при различных настройках компрессора. Максимальная мощность сигнала после компрессора составила 4.8 Вт, что соответствует энергии импульса 100 нДж.

В **Заключении** сформулированы результаты, полученные в настоящей работе.

Основные результаты диссертации

1. Показано, что совместное действие эффектов адиабатического сжатия солитона в световоде с уменьшающейся по длине аномальной дисперсией (DDF) и вынужденного рамановского рассеяния позволяет с высокой эффективностью осуществлять плавную перестройку центральной длины волны солитонного импульса в широком диапазоне. На основе световода DDF создана компактная полностью волоконная лазерная система, позволяющая ге-

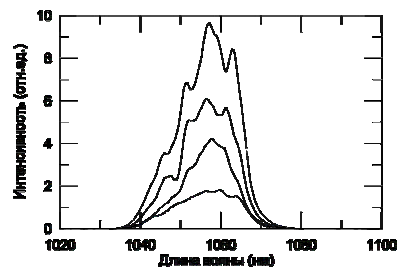


Рис. 9. Спектры сигнала после мощного усилителя при различных уровнях выходной мощности.

нерировать солитонные импульсы длительностью менее 50 фс, плавно перестраиваемые в диапазоне длин волн 1.6-2.2 мкм.

2. Обнаружено и исследовано численно и аналитически семейство перестраиваемых по частоте квазисолитонов, распространяющихся в световоде с плавно уменьшающейся по длине аномальной дисперсией. Показано, что длительность и частотная отстройка квазисолитона от точки нулевой дисперсии уменьшаются при уменьшении энергии импульса, получены ограничения на минимальную длительность и энергию квазисолитона. Исследованы сценарии эволюции ультракоротких импульсов в DDF и выявлены условия формирования квазисолитонов. Основные свойства квазисолитонов и соотношения их параметров находятся в хорошем соответствии с экспериментальными результатами.

3. Предложена и экспериментально реализована новая схема создания оптических импульсов предельно короткой длительности с плавно перестраиваемой длиной волны на основе полностью волоконной эрбиевой системы, включающая три этапа последовательного преобразования оптического сигнала: перестройку частоты солитонного импульса в DDF, уширение спектра при генерации суперконтинуума в сильнонелинейном кварцевом волокне с нормальной дисперсией и последующую компрессию импульса в линейном световоде. Экспериментально продемонстрирована генерация суперконтинуума, перестраиваемого в диапазоне длин волн 1.7-2.0 мкм и сжатие импульса до длительности 24.5 фс на центральной длине волны 1.85 мкм, что соответствует четырем периодам оптических колебаний. Продemonстрировано соответствие спектра и формы импульса, полученных в эксперименте, с результатами численных расчетов на основе обобщенного нелинейного уравнения Шредингера и однонаправленного волнового уравнения.

4. Предложена новая схема построения полностью волоконного источника синхронизированных фемтосекундных импульсов на двух сильно различающихся длинах волн в ближнем ИК диапазоне на основе эрбиевого задающего лазера и кварцевого световода со смещенной дисперсией (DSF). Схема основана на эффектах сверхуширения спектра и синхронного взаимодействия цуга коротковолновых дисперсионных волн и длинноволнового солитона, расположенных по разные стороны от длины волны нулевой дисперсии в нелинейном световоде со смещенной дисперсией.

5. Построена полностью волоконная эрбиево-иттербиевая система реализующая генерацию синхронизированных импульсов на длинах волн около 1 мкм и 1.6-1.8 мкм. Экспериментально получена генерация импульсов длительностью 55 фс на длине волны 1.06 мкм, синхронизированных с исходными импульсами эрбиевого задающего осциллятора. Продemonстрировано усиление коротковолновых импульсов в иттербиевом волоконном усилителе до энергии 4 нДж при длительности 85 фс, и до энергии 100 нДж при длительности менее 180 фс.

