

На правах рукописи



Понарина Мария Владимировна

**ПАССИВНАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ МОД СО СВЕРХВЫСОКОЙ ЧАСТОТОЙ
ПОВТОРЕНИЯ ИМПУЛЬСОВ В ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ВОЛНОВОДНЫХ
ЛАЗЕРАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАФЕНА**

01.04.21 – Лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук».

Научный руководитель:

Образцов Петр Александрович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ИОФ РАН

Официальные оппоненты:

Стариков Ростислав Сергеевич – доктор физико-математических наук, профессор Отделения лазерных и плазменных технологий офиса образовательных программ (412) / Института лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ

Морозов Вячеслав Борисович – кандидат физико-математических наук, доцент физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»

Защита диссертации состоится на заседании диссертационного совета Д 002.063.02 при ИОФ РАН по адресу: 119991, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38, корп. №1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИОФ РАН и на сайте <https://diss.gpi.ru/>.

Автореферат диссертации разослан

Ученый секретарь диссертационного совета

канд. физ.-мат. наук



Ушаков А.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования

В современном мире лазеры находят различные применения в таких областях науки и технологий, как спектроскопия [1], интерферометрия [2], медицина [3], голография [4], дистанционное зондирование [5], обработка материалов [6]. Лазеры могут работать в непрерывном режиме (CW), в котором интенсивность остается постоянной как функция времени, или в импульсном режиме, когда периодические импульсы света излучаются с длительностью от фемтосекунд – 10^{-15} с (метод синхронизации мод) до наносекунд – 10^{-9} с (режим модуляции добротности). За последние три десятилетия произошел значительный прогресс в лазерных системах, работающих в режиме синхронизации мод: в ближнем инфракрасном (ИК) спектральном диапазоне удалось получить лазерные импульсы с длительностью 4 фс [7]. Такие лазерные системы известны как лазеры ультракоротких импульсов (УКИ) и в настоящее время находят применение во многих областях, таких как телекоммуникации [8], измерение динамики химических реакций [9], микрообработка материалов [10], оптическая выборка [11] и метрология [12].

Импульсные лазеры можно разделить на категории по частоте повторения импульсов для применения в различных областях. На лазерах с частотой повторения импульсов кГц-МГц получают высокие энергии, что делает их привлекательными для таких приложений, как ускорение частиц, генерация ультрафиолетового излучения и физика плазмы. Частоты повторения импульсов порядка 100 МГц с фемтосекундной длительностью достигаются с помощью Ti: Sa лазеров и различных объемных лазерных систем, легированных ионами Yb, которые являются широко востребованными для большого количества технологических приложений, таких как оптическая метрология, оптическая когерентная томография и нелинейная микроскопия. Лазеры, генерирующие импульсы с частотой повторения превышающей 1 ГГц, применяются в таких областях, как телекоммуникации, нелинейная микроскопия, метрология оптических частот, генерация оптических сигналов произвольной формы и оптическая выборка. В нелинейной микроскопии было продемонстрировано, что проблема слабой интенсивности сигнала генерации гармоник, ограниченная возможностью фотоповреждения, может быть решена

путем увеличения частоты повторения импульсов источника света. В области оптической метрологии существует потребность в стабильных лазерах с высокой частотой повторения импульсов для точного измерения оптических частот.

Одним из способов получения импульсов с высокой частотой повторения является осуществление синхронизации мод в твердотельном лазере с коротким резонатором. Связь длины резонатора и частоты повторения импульсов определяется соотношением [13]: $\nu = c/2Ln$, где ν – частота повторения импульсов, c – скорость света в вакууме, n – показатель преломления среды, L – длина резонатора.

Для получения генерации коротких лазерных импульсов с максимально высокой энергией используется метод синхронизации мод – метод, с помощью которого удается связать фазы продольных мод в лазере и тем самым получить ультракороткие импульсы в диапазоне от пико- до фемтосекунд.

Известно два основных метода осуществления синхронизации мод в твердотельных лазерах: активная и пассивная. Для активной синхронизации мод часто используются акустооптические и электрооптические устройства, которые с помощью внешнего сигнала модулируют интенсивность излучения в резонаторе. Однако внедрение модулирующего устройства в резонатор увеличивает его габариты, что приводит к более низким частотам повторения импульсов. Для реализации метода пассивной синхронизации мод используются пассивные нелинейно-оптические элементы – насыщающиеся поглотители (НП), которые вызывают самомодуляцию света. Помимо этого, насыщающиеся поглотители могут модулировать потери в резонаторе намного быстрее, чем активный оптический затвор: чем короче становится импульс, тем быстрее модуляция потерь, при условии, что поглотитель имеет достаточно быстрое время релаксации.

В последние годы особое внимание привлекают насыщающиеся поглотители на основе наноматериалов. Наноматериалы – это материалы, свойства которых определяются размерными эффектами – влиянием размера объекта на физико-химические свойства вещества. Хорошими примерами являются НП на основе углеродных наноструктур, таких как графен, однослойные или многослойные

углеродные нанотрубки (ОУНТ, МУНТ) и т.д. Эти материалы обладают короткими временами релаксации, низким порогом насыщения и высокой лучевой стойкостью. Благодаря своим уникальным оптическим и электронным свойствам, графен обладает сверхбыстрым временем релаксации в широком спектральном диапазоне (<1 пс). С использованием насыщающегося поглотителя на основе графена было продемонстрировано множество различных лазеров УКИ, работающих в режиме пассивной синхронизации мод [14–16]. В частности, из-за малой толщины и возможности нанесения графена непосредственно на оптический элемент этот материал особенно перспективен для разработки лазерных систем со сверхвысокой частотой повторения импульсов.

Простейшая схема лазера с длиной резонатора менее 1 см состоит из плоскопараллельного резонатора, заполненного твердотельной активной средой. Одним из главных условий получения стабильной синхронизации мод является работа лазера в режиме основной поперечной моды (TEM 00). Получение одномодового режима в таких компактных твердотельных лазерах часто затрудняется тепловыми эффектами в кристаллах, влияние которых усиливается с ростом интенсивности накачки. К примеру, при мощной накачке показатель преломления в кристалле распределяется неоднородно, что приводит к генерации на нескольких поперечных модах. Одним из способов устранения подобных эффектов, является создание волноводной структуры внутри активного кристалла. Использование волноводной геометрии обеспечивает равномерное распространение оптического излучения накачки, без расходимости, по всей длине активной среды из-за эффекта внутреннего отражения (показатель преломления оболочки волновода меньше, чем его сердцевина). Малые размеры цилиндрических волноводов, соответствующие диаметру моды TEM 00, позволяют осуществлять генерацию в одномодовом режиме.

Таким образом, в диссертационной работе, используя преимущества волноводов, записанных пучком фемтосекундного лазера, в объеме активного кристалла и насыщающегося поглотителя на основе графена, предложен и апробирован оригинальный подход к созданию компактных лазеров со сверхвысокой частотой повторения импульсов.

