

Эрбиевый волоконный лазер ультракоротких импульсов с использованием насыщающегося поглотителя на основе одностенных углеродных нанотрубок, синтезированных методом дугового разряда

А.В.Таусенев, Е.Д.Образцова, А.С.Лобач, В.И.Конов,
А.В.Конященко, П.Г.Крюков, Е.М.Дианов

Впервые создан и исследован эрбиевый волоконный лазер, работающий в режиме самосинхронизации мод, осуществляемом с помощью насыщающегося поглотителя на основе синтезированных методом дугового разряда одностенных углеродных нанотрубок. Благодаря разработке оригинальной методики изготовления образцов удалось получить плёнки оптического качества, содержащие индивидуальные одностенные углеродные нанотрубки. Исследование зависимости резонансного (на длине волны 1.5 мкм) поглощения от интенсивности лазерного излучения, проходящего через плёнку, показало, что эти плёнки обладают нелинейным пропусканием и могут быть использованы в волоконных лазерах в качестве насыщающегося поглотителя, способного обеспечить режим самосинхронизации мод. В кольцевой схеме лазера получена стабильная генерация фурье-ограниченных импульсов, имеющих форму оптических солитонов, на длине волны 1557.5 нм. Длительность импульсов составляла 1.13 пс при частоте их следования 20.5 МГц. Непрерывная выходная мощность достигала 1.1 мВт при накачке излучением лазерного диода мощностью 25 мВт на длине волны 980 нм.

Ключевые слова: одностенные углеродные нанотрубки, ультракороткие импульсы, волоконный лазер, насыщающийся поглотитель.

1. Введение

Волоконные иттербиевые и эрбиевые лазеры, работающие в непрерывном режиме и генерирующие ультракороткие импульсы, широко применяются в современной квантовой электронике.

Преимуществами этих лазеров по сравнению с традиционными лазерами, в которых используются объёмные кристаллы и стёкла, являются высокая эффективность, существенно меньшие мощности источников накачки (десятки милливатт по сравнению с несколькими ваттами), более простая конструкция, низкая стоимость, компактность и удобство в эксплуатации. Известно, что самые короткие импульсы лазерного излучения получаются в режиме самосинхронизации мод. Для осуществления этого режима в резонатор лазера, способного работать с большим числом продольных мод (т. е. имеющего

большую ширину полосы усиления активной среды), вводится специальный элемент, который может производить амплитудную самомодуляцию излучения. Важно, чтобы пропускание этого элемента достаточно точно следовало за изменением интенсивности проходящего через него лазерного излучения. Иными словами, этот элемент должен быть достаточно быстрым просветляющимся поглотителем. Поскольку с режимом самосинхронизации мод конкурирует обычная многомодовая генерация, его осуществление требует выполнения жёстких условий. В частности необходим стабильный режим накачки активной среды. По этой причине в лазерах, работающих в непрерывном режиме самосинхронизации мод, используются лазерные источники накачки, которые в настоящее время, как правило, реализуются на основе полупроводниковых диодных лазеров.

Для практической реализации элемента, обладающего нелинейным пропусканием (насыщающийся поглотитель) и способного осуществлять режим самосинхронизации мод, существуют два подхода. В первом из них используется эффект изменения показателя преломления прозрачных материалов в зависимости от интенсивности излучения, являющийся следствием изменения электронной поляризуемости (с фемтосекундным быстродействием). Этим эффектом обусловлены самофокусировка и нелинейное двулучепреломление. В твердотельных лазерах с объёмными элементами для самосинхронизации мод используется самофокусировка (керровская линза) [1], в волоконных лазерах – эффект нелинейного поворота эллипса двулучепреломления [2–4].

Второй подход основан на использовании насыщаю-

А.В.Таусенев. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53

Е.Д.Образцова, В.И.Конов. Центр естественно-научных исследований Института общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: elobr@kapella.gpi.ru

А.С.Лобач. Институт проблем химической физики РАН, Россия, 142432 Черноголовка, Московская обл.

А.В.Конященко. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Ленинский просп. 53; ООО «Авеста-Проект», Московская обл., 142190 Троицк, ул. Солнечная, 12

П.Г.Крюков, Е.М.Дианов. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38

Поступила в редакцию 25 декабря 2006 г., после окончательного оформления – 2 июля 2007 г.