Литература

1. Fermann M.E., Galvanauskas A., Sucha G. Ultrafast lasers: Technology and applications. CRC Press, 2003. 800 pp. ISBN: 0824743490.
2. Chernikov S., Dianov E., Richardson D., Payne D. Soliton pulse compression in dispersion-decreasing fiber // Optics Letters. 1993. Vol. 18, no. 7. Pp. 476–478.
3. Pelusi M., Liu H. Higher order soliton pulse compression in dispersion-decreasing optical fibers // IEEE Journal of Quantum Electronics 2002. Vol. 33, no. 8. Pp. 1430–1439.
4. Tamura K., Nakazawa M. 54-fs, 10-GHz soliton generation from a polarization-maintaining dispersion-flattened dispersion-decreasing fiber pulse compressor // Optics Letters. 2001. Vol. 26, no. 11. Pp. 762–764.
5. Mori K., Takara H., Kawanishi S. et al. Flatly broadened supercontinuum spectrum generated in a dispersion decreasing fibre with convex dispersion profile // Electronics Letters. 2002. Vol. 33, no. 21. Pp. 1806–1808.
6. Okuno T., Onishi M., Nishimura M. Generation of ultra-broad-band supercontinuum by dispersion-flattened and decreasing fiber // Photonics Technology Letters, IEEE. 2002. Vol. 10, no. 1. Pp. 72–74.
7. Wegener M. Extreme nonlinear optics: an introduction. Springer Verlag, 2005. ISBN: 354022291X.
8. Brabec T., Krausz F. Intense few-cycle laser fields: Frontiers of nonlinear optics // Reviews of Modern Physics. 2000. Vol. 72, no. 2. Pp. 545–591.
9. Igarashi K., Saito S., Nagai H. et al. Investigation on Sub-20 fs Fiber-soliton Compression Performance of Dispersion-Flattened Fibers // Japanese Journal of Applied Physics. 2004. Vol. 43, no. 1. Pp. 132–136.
10. Hori T., Nishizawa N., Goto T. Generation of 14-fs ultrashort pulse in all fiber scheme by use of highly nonlinear hybrid fiber // Ultrafast Phenomena XIV / Ed. by T. Kobayashi, T. Okada, T. Kobayashi et al. Springer Berlin Heidelberg. Vol. 79 of Springer Series in Chemical Physics. Pp. 31–33.
11. Sell A., Krauss G., Scheu R. et al. 8-fs pulses from a compact Er: fiber system: quantitative modeling and experimental implementation // Optics Express. 2009. Vol. 17, no. 2. Pp. 1070–1077.
12. Krauss G., Lohss S., Hanke T. et al. Synthesis of a single cycle of light with compact erbium-doped fibre technology // Nature Photonics. 2009. Vol. 4, no. 1. Pp. 33–36.
13. Träutlein D., Adler F., Moutzouris K. et al. Highly versatile confocal microscopy system based on a tunable femtosecond Er: fiber source // Journal of Biophotonics. 2008. Vol. 1, no. 1. Pp. 53–61.
14. Sell A., Scheu R., Leitenstorfer A., Huber R. Field-resolved detection of phase-locked infrared transients from a compact Er: fiber system tunable between 55 and 107 THz // Applied Physics Letters. 2008. Vol. 93. P. 251107.

15. Takayanagi J., Kanamori S., Suizu K. et al. Generation and detection of broadband coherent terahertz radiation using 17-fs ultrashort pulse fiber laser // Optics Express. 2008. Vol. 16, no. 17. Pp. 12859 – 12865.

16. Hanke T., Krauss G., Träutlein D. et al. Efficient nonlinear light emission of single gold optical antennas driven by few-cycle near-infrared pulses. // Physical Review Letters. 2009. Vol. 103, no. 25. P. 257404.

17. Fermann M., Hartl I. Ultrafast fiber laser technology // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 2009. Vol. 15. Pp. 191–206.

18. J. Bouillet, Y.Zaouter, J.Limpert, S. Petit. et al. High-order harmonic generation at a megahertz-level repetition rate directly driven by an ytterbium-doped-fiber chirped-pulse amplification system // Optics Letters. 2009. Vol. 34. Pp. 1489-1491.

19. Агравал Г. П. Нелинейная волоконная оптика: Перевод с англ. С. В. Черникова и др., Под ред. П. В. Мамышева. М.: Мир, 1996. 323 с.

20. Naganuma K., Mogi K., Yamada H. General method for ultrashort light pulse chirp measurement // IEEE Journal of Quantum Electronics. 2002. Vol. 25, no. 6. Pp. 1225–1233.

21. Akhmediev N., Karlsson M. Cherenkov radiation emitted by solitons in optical fibers // Phys. Rev. A. 1995. Vol. 51. Pp. 2602–2607.

22. Austin D., de Sterke C., Eggleton B., Brown T. Dispersive wave blue-shift in supercontinuum generation // Opt. Express. 2006. Vol. 14. Pp. 11997–12007.

Основные публикации автора по теме диссертации:

1*. А.В. Андрианов, А.В. Ким, С.В. Муравьев, А.А. Сысолятин. Генерация плавно перестраиваемых в широком частотном диапазоне оптических солитонных импульсов в кварцевых световодах с переменной дисперсией // Письма в ЖЭТФ. 2007. Т.85, №8. С.446–451.

2*. A.V. Andrianov, A.V. Kim, S.V. Muraviov, A.A. Sysoliatin. DDF based all-fiber optical source of femtosecond pulses smoothly tuned in the telecommunication range // Laser Physics. 2007. V. 11, N17. P.1296-1302.

3*. A.V.Andrianov, A.V.Kim, S.V.Muraviov, A.A. Sysoliatin, Wavelength-tunable few-cycle optical pulses directly from an all fiber Er-doped laser setup // Optics Letters. 2009, Vol.34, No.20, pp.3193-3195

4*. A.V.Andrianov, A.V.Kim, S.V.Muraviov, A.A. Sysoliatin, Widely wavelength-tunable few-cycle optical pulse generation from an all-fiber erbium-doped laser system //Laser Physics. 2009, Vol.19, No. 10, pp. 1-5.