Целью диссертационной работы являлось проведение комплексных исследований режимов генерации в компактных волноводных лазерах на основе твердотельных активных сред, работающих в инфракрасном (ИК) диапазоне длин волн, и получение режима пассивной синхронизации мод со сверхвысокой частотой повторения импульсов за счет использования графена в качестве насыщающегося поглотителя.

Для достижения сформулированной цели решались следующие задачи:

1. Исследование режима пассивной синхронизации мод и повышение стабильности режима пассивной синхронизации мод волноводного Nd: YAG лазера с гигагерцовой частотой повторения пикосекундных импульсов.

2. Анализ выходных характеристик волноводного Nd: YAG лазера: частота повторений импульсов, зависимость выходной мощности излучения от мощности накачки, спектральные характеристики излучения, длительность импульсов.

3. Исследование спектрально-временных характеристик волноводного Nd: YAG лазера и осуществление контроля режимов генерации лазера за счет изменения внутрирезонаторных потерь и дисперсии групповых скоростей.

4. Исследование возможности переключения между одно- и двухволновым режимом работы волноводного Nd: YAG лазера.

5. Апробация подхода, основанного на использовании волноводных структур и графена в качестве насыщающегося поглотителя, на активной среде Tm: YAP.

Научная новизна

1. Впервые с помощью контроля внутрирезонаторных потерь экспериментально получен режим пассивной синхронизации мод в волноводном Nd: YAG лазере с насыщающимся поглотителем на основе однослойного графена при одновременной генерации на длинах волн 1061 и 1064 нм при комнатной температуре.

2. Впервые экспериментально получен режим пассивной синхронизации мод за счет насыщающегося поглотителя на основе однослойного графена на длине волны 1061 нм в волноводном Nd: YAG лазере с частотой повторения импульсов 9.8 ГГц, путем фильтрации излучения на длине волны 1064 нм в режиме двухволновой генерации.

3. Впервые проведен и экспериментально подтвержден численный расчет внутрирезонаторных потерь и времени задержки импульсов в волноводном Nd: YAG лазере, в котором существует воздушный зазор между непросветленным торцом активной среды и выходным зеркалом.

4. Впервые продемонстрирована возможность переключения между одно- (1064 нм) и двухволновым (1061 нм + 1064 нм) режимом работы волноводного Nd: YAG лазера с помощью контроля параметров излучения накачки и точной настройки внутрирезонаторных потерь, не увеличивая габариты системы.

Практическая ценность работы

Полученные в работе результаты могут быть использованы для:

- создания компактных лазеров с частотой повторения импульсов более 1 ГГц, оптический спектр излучения которых представляет собой набор эквидистантных линий;
- создания высокочастотных генераторов с перестраиваемой частотой;
- генерации терагерцового излучения на разностной частоте между длинами волн 1061 нм и 1064 нм;
- разработки задающих генераторов на основе различных активных сред для волоконно-оптических систем.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Насыщающийся поглотитель на основе графена в волноводном Nd: YAG лазере обеспечивает генерацию пикосекундных импульсов с гигагерцовой частотой повторения в режиме пассивной синхронизации мод.

2. В волноводном Nd: YAG лазере с насыщающимся поглотителем на основе графена контролируемое изменение ширины воздушного зазора между

торцом кристалла и выходным зеркалом приводит к генерации лазера на одной (1064 нм) или на двух (1061 и 1064 нм) длинах волн в режиме синхронизации мод с гигагерцовой частотой повторения импульсов.

3. Волноводные структуры, созданные в объеме кристалла Tm: YAP, и насыщающийся поглотитель на основе графена, применимы для создания лазеров с гигагерцовой частотой повторения импульсов в области длин волн 2 мкм.

Личный вклад автора

Автор диссертационной работы активно участвовал в постановке задач; определении способов их решения; проведении экспериментов; обработке, анализе и интерпретации полученных данных; написании работ и апробации материала. Все представленные в работе результаты получены соискателем лично, либо в соавторстве при его непосредственном участии.

Степень достоверности данных

Достоверность полученных данных обеспечивается высоким уровнем использованного экспериментального оборудования; применением современных теоретических представлений и методов обработки при анализе данных; сравнением полученных результатов с имеющимися литературными данными; воспроизводимостью результатов; публикацией материалов исследования в высокорейтинговых научных журналах и докладами на всероссийских и международных конференциях.

Апробация результатов

Результаты работы были доложены на следующих конференциях: XVIII Научная школа «Нелинейные волны – 2018» (Нижний Новгород, Россия, 2018); XVI Всероссийский молодежный Самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике (Самара, Россия, 2018); The 7th Workshop on Nanocarbon Photonics and Optoelectronics «NPO 2018» (Savonlinna, Finland); 17-ая Международная конференция-школа «Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение» (Саранск, Россия); V Международная конференция Лазерные, плазменные исследования и технологии

(ЛаПлаз 2019) (Москва, Россия, 2019); Conference on Lasers & Electro-Optics / Europe and European Quantum Electronics Conference (CLEO® / Europe-EQEC) (Munich, Germany, 2019); Международный семинар по волоконным лазерам (Новосибирск, Россия, 2020); 19 Международная конференция «Оптика Лазеров – 2020» (С.-Петербург, Россия, 2020); Школа-конференция молодых ученых «Прохоровские недели» 2018, 2019, 2020 (Москва, Россия, 2018-2020); Laser Physics Workshop (LPHYS'21) (Lyon, France); ВКВО – 2021 (Пермь, Россия); а также на семинарах ИОФ РАН.

Публикации

Основные результаты, изложенные в работе, опубликованы в 17 научных работах, из них 8 статей, включенные в перечень рецензируемых научных изданий ВАК.

Объем и структура диссертации

Работа изложена на 102 страницах и состоит из введения, 3 глав, заключения и списка литературы, включающего 206 источников. Диссертационная работа иллюстрирована 2 таблицами и 41 рисунком.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена литературному обзору по твердотельным лазерам со сверхвысокой частотой повторения импульсов. Приведены сведения о современном состоянии исследований по генерации лазерных импульсов с гигагерцовой частотой повторения: рассмотрены существующие подходы к созданию гигагерцовых лазеров с синхронизацией мод, проведено сравнение методов генерации импульсов, проведен анализ используемых активных сред, описано влияние дисперсии групповых скоростей в активной среде лазера на режим синхронизации мод и рассмотрены способы компенсации дисперсии, показана актуальность использования волноводных лазеров для осуществления лазерной генерации в режиме синхронизации мод с гигагерцовой частотой повторения импульсов.

Вторая глава посвящена экспериментальному и численному исследованию волноводных Nd: YAG лазеров, работающих в режиме пассивной синхронизации мод, с гигагерцовой частотой повторения импульсов.

В главе 2.1 приведены результаты экспериментальных исследований режимов генерации и пассивной синхронизации мод с гигагерцовой частотой повторения импульсов в твердотельных Nd: YAG лазерах. Эксперименты проводились с двумя различными конфигурациями волноводных структур, созданных в объеме кристалла Nd: YAG.

В главе 2.1.1 описана экспериментальная схема Nd: YAG лазера с волноводными структурами диаметром 30 мкм (рис. 1).