щихся поглотителей – веществ, способных просветляться под действием лазерного излучения, к которым относятся, например, полупроводниковые материалы. Широкое распространение для пассивной синхронизации мод получило устройство типа SESAM (semiconductor saturated absorption mirror – полупроводниковое зеркало с насыщающимся поглотителем) [5, 6]. Технология изготовления таких полупроводниковых устройств достаточно сложна, а кроме того, зеркало SESAM может быть использовано только в резонаторах типа Фабри–Перо, тогда как часто требуются и кольцевые резонаторы. В связи с этим поиск новых элементов для пассивной синхронизации мод, основанных на насыщающемся поглощении, является актуальной задачей.

Принципиально новый подход к решению этой задачи может быть разработан при использовании одностенных углеродных нанотрубок (ОУН). Исследования трех последних лет показали, что некоторые типы ОУН и сред на их основе обладают свойствами, позволяющими использовать их в качестве элемента непрерывных волоконных лазеров УКИ [7–10]. В настоящей работе приведены результаты исследований, направленных на разработку оригинальной методики получения нового типа элементов, пригодных для создания волоконных лазеров УКИ – полимерных пленок, включающих синтезированные методом дугового разряда ОУН.

Одностенные углеродные нанотрубки – это новый наноструктурированный материал, обладающий многими интересными свойствами, которые лежат в основе его использования в нанoeлектронике, вакуумной электронике, газовом анализе, а также при создании новых конструкционных материалов. ОУН представляют собой монослойные бесшовные цилиндры диаметром от 0.6 до 2.0 нм и длиной от 1 до 20 мкм, условно свернутые из полосы гексагональной графитовой сетки [11]. Геометрия соответствующей нанотрубки (ее диаметр и спиральность) определяется шириной такой полосы и способом ее сворачивания.

В настоящее время разработано несколько методов синтеза ОУН [12]. Наиболее распространенными из них, обеспечивающими выход ОУН-фракции от единиц до десятков граммов, являются дуговой синтез, лазерная абляция, каталитическое разложение газа СО при высоком давлении (НірСО), каталитическое газофазное осаждение из паров спирта. Каждый из методов обеспечивает свои значения среднего диаметра синтезированных нанотрубок и ширины их распределения по диаметру. Согласно данным [12, 13], нанотрубки, синтезированные методом дугового синтеза (при температурах более 3500 °С), обладают самой низкой дефектностью и малым разбросом диаметров.

Уникальным свойством ОУН является изменение плотности электронных состояний в них при изменении их геометрических параметров [11, 14, 15]. В зависимости от диаметра нанотрубка может обладать металлическими или полупроводниковыми свойствами, причем ширина запрещенной зоны полупроводников также зависит от диаметра. Металлические свойства обуславливают поглощение в широком диапазоне длин волн, а полупроводниковые дают основания полагать, что ОУН могут использоваться там, где находят применение полупроводниковые материалы. Возможность варьирования ширины запрещенной зоны при изменении геометрических параметров отдельных нанотрубок наряду с малыми

временами релаксации электронных возбуждений (пико- и фемтосекундного диапазонов) [16] обусловила интерес к нанотрубкам как к оптическому материалу, обладающему свойствами просветляющихся поглотителей.

Однако на протяжении нескольких лет качество образцов ОУН оставалось недостаточно высоким для проведения оптических исследований. Только благодаря разработанным в последние два-три года технологиям [17, 18] были получены экспериментальные результаты, демонстрирующие перспективы использования этого материала в оптике и оптоэлектронике.

Одним из наиболее эффективных подходов к формированию сред оптического качества, содержащих ОУН, является суспендирование нанотрубчатой сажи в водном растворе поверхностно-активного вещества (ПАВ) [17–19]. Суспензия, получаемая при мощной (100–200 Вт) ультразвуковой обработке, содержит легкую фракцию – одиночные нанотрубки, и более тяжелые фракции – фрагменты сохранившихся пучков нанотрубок, частицы катализаторов и кластеры аморфного углерода, являющиеся сопутствующими продуктами при синтезе углеродных нанотрубок. Фракции разделяются посредством ультрацентрифугирования с ускорением более 150000 g. Такая обработка одновременно может рассматриваться и как очистка материала. Работа с индивидуальными полупроводниковыми нанотрубками является принципиальным требованием при оптических исследованиях, поскольку пучки содержат также и металлические нанотрубки, обеспечивающие безызлучательный канал релаксации электронного возбуждения. Основным критерием успешной дезинтеграции пучков в суспензии является появление в спектре поглощения узких пиков, соответствующих нанотрубкам определенной геометрии, вместо широких полос, соответствующих поглощению всего ансамбля нанотрубок, присутствующих в материале [17–19].