5*. Andrianov A., Anashkina E., Muravyev S., Kim A. All-fiber design of hybrid Er-doped laser/Yb-doped amplifier system for high-power ultrashort pulse generation // Optics Letters. 2010. Vol. 35, no. 22. Pp. 3805–3807.

6*. 6. A.V. Andrianov, A.V. Kim, S.V. Muraviov, A.A. Sysoliatin. Generation of widely tunable optical solitons in the infrared range by using dispersion decreasing fibers // Proc. SPIE. 2007. V.6729, pp.67290X-1-8.

7*. A.V. Andrianov, A.V. Kim, S.V. Muraviov, V.F.Khopin, A.A. Sysoliatin. Widely tunable femtosecond fiber laser//Proc. SPIE. 2008. V.6873, pp.68730T-1-9.

8*. A.V.Andrianov, A.V.Kim, S.V.Muraviov, A.A. Sysoliatin, Widely Wavelength-tunable Soliton Generation and Few-cycle Pulse Compression with the Use of Dispersion-decreasing Fiber // PIERS Online. 2009, Vol. 5 No. 5, pp.421-425.

9*. Андрианов А.В., Ким А.В., Муравьев С.В., Сысолятин А.А. Генерация широкоперестраиваемых оптических солитонов в инфракрасном диапазоне при использовании световодов с переменной дисперсией // Российский семинар по волоконным лазерам, Новосибирск, 4–6 апреля 2007 г.

10*. А.В. Андрианов, А.В. Ким, С.В. Муравьев, А.А. Сысолятин, Волоконный источник фемтосекундных импульсов, перестраиваемый в диапазоне длин волн 1.5-2.1 мкм // Всероссийская конференция по волоконной оптике, Пермь, 10-12 октября, 2007, доклад № В-8.

11*. Muraviov S.V., Andrianov A.V., Kim A.V., and Sysoliatin A.A. Generation of widely tunable optical solitons in the infrared range by using dispersion decreasing fibers // International Conference on Coherent and Nonlinear Optics / International Conference on Lasers, Applications, and Technologies (ICONO/LAT 2007). Минск, Беларусь, 28 мая – 1 июня 2007 г.

12*. A.A. Sysoliatin, V.F.Khopin, A.V. Andrianov, A.V. Kim, S.V. Muraviov, Widely tunable femtosecond fiber laser // Photonics West 2008, 19-24 January 2008, San Jose, California USA, p.146, paper 6873-28.

13*. A.V. Andrianov, A.V. Kim, S.V. Muraviov, A.A. Sysoliatin, Generation of widely tunable optical solitons in the infrared range by using dispersion decreasing fibers // CLEO/Europe-IQEC 2007, Munich, Germany, p.75, paper CJ-14-TUE.

14*. A.V. Andrianov, A.V. Kim, S.V. Muraviev, A.A. Sysoliatin, Widely Tunable Ultrashort Pulses from a Totally Fiber Integrated Optical Source Using DDF //XIII-th Conf. on Laser Optics, St. Petersburg, June 22–28, 2008, paper FrR5-p09.

15*. A.V. Andrianov, S.V. Muravyev, A.V. Kim, U. G. Akhmetshin, V. A. Bogatyryov, V.M. Mashinsky, Generation of ultrashort optical pulse tuned down to 2.4 μm using GeO_2 -based core fiber // 4th International Symposium on High-Power Fiber Lasers and Their Applications, St. Petersburg, June 24–26, 2006, p. 3.

16*. A.V. Andrianov, S.V. Muraviev, A.V. Kim, and A.A. Sysoliatin, Widely Wavelength-tunable Soliton Generation and Few-cycle Pulse Compression with the Use of Dispersion-decreasing Fiber // Progress In Electromagnetics Research Symposium, p. 51, Moscow, Russia, 18-21 August 2009.

17*. A. Andrianov, S. Muraviev, A. Kim, and A. Sysoliatin, Wavelength-tunable Few-cycle Optical Pulse Generation from an All-fiber Erbium-doped Laser System // CLEO/Europe-EQEC 2009, invited CD10.1, Munich, Germany, 2009.

18*. Андрианов А.В., Муравьев С.В., Ким А.В., Полностью волоконный источник предельно коротких лазерных импульсов, перестраиваемых по длине волны в среднем инфракрасном диапазоне // IX Международный симпозиум по фотонному эхо и когерентной спектроскопии (ФЭКС'2009), Казань, Россия, 26-31 октября 2009 г.

АНДРИАНОВ Алексей Вячеславович

**ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ УЛЬТРАКОРОТКИХ
ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ, ПЕРЕСТРАИВАЕМЫХ В БЛИЖНЕМ
ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ**

А в т о р е ф е р а т

Ответственный за выпуск
А.В. Андрианов

Подписано к печати . 2011 г.
Формат 60×90 ¹/₁₆. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № (2011).

Отпечатано в типографии Института прикладной физики РАН,
603950 г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46