В данной конфигурации для накачки активного элемента используется излучение Ti: Sa лазера, работающего в непрерывном режиме, с центральной длиной волны 808 нм и выходной мощностью 600 мВт. Излучение накачки фокусируется в волноводную структуру, созданную внутри кристалла Nd: YAG (1 ат.%) методом прямой лазерной записи. Для записи волновода трубчатого типа с оболочкой пониженного показателя преломления и диаметром сердцевины 30 мкм использовались фемтосекундные импульсы с длительностью 180 фс на длине волны 1030 нм.

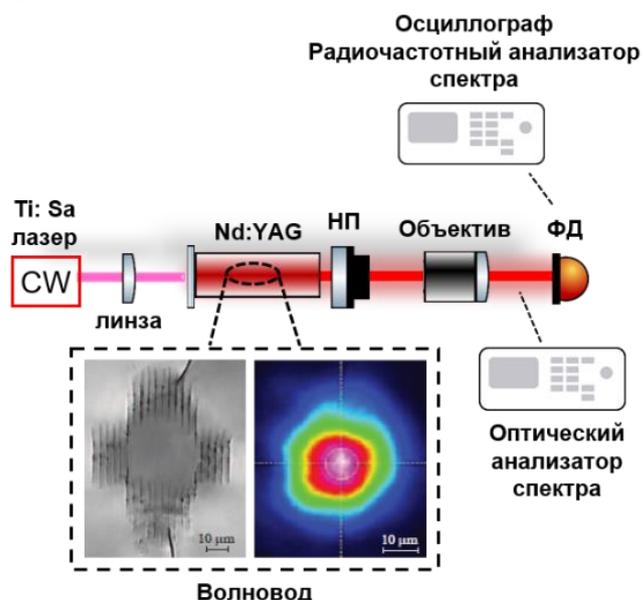


Рис. 1. Экспериментальная схема волноводного Nd: YAG лазера: НП – выходное зеркало с нанесенным насыщающимся поглотителем на основе графена, ФД – фотодиод.

Плоскопараллельный резонатор образован двумя зеркалами: дихроичным зеркалом HR, нанесенным на входной торец кристалла, и выходным зеркалом с коэффициентом отражения 98% на длине волны 1064 нм. В данной схеме в качестве элемента, обеспечивающим пассивную синхронизацию мод, используется насыщающийся поглотитель (НП) на основе графена, нанесенный непосредственно на выходное

зеркало резонатора. Для изготовления насыщающегося поглотителя графен был синтезирован методом химического осаждения из газовой фазы (CVD) на медной фольге с последующим травлением и осаждением на зеркало.

В главе 2.1.2 проведено исследование режимов генерации в Nd: YAG лазере с волноводными структурами диаметром 30 мкм. Частота повторения импульсов в режиме пассивной синхронизации мод определяется временем двойного обхода резонатора. Таким образом, резонатор длиной 8.4 мм обеспечивает частоту повторения импульсов 9.8 ГГц. Для точной подстройки длины резонатора выходное

зеркало было оснащено пьезоэлементами. С помощью плавной подстройки напряжения, поданного на пьезоэлемент, осуществлялось перемещение выходного зеркала на расстояние до 2 мкм. Такая подстройка позволяла перестраивать частоту повторения генерируемых импульсов с точностью до единиц МГц.

На рис. 2 представлены полученные: (а) осциллограмма выходного излучения, (б) радиочастотный и (в) оптический спектры волноводного Nd: YAG лазера. На рис. 2 (а) наблюдается модуляция мощности выходного излучения, которая проявляется в виде набора линий в радиочастотном спектре (рис. 2 (б)). При этом в оптическом спектре присутствует два основных пика, соответствующих генерации на длинах волн 1061 и 1064 нм). Благодаря высокому разрешению анализатора оптического спектра (0.01

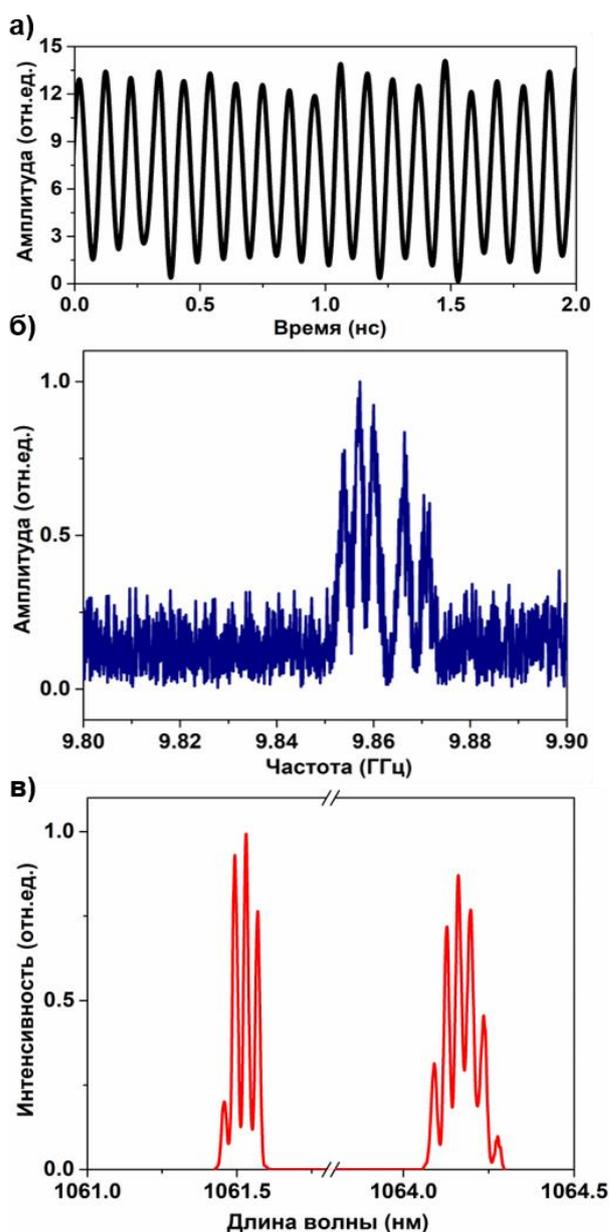


Рис. 2. (а) Осциллограмма выходного излучения лазера, (б) радиочастотный и (в) оптический спектры.

нм), в спектрах генерации наблюдаются отдельные продольные моды резонатора. Модуляция мощности выходного излучения и, соответственно, появление дополнительных частот связаны с фазовым набегом для отдельных продольных мод резонатора, вызванным дисперсией групповых скоростей в среде Nd: YAG. Средняя мощность выходного излучения созданного волноводного лазера составляла 1 мВт. Для измерения длительности отдельных генерируемых импульсов в режиме реального времени использовалась электронно-оптическая камера PS-1/S1 с временным разрешением 1 пс. Длительность полученных импульсов составила менее 20 пс.