Метод суспендирования применялся нами ранее для приготовления оптических сред на основе НірСО-нанотрубок. Полученные жидкие среды были впервые успешно использованы как насыщающиеся поглотители для осуществления самосинхронизации мод в различных импульсных твердотельных лазерах с рабочими длинами волн от 1.06 до 1.56 мкм [20–22]. Однако насыщающиеся поглотители в виде жидкостей не являются оптимальными для создания современных лазерных схем. Более подходят для этого, особенно в случае волоконных лазеров, образцы в виде тонких (10–12 мкм) плёнок, позволяющих интегрировать их в компактные, полностью твердотельные схемы. В данной работе сообщаются результаты исследований волоконного Er³⁺-лазера, в котором для синхронизации мод использовалась полученная по оригинальной технологии полимерная пленка оптического качества с гомогенно распределенными в ней одиночными ОУН.

2. Технология изготовления образцов

Для создания полимерных нелинейно-оптических элементов с углеродными нанотрубками был использован и развит подход, примененный нами ранее для создания жидких нелинейно-оптических сред [20–22]. Полученная суспензия из одиночных гомогенно распределенных ОУН в водно-мицеллярном растворе анионного ПАВ натриевой соли додецилбензолсульфоновой кислоты (C₁₂H₂₅C₆H₄SO₃Na, Aldrich) служила растворите-

лем для водорастворимого полимера – поливинилового спирта (ПВС, средняя молекулярная масса 89000 – 98000, степень гидролиза 99 %, Aldrich). Весовые концентрации ПАВ и ПВС в D_2O составляли соответственно 1 % и 10 %. Как и при формировании жидких нелинейно-оптических сред [17], первоначальной причиной использования тяжелой воды (вместо H_2O) была необходимость исключения потерь из-за поглощения в области рабочей длины волны Er^{3+} -лазера (1.56 мкм), близкой к полосе поглощения обычной воды. Пленки формировались методом полива раствора полимера на неподвижную подложку с последующим медленным высушиванием в термостате. Было обнаружено, что в спектрах оптического поглощения высушенных пленок растворителя практически отсутствуют. Тем не менее использование тяжелой воды осталось предпочтительным, поскольку в этом случае достигался большой градиент плотности между нанотрубками и растворителем, обеспечивающий более эффективное разделение фракций при центрифугировании.

В качестве рабочей среды были выбраны ОУН, синтезированные нами дуговым методом в атмосфере гелия с использованием катализатора – смеси равных по весу фракций Ni и Y_2O_3 [13, 18]. Контроль характеристик ОУН на всех этапах приготовления пленок проводился методами комбинационного рассеяния (КР) света и оптического поглощения света в широком спектральном диапазоне (УФ – видимый – ближний ИК).

Оказалось, что спектры КР синтезированного неочищенного порошка нанотрубок (рис.1), водной суспензии и полимерных пленок, включающих нанотрубки, мало отличаются друг от друга и демонстрируют характерные признаки, соответствующие ОУН: расщепление тангенциальной полосы вблизи 1592 см^{-1} и набор «дыхательных» мод с частотами вблизи 167 см^{-1} . По положению «дыхательных» мод [18] был оценен средний диаметр нанотрубок, составивший 1.49 нм.

Для исходной сажи, обладавшей оптической плотностью более шести, спектры оптического поглощения зарегистрировать не удалось. Для водных суспензий и полученных на их основе пленок оптическая плотность в спектральном диапазоне 400–1900 нм составляла 0.8–2.0. Спектры оптического поглощения суспензий и пленок фактически совпадали и состояли из наборов узких

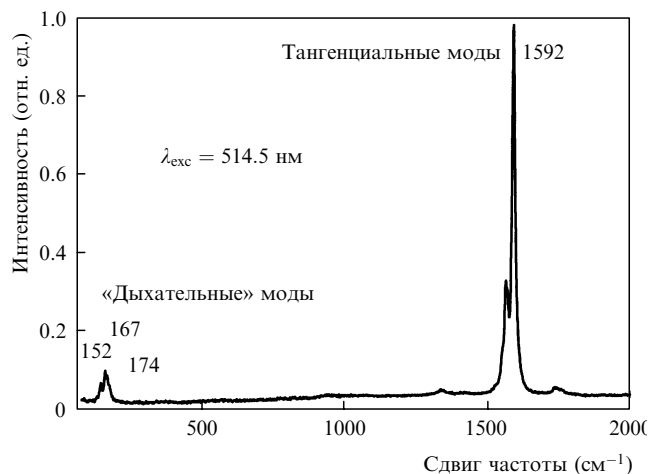


Рис.1. Спектр КР неочищенных ОУН, синтезированных методом дугового разряда. Для возбуждения КР использовалось излучение аргонового лазера с длиной волны $\lambda_{exc} = 514.5\text{ нм}$. Цифрами указаны характерные частоты мод КР для нанотрубок различной геометрии.

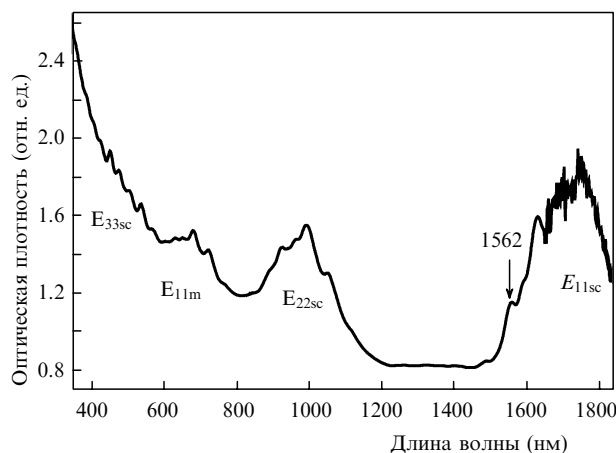


Рис.2. Спектр оптического поглощения полимерной пленки (ПВС) толщиной 12 мкм, содержащей гомогенно распределенные индивидуальные ОУН, синтезированные методом дугового разряда. Стрелкой указана рабочая длина волны эрбиевого волоконного лазера, совпадающая с одним из максимумов поглощения полимерной пленки с нанотрубками.

пиков (с полушириной около 40 нм), соответствующих спектрам поглощения одиночных нанотрубок. Эти пики объединены в полосы E_{11sc} , E_{22sc} , E_{11m} , E_{33sc} ,..., ширины которых определялись шириной распределения нанотрубок по диаметру (рис.2), где E_{11sc} , E_{22sc} , E_{11m} , E_{33sc} ,... – энергетические зазоры между первыми, вторыми, третьими и т. д. симметричными сингулярностями ван Хова в плотности электронных состояний полупроводниковых (sc) и металлических (m) нанотрубок. По положению центров полос был оценен средний диаметр нанотрубок [23]. Полученное значение (1.44–1.49 нм) хорошо согласовывалось с оценкой, сделанной по спектрам КР. Четкое разделение полос E_{11} , E_{22} , E_{33} ,... подтвердило, что дуговой метод обеспечивает синтез материала с достаточно малым разбросом диаметров нанотрубок (1.2–1.7 нм).

Выбор для наших экспериментов ОУН, синтезированных дуговым методом, был обусловлен несколькими причинами. Во-первых, положение одного из пиков в полосе E_{11sc} спектра поглощения дуговых нанотрубок было близко к рабочей длине волны волоконного Er^{3+} -лазера (1.57 мкм) (см. рис.2). Во-вторых, согласно литературным и нашим собственным данным [13, 18, 19], дуговые нанотрубки, синтезированные при высоких температурах ($\sim 3500\text{ }^\circ\text{C}$), обладают более низкой степенью дефектности и меньшим разбросом диаметров по сравнению с ОУН, синтезированными другими методами. В-третьих, насколько нам известно, насыщающиеся поглотители на дуговых нанотрубках еще никем не были реализованы.

3. Исследование насыщающегося поглощения

Исследование насыщающегося поглощения осуществлялось методом z-сканирования на установке, схема которой представлена на рис.3. Источником излучения служил фемтосекундный волоконный Er^{3+} -лазер (Авеста-Проект, модель EFO-150, длительность импульсов 100 фс, частота следования 70 МГц, средняя мощность 10 мВт). Пучок излучения фокусировался с помощью линзы (ахроматический дублет) с фокусным расстоянием 20 мм. Прошедшее излучение снова коллимировалось в параллельный пучок с помощью другой линзы с фокусным расстоянием 30 мм и регистрировалось широкоапертурным

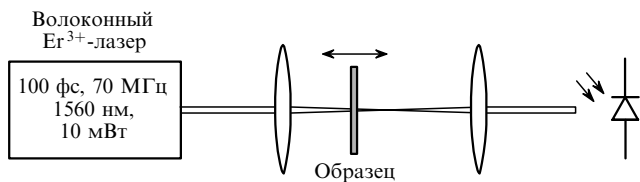


Рис.3. Схема установки для измерения насыщающегося поглощения методом z-сканирования.