В Nd: YAG вблизи 1 мкм существует несколько энергетических переходов, соответствующих длинам волн 1061.58, 1064.18 и 1064.55 нм. Условие генерации на нескольких лазерных переходах в Nd: YAG лазере выполнимо при конструкции резонатора, которая обеспечивает спектральную зависимость внутрирезонаторных потерь. Для синхронизации мод излучения, генерируемого на нескольких переходах, необходимо компенсировать временную задержку между продольными модами, то есть обеспечить равное время полного обхода резонатора для излучения на разных длинах волн. В разработанной конструкции лазера воздушный зазор между непросветленным торцом активного кристалла и выходным зеркалом образует внутрирезонаторный интерферометр. Интерферометр является дисперсионным элементом, который вносит временную задержку распространения излучения, зависящую от длины волны. Соответственно, в зависимости от изменения расстояния между торцом кристалла и выходным зеркалом должно наблюдаться периодическое изменение спектрально-временных характеристик выходного излучения. Подробная процедура расчета параметров интерферометра описана в главе 2.1.3.

В главе 2.1.3 описана процедура расчета параметров интерферометра, образованного внутри оптического резонатора лазера. Исходя из проведенных расчетов были построены зависимости оптических потерь и временной задержки для излучения на длинах волн 1061 и 1064 нм, от величины воздушного зазора между торцом кристалла и выходным зеркалом – длины интерферометра. На основе полученных данных была рассчитана зависимость частоты повторения импульсов

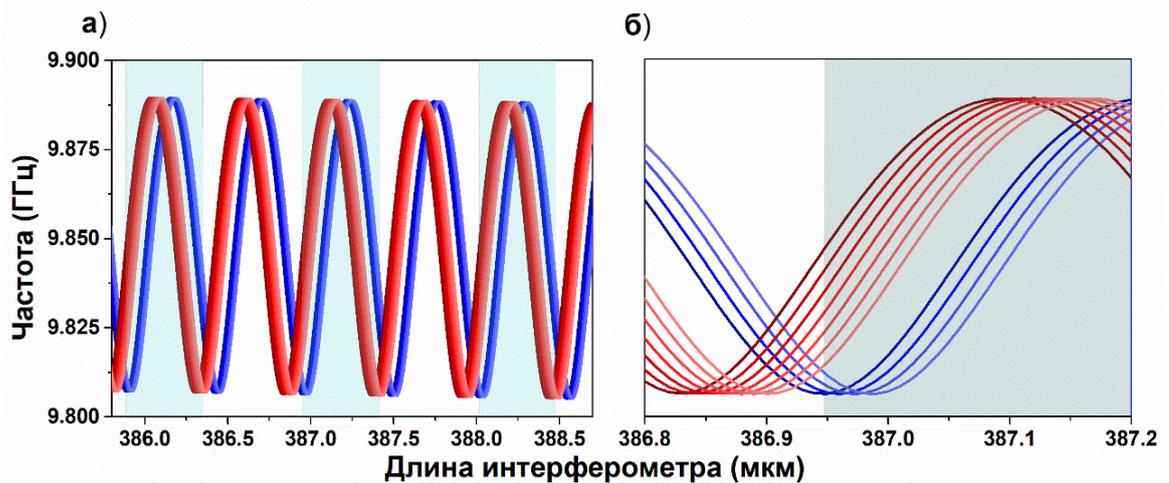


Рис. 3. Зависимость частоты повторения импульсов с учетом распределения продольных мод на длинах волн 1061 и 1064 нм от длины интерферометра (а) в диапазоне 386-388.5 мкм; (б) в диапазоне 386.8-387.2 мкм. Голубым отмечены положения, при которых внутрирезонаторные потери на длине волны 1064 нм превышают потери на длине волны 1061 нм.

от длины интерферометра с учетом распределения продольных мод на длинах волн 1061 и 1064 нм (рис. 3). Длина интерферометра определялась, исходя из разности длины резонатора ($L = c/2\nu n$, где c – скорость света в вакууме, ν – частота повторения импульсов, n – показатель преломления), и длины кристалла, которая была измерена до проведения экспериментов ($L_{cr} = 8.06$ мм). При длине интерферометра ~ 387 мкм рассчитанная временная задержка между модами на длине волны 1064 нм составляет ~ 50 фс, а на длине волны 1061 нм – близка к нулю. Соответственно, на длине волны 1061 нм при длине интерферометра ~ 387 мкм возможно получение режима пассивной синхронизации мод.

В главе 2.1.4 представлено описание экспериментов по получению режима пассивной синхронизации мод на длине волны 1061 нм в волноводном Nd: YAG лазере. Для выделения излучения на длине волны 1061 нм использовался волоконный оптический фильтр, расположенный вне резонатора. В данном эксперименте, выходное излучение волноводного лазера с мощностью 1 мВт усиливалось с помощью волоконного усилителя. Для усиления использовалось иттербиевое активное GTWave волокно длиной 16 м с накачкой на длине волны 976 нм полупроводниковым лазерным диодом. Мощность усиленного излучения составила 530 мВт. На рис. 4 приведены (а) осциллограмма, (б) радиочастотный и (в) оптический спектры усиленного выходного излучения лазера, отфильтрованного

на длине волны 1061 нм. После прохождения оптического фильтра импульсы распространяются с периодом следования ~ 102 пс, а радиочастотный спектр содержит только одну компоненту. Таким образом, используя селективный элемент на основе одномодового оптического волокна вне резонатора, получена последовательность пикосекундных импульсов с частотой повторения 9.8 ГГц.

В главе 2.1.5 приводится сравнение положений пиков радиочастотных спектров, экспериментально полученных в волноводном лазере, и рассчитанных с

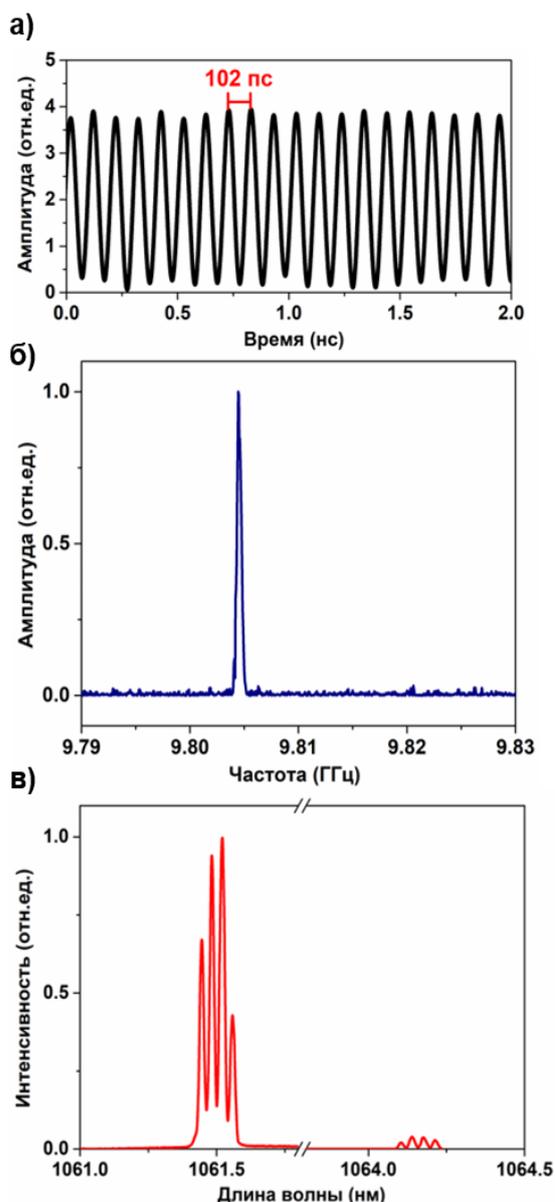


Рис. 4. (а) Осциллограмма выходного излучения лазера после прохождения оптического фильтра, (б) радиочастотный и (в) оптический спектры.

помощью процедуры, описанной в главе 2.1.3. Показано, что при выбранной длине интерферометра 387 мкм наблюдается хорошее соответствие рассчитанных частот и радиочастотного спектра, полученного в эксперименте. В случае, если интерферометр вносит временную задержку близкую к 0, частоты представляют собой эквидистантный спектр и наблюдается генерация пикосекундных импульсов, как это было продемонстрировано в эксперименте на длине волны 1061 нм (рис. 4). При этом продольные моды на длине волны 1064 нм не синхронизированы. Такая зависимость радиочастотного спектра согласуется с экспериментальными данными и качественно объясняет полученные режимы работы лазера, а также возможность перестройки между ними.

Глава 2.2 посвящена изучению методов управления режимами генерации и пассивной синхронизации мод в компактном Nd: YAG лазере с волноводными структурами 20 мкм.

В главе 2.2.1 представлен компактный Nd: YAG лазер с волноводными структурами диаметром 20 мкм и накачкой одномодовым лазерным диодом. Поскольку использование дополнительных элементов вне резонатора существенно усложняет конструкцию лазера, было необходимо усовершенствовать оптическую схему для возможности управления характеристиками лазера и переключения между длинами волн генерации.

Для решения данной задачи внутри кристалла Nd: YAG были записаны одномодовые волноводы с диаметром сердцевины 20 мкм. На рис. 5 показана экспериментальная схема Nd: YAG лазера, микрофотография волноводной структуры и распределение интенсивности лазерного излучения внутри волновода.

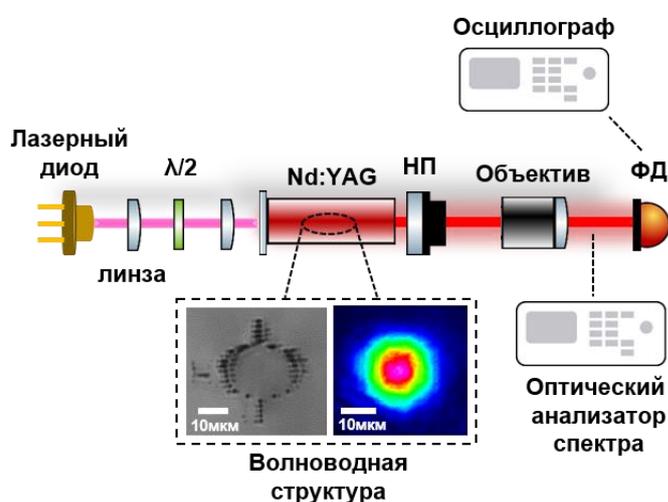


Рис. 5. Компактный Nd: YAG лазер с одномодовыми волноводными структурами диаметром 20 мкм: $\lambda/2$ – полуволновая пластинка, НП – выходное зеркало с нанесенным насыщающимся поглотителем на основе графена, ФД – фотодиод.

Накачка активного элемента осуществляется непрерывным одномодовым диодным лазером с длиной волны 808 нм и максимальной выходной мощностью 500 мВт. Резонатор образован двумя плоскими зеркалами, перпендикулярными волноводу: дихроичным зеркалом HR в диапазоне 1060–1070 нм, нанесенным на торец кристалла, и выходным зеркалом ($R = 99\%$) с нанесенным насыщающимся поглотителем на основе графена.

В главе 2.2.2 приводится оценка эффективности оптической накачки волноводного лазера. Для этого было использовано приближение для четырехуровневой модели лазера. Чтобы соответствовать приближению, расчет был упрощен, предполагая, что волноводный Nd: YAG лазер генерирует на торцах кристалла в непрерывном режиме. Таким образом, в данном расчете не рассматриваются потери, связанные с интерферометром, насыщающимся поглотителем и т.п. Оценка эффективности поглощенного излучения накачки в

волноводе была проведена, исходя из следующих параметров: доля генерируемых фотонов, выходящих из резонатора, квантовая эффективность лазера, доля поперечного сечения активной среды, которая была засвечена пучком накачки, и дифференциальная квантовая эффективность лазера. Эффективность поглощенного излучения накачки в волноводной структуре составила 20%.

В главе 2.2.3 проведено исследование зависимости режимов генерации лазера от параметров излучения накачки. Как правило, волноводы с трубчатой оболочкой, созданные в Nd: YAG, должны поддерживать направление поляризации основной моды излучения, сохраняя исходную поляризацию излучения накачки после распространения по волноводу. Однако механические напряжения в кристалле, которые могут возникать в процессе записи волноводных структур, за счет создания кристаллических дефектов в облученной области кристалла могут влиять на распределение показателя преломления внутри сердцевины волновода. Эта проблема особенно актуальна при работе с волноводами диаметром 20-30 мкм. Такие напряжения могут приводить к поляризационным потерям и эффектам деполяризации. Чтобы выяснить, вносит ли волноводная структура какую-либо поляризационную анизотропию в активную среду, в оптическую схему была интегрирована полуволновая пластина ($\lambda/2$) для управления поляризацией излучения лазерного диода, используемого для накачки волноводной структуры. Проведенные измерения показывают, что структура одномодового волновода незначительно деполяризует свет накачки на длине волны 808 нм, но ориентация поляризации излучения остается неизменной. Полученные данные свидетельствуют о сохранении объемных свойств Nd: YAG внутри волноводной структуры.

Для исследования характеристик генерации излучения волноводного Nd: YAG лазера были получены оптические спектры выходного излучения волноводного Nd: YAG лазера при мощности накачки ниже порога генерации. Полученные спектры имеют вид, характерный для усиленного спонтанного излучения (УСИ). В измеренных спектрах наблюдаются хорошо разрешенные пики с одинаковыми интервалами между ними, соответствующими продольным модам резонатора, что позволяет оценить его длину. Измеренные межмодовые расстояния 36 пм соответствуют резонатору длиной 8.63 мм. Соотношение пиков

интенсивности в спектрах УСИ сильно зависит от ориентации пластины $\lambda/2$. Различия в профилях УСИ связаны с небольшим изменением оптического спектра накачки и смещением пучка накачки при повороте пластинки $\lambda/2$. Это происходит из-за обратного отражения излучения накачки в резонатор лазерного диода. Этот эффект демонстрирует исключительную чувствительность усиления в волноводе к параметрам накачки (таким как длина волны, поляризация, положение и размер пучка). Управление этими параметрами позволяет переключаться между режимами генерации на нескольких лазерных переходах в кристалле Nd: YAG.