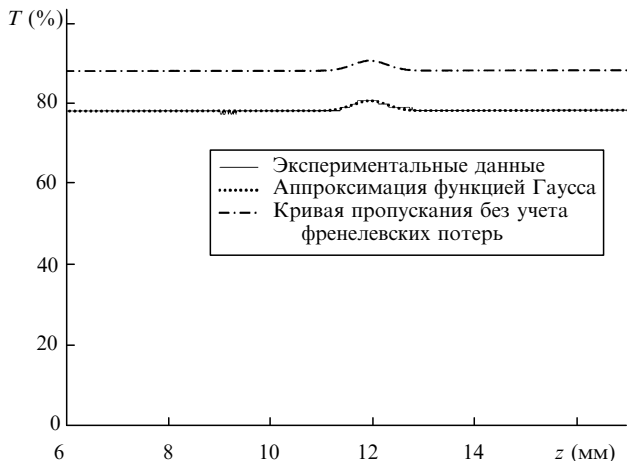


Рис.4. Коэффициент пропускания пленки, содержащей ОУН, в зависимости от ее положения относительно перетяжки лазерного пучка (см. рис.3).

германиевым фотодиодом. Исследуемый образец помещался в перетяжку лазерного пучка, так что поверхность пленки была перпендикулярна оси z, совпадающей с направлением распространения лазерного пучка, и контролируемо перемещался вдоль неё. Таким образом, при перемещении образца плотность мощности пучка в нем изменялась, что позволяло получать зависимость коэффициента пропускания образца от плотности мощности пучка, фактически измеряя его зависимость от координаты z. Пример такой зависимости представлен на рис.4.

С помощью этой методики был отобран образец, коэффициент пропускания которого при низкой интенсивности лазерного пучка составлял ~78 %, а при максимальной интенсивности увеличивался на 2.6 % (за счет насыщения поглощения). При этом расчётная плотность энергии насыщения E_{sat} составляла около 50 мкДж/см². Поскольку потери за счёт френелевского отражения равны ~10 %, при соответствующем просветлении плёнки начальное пропускание могло бы составить ~88 %.

4. Кольцевой волоконный лазер с пассивной синхронизацией мод

Для использования в лазерной схеме был изготовлен насыщающийся поглотитель, в состав которого входят нанотрубки. По устоявшейся терминологии [7, 8] такой элемент носит название SAINT (saturable absorber incorporating nanotubes). Элемент представлял собой полимерную плёнку с гомогенно распределёнными одиночными ОУН, зажатую между торцами одномодовых волоконных световодов (рис.5). Для предотвращения паразитных отражений, которые могут срывать режим самосинхронизации мод, торцы световодов были срезаны под углом ~7°. Элемент изготовлен на базе стандарт-

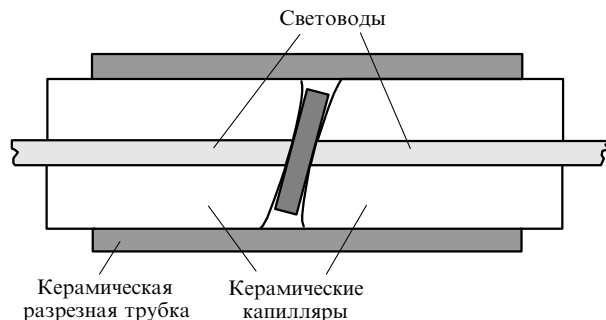


Рис.5. Схема модуля, включающего в себя насыщающийся поглотитель с углеродными нанотрубками (SAINT).

ного FC/APC-разъёма.