В главе 2.2.4 продемонстрировано переключение между одно- и двухволновой генерации на длинах волн 1061 и 1064 нм в режиме пассивной синхронизации мод. На рис. 6 показаны оптические спектры, осциллограммы и радиочастотные спектры выходного излучения волноводного лазера в зависимости от изменения длины интерферометра. Изменение длины интерферометра приводит к периодическому изменению внутрирезонаторных потерь. Когда усиление моды превышает уровень потерь в резонаторе, она может в нем существовать.

Таким образом, в зависимости от ширины воздушного зазора можно получить генерацию одной или нескольких последовательностей импульсов в режиме синхронизации мод с периодами ~ 105 пс, соответствующими частотам повторения в диапазоне 9.5 ГГц. Радиочастотный спектр содержит одну или несколько компонент, соответствующих генерации на одной или нескольких длинах волн.

В одноволновом режиме синхронизация мод реализуется на длине волны 1064 нм (рис. 6 (б)).

При работе в двухволновом режиме, пассивная синхронизация мод с помощью насыщающегося поглотителя на основе графена приводит к одновременной генерации серий импульсов с центрами на длинах волн 1061 нм и 1064 нм. В результате интерференции между импульсами с разной частотой повторения на осциллограмме наблюдается дополнительная модуляция с периодом повторения 25 нс, что соответствует частоте биений 40 МГц (рис. 6 (в)).

В главе 2.2.5 приводится описание эксперимента по получению режима пассивной синхронизации мод на длине волны 1064 нм в волноводном Nd: YAG лазере с выходным зеркалом $T=38\%$. Как было показано в предыдущих главах, в

кристалле Nd: YAG, а также в других активных средах со сложным профилем усиления, использование выходного зеркала с пропусканием менее 10% может привести к одновременной генерации на нескольких длинах волн. В Nd: YAG двухволновая генерация осуществляется, когда потери, вносимые интерферометром на длине волны 1064 нм, превышают потери на 1061 нм или величина потерь на длинах волн 1061 и 1064 нм сравнима. Рассчитанная с помощью процедуры, описанной в главе 2.1.3, зависимость внутрирезонаторных потерь от длины интерферометра показала, что амплитуда периодической модуляции и значения потерь, вносимых интерферометром, образованным воздушным зазором между

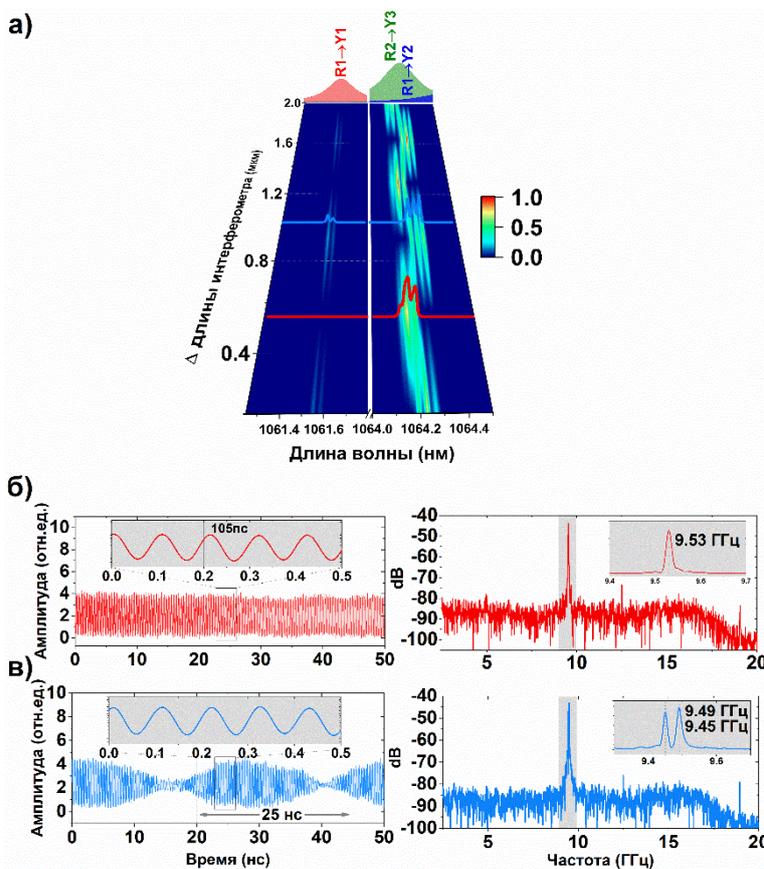


Рис. 6. (а) Зависимость выходных оптических спектров от изменения длины интерферометра (от 0 до 2 мкм) и распределение лазерных переходов в оптических спектрах (красный спектр – 1064.18 нм, синий спектр – 1061.58 и 1064.55 нм), (б) осциллограммы сигналов, полученные при генерации в режиме пассивной синхронизации мод на одной (1064.18 нм) и двух (1061,58 и 1064,55 нм) длинах волн, (в) соответствующие радиочастотные спектры с одной (9,53 ГГц) и двумя (9,49 и 9,45 ГГц) компонентами.

торцом кристалла и выходным зеркалом резонатора, с выходным зеркалом $T=38\%$ по сравнению с $T=2\%$, в 1.5 и 20 раз выше, соответственно. Таким образом, с выходным зеркалом с коэффициентом пропускания 38% в волноводном Nd: YAG лазера была получена синхронизация мод на длине волны 1064 нм без осуществления дополнительного контроля параметров накачки и фильтрующих элементов.

Третья глава

посвящена созданию волноводного Tm: YAP лазера с гигагерцовой частотой повторения импульсов и исследованию его выходных характеристик.

В главе 3.1 описано применение подхода, основанного на использовании волноводных структур внутри твердотельных активных сред и насыщающегося поглотителя на основе графена, для создания лазера с гигагерцовой частотой повторения импульсов на активной среде Tm: YAP.