В экспериментальной установке использовалась кольцевая схема волоконного лазера (рис.6). Активной средой являлось Er³⁺-волокно длиной 1.25 м, которое накачивалось через ответвитель (WDM) излучением диодного лазера на длине волны 980 нм в направлении распространения лазерного излучения по кольцу. Для обеспечения однонаправленного режима генерации и минимизации поляризационно-модовой дисперсии в схему помещался двухкаскадный поляризационно-независимый изолятор с поляризационно-модовой дисперсией менее 100 фс. Излучение, выходящее из активного световода, проходило через второй ответвитель, в котором оно делилось в отношении 50/50. Для получения отрицательной дисперсии групповых скоростей, нужной для формирования импульсов в форме солитонов, в резонатор вводилось волокно SMF-28 длиной 8.5 м. Отдельные части кольцевой схемы располагались таким образом, чтобы поддержать за счёт снижения мощности на насыщающемся поглотителе распространение импульса в резонаторе в виде солитона с повышенной энергией.

При мощности накачки 13 мВт лазер запускался в режиме синхронизации мод с заметной нестабильностью, обусловленной режимом модуляции добротности. При повышении мощности накачки до 25 мВт лазер переходил в стабильный режим генерации в режиме синхронизации мод с одиночным импульсом за период обхода резонатора, частота следования импульсов составляла 20.5 МГц. На рис.7 показана осциллограмма выходного излучения, зарегистрированная с помощью фотоприем-

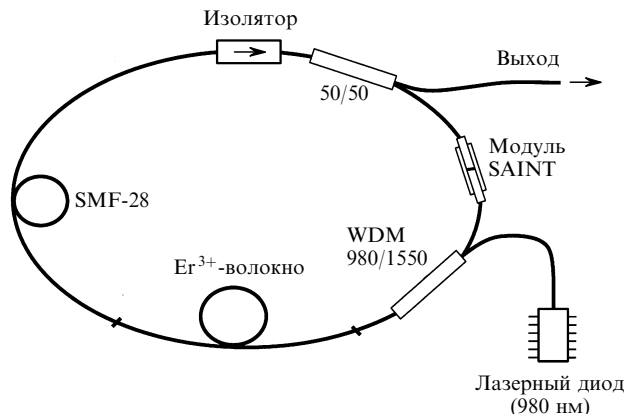


Рис.6. Схема волоконного лазера с кольцевой схемой резонатора: WDM 980/1550 – спектрально-селективный ответвитель; 50/50 – делитель мощности на длине волны 1550 нм; SMF-28 – одномодовый световод с диаметром поля моды ~10 мкм и дисперсией групповых скоростей $\beta^2 = -0.022$ пс²/м.

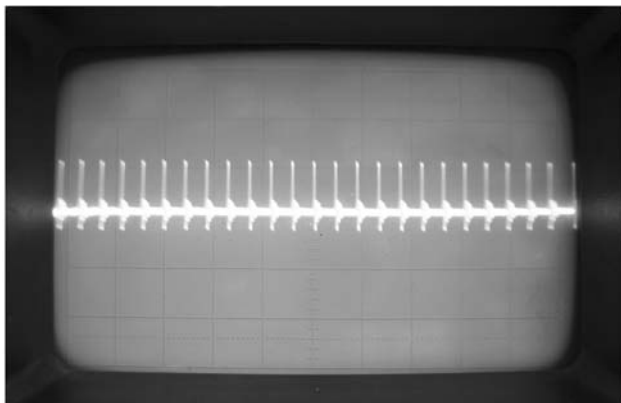


Рис.7. Цуг импульсов выходного излучения, генерируемый волоконным лазером с модулем SAINT. Развёртка осциллографа 100 нс/дел.

ника, имеющего временное разрешение ~ 2.5 нс. При работе лазера в режиме с одиночным импульсом за период обхода резонатора средняя выходная мощность была равна 1.1 мВт. Увеличение мощности накачки приводило к переходу лазера в многоимпульсный режим генерации.

Выходной спектр излучения показан на рис.8. Его форма хорошо аппроксимируется функцией sech^2x с шириной 2.247 нм на половине высоты. Автокорреляционная функция интенсивности выходных импульсов показана на рис.9. Она также хорошо аппроксимируется функцией sech^2x , что подтверждает солитонный режим генерации. Полная ширина на полувысоте корреляционной функции была равна ~ 1.75 пс, что соответствует длительности импульса 1.13 пс. Рассчитанная на основании этих измерений величина $\Delta\tau\Delta\nu = 0.315$ (здесь $\Delta\tau$ – длительность импульса, $\Delta\nu$ – ширина спектра). Теоретическая величина для импульсов с огибающей в виде sech^2x составляет 0.3148. Это даёт основания утверждать, что созданный нами лазер работает в режиме генерации спектрально-ограниченных импульсов в форме солитонов.

При удалении SAINT из резонатора импульсный режим генерации не наблюдался вплоть до мощности накачки около 100 мВт. Отметим, что ранее исследованный нами кольцевой лазер на эрбиевом волокне с самосин-

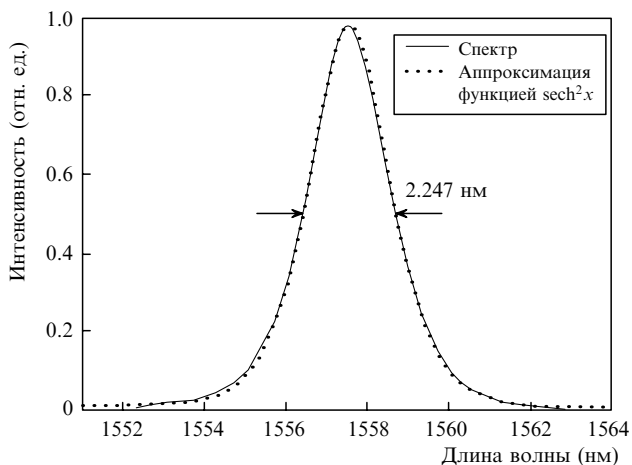


Рис.8. Спектр импульсов выходного излучения, генерируемых волоконным лазером с модулем SAINT (см. рис.6).

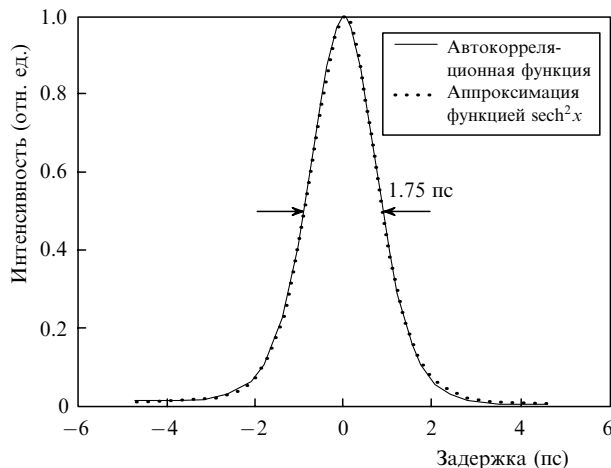


Рис.9. Автокорреляционная функция интенсивности выходных импульсов волоконного лазера с модулем SAINT (рис.6). Хорошая аппроксимация функцией sech^2x подтверждает солитонный режим генерации. Полная ширина корреляционной функции на половине высоты составляет ~ 1.75 пс, что соответствует длительности импульса 1.13 пс.

хронизацией мод за счёт нелинейного поворота эллипса двулучепреломления работал при мощности накачки 270 мВт [4]. Таким образом, SAINT в виде полимерной плёнки с гомогенно распределёнными ОУН обеспечивает механизм запуска и поддержания режима пассивной синхронизации мод с достаточно низким порогом.

5. Заключение

Впервые продемонстрирована работа лазера ультракоротких импульсов на эрбиевом волокне с использованием созданного по оригинальной методике насыщающегося поглотителя (SAINT) в виде полимерной плёнки с гомогенно распределёнными внутри нее одиночными ОУН, синтезированными методом дугового разряда. Разработанная методика обеспечивает довольно простой и дешёвый способ изготовления элемента, пригодного для интегрирования в схемы волоконных лазеров. Исследования показали, что такие плёнки имеют достаточно высокий порог повреждения. Схемы лазеров с использованием SAINT работают при низкой пороговой мощности накачки. Они компактны, обладают высокими эксплуатационными характеристиками (механическая стабильность и малая подверженность внешним воздействиям). Эти лазеры могут найти применение при исследовании быстропротекающих процессов, для контроля быстродействия оптоэлектронных устройств, в многофотонной микроскопии, для оптической передачи информации и др.

Разработанная технология получения оптических элементов с включением ОУН является новым шагом в развитии импульсных лазеров. Результаты проведенных исследований позволяют надеяться на дальнейшее усовершенствование характеристик и схем волоконных лазеров ультракоротких импульсов с использованием устройств, основанных на одностенных углеродных нанотрубках.