В главе 3.1.1 описана экспериментальная схема разработанного волноводного Tm: YAP лазера с волноводными структурами диаметром 30 мкм (рис. 7). В данной

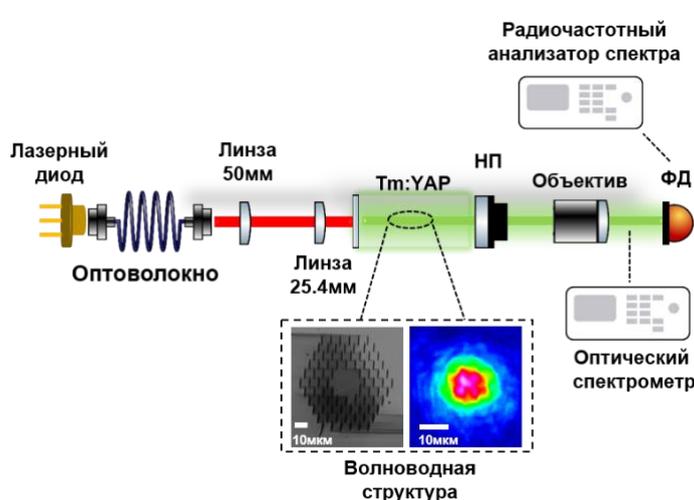


Рис. 7. Схема волноводного Tm: YAP лазера: НП – выходное зеркало с нанесенным насыщающимся поглотителем на основе графена, ФД – фотодиод. В данной схеме излучение накачки на длине волны 804 нм от диодного лазера заводилось в торец волновода через многомодовый световод (диаметр сердцевины 100 мкм), систему из двух линз с уменьшением диаметра пятна в 2 раза (линзы $f=50$ мм и 25.4 мм, соответственно) и глухое дихроичное зеркало ($R>99,5\%$ в диапазоне 1.9-2.0 мкм и $R<10\%$ на 0.8 мкм). Выходной торец кристалла был просветлен в диапазоне длин волн 1.9-2.0 мкм. Пропускание выходного зеркала составляло 15% на 1950 нм.

Длина резонатора составляла 9.7 мм. Эффективность ввода излучения накачки в волноводную структуру составило 13% (оценивалось как в главе 2.2.2). Излучение накачки фокусировалось в волноводную структуру диаметром 30 мкм, созданную внутри кристалла Tm: YAP (5 ат.%, $n=1.9228$) вдоль оси [010] методом прямой записи пучком фемтосекундного лазера на длине волны 1030 нм при длительности импульсов 180 фс и частоте повторения 5 кГц.

В главе 3.1.2 приведено исследование режимов генерации созданного волноводного Tm: YAP лазера. В представленной схеме для получения режима пассивной синхронизации мод на выходное зеркало резонатора было последовательно нанесено 5 монослоев графена, синтезированного методом CVD. На рис. 8 (а) представлена типичная осциллограмма выходного излучения волноводного Tm: YAP лазера, при работе с насыщающимся поглотителем. Как

видно, с насыщающимся поглотителем на основе графена лазер работает в режиме синхронизации мод с модуляцией добротности. Период модуляции, связанной с синхронизацией продольных мод резонатора, составляет ~ 125 пс, что соответствует

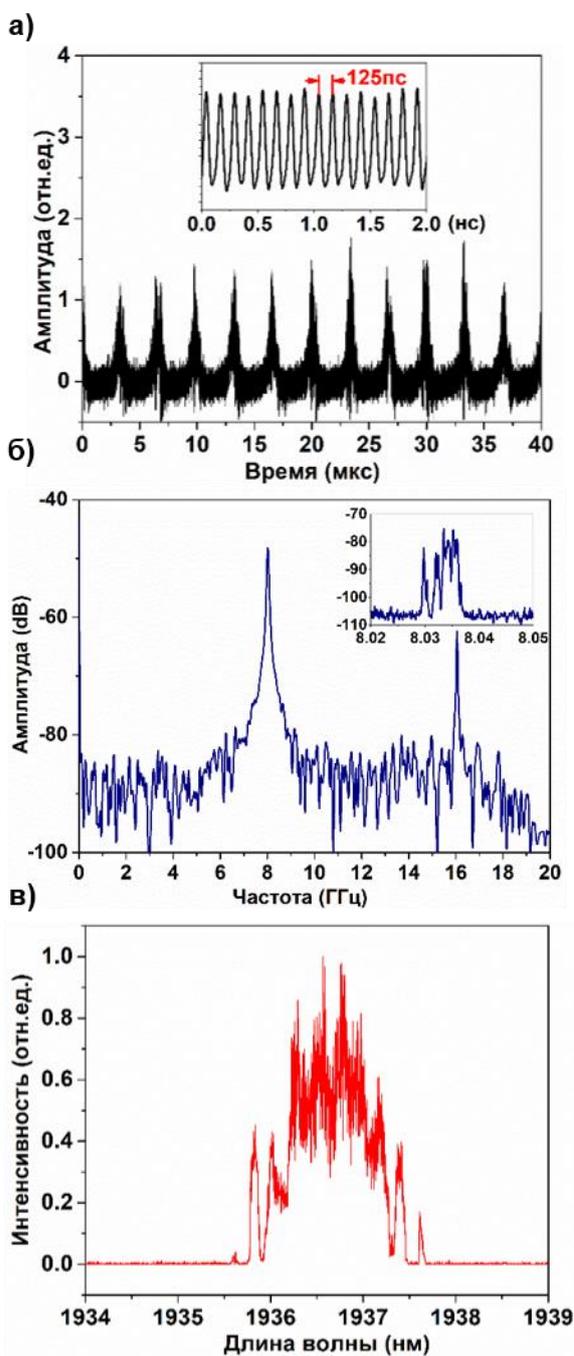


Рис. 8. (а) Осциллограмма выходного излучения волноводного Тм: УАР лазера. На вставке представлена развертка по времени в наносекундном масштабе; (б) радиочастотный спектр. На вставке показана несущая частота 8 ГГц с разрешением 10 кГц в диапазоне частот 30 МГц; (в) оптический спектр.

частоте повторения импульсов 8 ГГц (рис. 8 (б)). На вставке рис. 8 (б) видно, что спектр содержит несколько радиочастотных компонент в области частот 8 ГГц, связанных с продольными модами резонатора (аналогично рис. 2 (б)). Также на радиочастотном спектре видна дополнительная спектральная линия, соответствующая второй гармонике на частоте ~ 16 ГГц, что подтверждает наличие режима синхронизации мод. Стоит отметить, что амплитуда данной спектральной линии определяется полосой пропускания измерительного тракта фотодиода (менее 16 ГГц). Оптический спектр излучения волноводного Тм: УАР лазера продемонстрирован на рис. 8 (в). Длина волны излучения составила 1936.5 нм.

В главе 3.1.3 приведены результаты исследования режимов генерации в волноводном Тм: УАР лазере с использованием интерферометра Жира-Турнуа. Для формирования интерферометра использовался такой же кристалл Тм: УАР, как в главах 3.1.1-3.1.2, но без просветляющего покрытия. Интерферометр был образован

непросветленным торцом кристалла Tm: YAP и выходным зеркалом, оснащенным пьезоэлектрическими элементами. Изменение длины интерферометра в диапазоне от 0 до 2 мкм приводит к периодическому изменению внутриврезонаторных потерь.

За счет использования перестраиваемого внутриврезонаторного интерферометра в схеме волноводного Tm: YAP лазера, работающем в режиме пассивной синхронизации мод с модуляцией добротности, получена плавная перестройка длины волны в выходного излучения в диапазоне от 1925 до 1950 нм и продемонстрирована возможность двухволновой генерации.

В заключении представлены основные выводы к работе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. На основе волноводных структур в кристалле Nd: YAG и однослойного графена созданы твердотельные пикосекундные лазеры с частотой повторения импульсов 9.5 и 9.8 ГГц, работающие на длинах волн 1061 и 1064 нм.