Работа поддержана грантами РФФИ № 04-02-17618, № 06-02-16999-а, № 06-02-08151-офи, грантом Президента РФ поддержки ведущих научных школ № НШ-2813.2006.2 и программой Президиума РАН «Фемтосекундная оптика и новые материалы».

1. Spence D.E., Kean P.N., Sibbett W. *Opt. Lett.*, **16**, 42 (1991).
2. Hofer M., Fermann M.E., Haberl F., Ober M.H., Schmidt A.J., *Opt. Lett.*, **16**, 502 (1991).
3. Tamura K., Haus H.A., Ippen E.P. *Electron. Lett.*, **28**, 2226 (1992).
4. Таусенев А.В., Крюков П.Г. *Квантовая электроника*, **34** (2), 106 (2004).
5. Keller U. et al. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **2**, 435 (1996).
6. Okhotnikov O., Grudinin A., Pessa M. *New J. Phys.*, **6**, 177 (2004).
7. Set S.Y., Yaguchi H., Tanaka Y., Yablonski M., Sakakibara Y., Rozhin A., Tokumoto M., Kataura H., Achiba Y., Kikuchi Y.K. *Book of Abstracts OFC'03* (USA, PDP44, 2003).
8. Yamashita S., Inoue Y., Maruyama S., Murakami Y., Yaguchi H., Yablonski M., Set S.Y. *Opt. Lett.*, **29**, 1581 (2004).
9. Rozhin A.G., Scardaci V., Wang F., Hennrich F., White I.H., Milne W.I., Ferrari A.C. *Phys. Stat. Sol. (b)*, **1–5**, 3551 (2006).
10. Schibli T.R., Minoshima K., Kataura H., Itoga E., Minami N., Kazaoui S., Miyashita K., Tokumoto M., Sakakibara Y. *Opt. Express*, **13**, 8025 (2005).
11. Dresselhaus M.S., Dresselhaus G., Avouris P. (Eds), in *Carbon Nanotubes: Synthesis, Structure, Properties and Applications* (Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2000).
12. Journet C., Bernier P. *Appl. Phys. A*, **67**, 1 (1998).
13. Obratsova E.D., Bonard J.-M., Kuznetsov V.L., Zaikovskii V.I., Pimenov S.M., Pozharov A.S., Terekhov S.V., Konov V.I., Obratsova A.N., Volkov A.P. *Nanostructured Mater.*, **12**, 567 (1999).
14. White C.T., Mintmire J.W. *J. Phys. Chem. B*, **109**, 52 (2005).
15. Осадчий А.В., Образцова Е.Д., Терехов С.В., Юров В.Ю. *Письма ЖЭТФ*, **77**, 479 (2003).
16. Ostojic G.N., Zaric S., Kono J., Strano M.S., Moore V.C., Hauge R.H., Smalley R.E. *Phys. Rev. Lett.*, **92**, 117402 (2004).
17. O'Connell M.J., Bachilo S.M., Huffman C.B., Moore V.C., Strano M.S., Haroz E.H., Rialon K.L., Boul P.J., Noon W.H., Ma C.K.J., Hauge R.H., R. Weisman R.B., Smalley R.E. *Science*, **297**, 593 (2002).
18. Obratsova E.D., Fujii M., Hayashi S., Lobach A.S., Vlasov I.I., Khomich A.V., Timoshenko V.Yu., Wenseleers W., Goovaerts E., in *Nanoengineered Nanofibrous Materials, NATO Science Ser. II: Mathematics, Physics and Chemistry*. Ed. by S.Guceri, Yu.Gogotsi, V.Kuznetsov (Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 2004, vol. 169, pp. 389–398).
19. Wenseleers W., Vlasov I.I., Goovaerts E., Obratsova E.D., Lobach A.S., Bouwen A. *Advanced Functional Mater.*, **14**, 1105 (2004).
20. Ильичев Н.Н., Образцова Е.Д., Гарнов С.В., Мосалева С.Е. *Квантовая электроника*, **34**, 572 (2004).
21. Ильичев Н.Н., Образцова Е.Д., Пашинин П.П., Конов В.И., Гарнов С.В. *Квантовая электроника*, **34**, 785 (2004).
22. Il'ichev N.N., Garnov S.V., Obratsova E.D. *AIP Conf. Proc., Subseries: Materials Physics and Applications* (Mellville, New York, 2005, Vol. 786, p. 611).
23. Weisman R.B., Bachilo S.M. *NanoLett.*, **3**, 1235 (2003).