2. Продемонстрировано использование волноводного Nd: YAG лазера с частотой повторения импульсов 9.8 ГГц в качестве задающего генератора для волоконного иттербиевого усилителя. Средняя мощность усиленного сигнала составила 530 мВт.

3. Продемонстрирована возможность одновременной двухволновой генерации в режиме пассивной синхронизации мод с использованием одного насыщающегося поглотителя на основе графена. Управление потерями и дисперсией за счет настройки внутриврезонаторного интерферометра позволяет перестраивать длину волны и частоту повторения импульсов, соответственно.

4. Продемонстрирована возможность переключения между одно- и двухволновой генерацией в режиме пассивной синхронизации мод с частотой повторения импульсов 9.5 ГГц за счет изменения параметров излучения накачки.

5. Получен режим синхронизации мод на длине волны 1064 нм в волноводном Nd: YAG лазере с выходным зеркалом с коэффициентом пропускания 38% без осуществления контроля параметров накачки и дополнительных фильтрующих элементов.

б. Продемонстрирована применимость подхода, основанного на использовании волноводных структур и насыщающегося поглотителя на основе графена, для различных твердотельных активных сред. На основе волновода в кристалле Tm: YAP и графена создан твердотельный лазер с частотой повторения импульсов 8 ГГц, работающий в диапазоне длин волн 1925-1950 нм.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. W. Demtröder, *Laser Spectroscopy* (Springer Berlin Heidelberg, 2008).
2. D. G. Peterson and A. Yariv, "Interferometry and Laser Control with Solid Fabry-Perot Etalons," *Appl. Opt.* 5, 985 (1966).
3. F. J. Duarte, *Tunable Laser Applications*, Third Edition (2016).
4. P. Hariharan, *Basics of Holography* (2002).
5. R. M. Measures, "Laser remote sensing fundamentals and applications.," (1984).
6. W. M. Steen, "Laser material processing - An overview," in *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics* (2003).
7. B. Schenkel, J. Biegert, U. Keller, C. Vozzi, M. Nisoli, G. Sansone, S. Stagira, S. De Silvestri, and O. Svelto, "Generation of 3.8-fs pulses from adaptive compression of a cascaded hollow fiber supercontinuum," *Opt. Lett.* 28, 1987 (2003).
8. L. F. Mollenauer, P. V Mamyshev, J. Gripp, M. J. Neubelt, N. Mamysheva, L. Grüner-Nielsen, and T. Veng, "Demonstration of massive wavelength-division multiplexing over transoceanic distances by use of dispersion-managed solitons," *Opt. Lett.* 25, 704–706 (2000).
9. A. H. Zewail, "Femtochemistry: Atomic-Scale Dynamics of the Chemical Bond," *J. Phys. Chem. A* 104, 5660–5694 (2000).
10. X. Liu, D. Du, and G. Mourou, "Laser ablation and micromachining with ultrashort laser pulses," *IEEE J. Quantum Electron.* 33, 1706–1716 (1997).
11. A. Bartels, R. Cerna, C. Kistner, A. Thoma, F. Hudert, C. Janke, and T. Dekorsy, "Ultrafast time-domain spectroscopy based on high-speed asynchronous optical sampling," *Rev. Sci. Instrum.* 78, 035107 (2007).
12. T. Udem, R. Holzwarth, and T. W. Hänsch, "Optical frequency metrology," *Nature* 416, 233–237 (2002).
13. O. Svelto, *Principles of Lasers* (Springer US, 2010).
14. Z. Sun, T. Hasan, F. Torrisi, D. Popa, G. Privitera, F. Wang, F. Bonaccorso, D. M. Basko, and A. C. Ferrari, "Graphene Mode-Locked Ultrafast Laser," *ACS Nano* 4, 803–810 (2010).

15. C. Cihan, C. Kocabas, U. Demirbas, and A. Sennaroglu, "Graphene mode-locked femtosecond Alexandrite laser," *Opt. Lett.* 43, 3969–3972 (2018).
16. A. V Pushkin, E. A. Migal, S. Tokita, Y. V Korostelin, and F. V Potemkin, "Femtosecond graphene mode-locked Fe:ZnSe laser at 4.4 μm ," *Opt. Lett.* 45, 738 (2020).

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ, ВКЛЮЧЕННЫХ В ПЕРЕЧЕНЬ РЕЦЕНЗИРУЕМЫХ НАУЧНЫХ ИЗДАНИЙ ВАК

1. **М.В. Понарина**, А.Г. Охримчук, М.Г. Рыбин, В.В. Букин, П.А. Образцов, «Волноводный Тм: YAP лазер с частотой повторения импульсов 8 ГГц,» *Краткие сообщения по физике ФИАН*, 49(7), 50-59 (2022).
2. **M. Ponarina**, A. Okhrimchuk, T. Dolmatov, M. Rybin, E. Obraztsova, V. Bukin and P. Obraztsov, "Intracavity losses effect on mode-locking in a waveguide laser with graphene saturable absorber," *Laser Phys. Lett.* 19(1), 015001 (2022).
3. **M. Ponarina**, A. Okhrimchuk, G. Alagashev, G. Orlova, T. Dolmatov, M. Rybin, E. Obraztsova, V. Bukin, and P. Obraztsov, "Wavelength-switchable 9.5 GHz graphene mode-locked waveguide laser," *Appl. Phys. Express* 14(7), 072001 (2021).
4. **М.В. Понарина**, А.Г. Охримчук, М.Г. Рыбин, Е.Д. Образцова, Т.В. Долматов, В.В. Букин, П.А. Образцов, «Одно- и двухволновая генерация пикосекундных импульсов с частотой повторения 9.5 ГГц в волноводном Nd:YAG лазере,» *СПЕЦВЫПУСК «ФОТОН-ЭКСПРЕСС-НАУКА 2021»* 6, 142 (2021).
5. **M. V. Ponarina**, A. G. Okhrimchuk, M. G. Rybin, T. V. Dolmatov, V. V Bukin, and P. A. Obraztsov, "Switching between single- and dual-wavelength mode-locking in waveguide Nd:YAG laser with graphene saturable absorber," in 2020 International Conference Laser Optics (ICLO) (2020).
6. **M. V. Ponarina**, A. G. Okhrimchuk, M. G. Rybin, M. P. Smayev, E. D. Obraztsova, A. V Smirnov, I. V Zhluktova, V. A. Kamynin, T. V Dolmatov, V. V Bukin, and P. A. Obraztsov, "Dual-wavelength generation of picosecond pulses with 9.8 GHz repetition rate in Nd : YAG waveguide laser with graphene," *Quantum Electron.* 49(4), 365–370 (2019).
7. **M. V. Ponarina**, A. G. Okhrimchuk, M. G. Rybin, and P. A. Obraztsov, "GHz Repetition Rate of Picosecond Pulses in a Nd:YAG Waveguide Laser," *Bull. Lebedev Phys. Inst.* 46(3), 100–103 (2019).
8. **M. Ponarina**, A. Okhrimchuk, M. Smayev, and P. Obraztsov, "Dual-Wavelength Mode-Locking of Waveguide Nd:YAG Laser with Graphene," in 2019 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC) (2019).