

«УТВЕРЖДАЮ»

Ректор Федерального государственного
автономного образовательного
учреждения высшего образования

Национального исследовательского
университета ИТМО»

Член-корреспондент РАН



Васильев Владимир
Николаевич

2022 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию **Понариной Марии Владимировны**
«Пассивная синхронизация мод со сверхвысокой частотой повторения
импульсов в твердотельных волноводных лазерах с использованием графена»,
представленную к защите на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 01.04.21 – Лазерная физика

Диссертационная работа Понариной Марии Владимировны посвящена разработке и исследованию компактных волноводных лазеров на основе твердотельных активных сред, работающих в диапазоне длин волн 1-2 мкм, и получению режима пассивной синхронизации мод со сверхвысокой частотой повторения импульсов за счет использования графена в качестве насыщающегося поглотителя.

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.

Научная новизна. В работе 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 с помощью контроля внутрирезонаторных потерь. Также 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. 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. 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. 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.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы, включающего 206 источников. Объем диссертации составляет 102 страницы, содержит 41 рисунок и 2 таблицы.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна и научно-практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту, и сведения об апробации 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. Для этого были разработаны две различные конфигурации твердотельных Nd: YAG лазеров с волноводными структурами диаметром 20 и 30 мкм. В качестве элемента, обеспечивающим пассивную синхронизацию мод, используется насыщающийся поглотитель на основе графена, нанесенный непосредственно на выходное зеркало резонатора.

В Nd: YAG лазере с волноводными структурами диаметром 30 мкм было проведено исследование режимов генерации с помощью сверхбыстрого и высокоточного оборудования. Были получены осциллограммы выходного излучения, радиочастотные и оптические спектры волноводного Nd: YAG лазера. Исходя из радиочастотного спектра была определена частота повторения импульсов равная 9.8 ГГц, которая обеспечивается малой длиной резонатора 8.4 мм. При этом в оптическом спектре присутствует два основных пика, соответствующих генерации на длинах волн 1061 и 1064 нм. Длительность полученных импульсов составила менее 20 пс.

В разработанной конструкции лазера воздушный зазор между непросветленным торцом активного кристалла и выходным зеркалом образует

внутрирезонаторный интерферометр. Для исследования возможности управления режимами генерации волноводного лазера был проведен расчет параметров интерферометра. 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. Показано, что в данной конфигурации лазера временная задержка между модами на длине волны 1064 нм составляет ~ 50 фс, а на длине волны 1061 нм – близка к нулю. Для выделения излучения на длине волны 1061 нм использовался волоконный оптический фильтр, расположенный вне резонатора. После прохождения оптического фильтра импульсы распространяются с периодом следования ~ 102 пс, а радиочастотный спектр содержит только одну компоненту. Таким образом, в волноводном Nd: YAG лазере получена последовательность пикосекундных импульсов с частотой повторения 9.8 ГГц.

Для возможности управления характеристиками лазера и переключения между длинами волн генерации внутри кристалла Nd: YAG были записаны одномодовые волноводы с диаметром сердцевины 20 мкм. В данной конфигурации волноводного лазера было проведено исследование зависимости режимов генерации лазера от параметров излучения накачки. Было установлено, что структура одномодового волновода незначительно деполаризует 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. Также в ходе эксперимента была продемонстрирована исключительная 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.

Изменение длины интерферометра приводит к периодическому изменению внутрирезонаторных потерь. Таким образом, в зависимости от ширины

воздушного зазора была продемонстрирована генерация одной или нескольких последовательностей импульсов в режиме синхронизации мод с периодами ~ 105 пс, соответствующими частотам повторения в диапазоне 9.5 ГГц. При этом 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. 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.

Третья глава посвящена созданию волноводного Tm: YAP лазера с гигагерцовой частотой повторения импульсов и исследованию его выходных характеристик. Для создания лазера с гигагерцовой частотой повторения импульсов на активной среде Tm: YAP используется подход, основанный на использовании волноводных структур внутри твердотельных активных сред и насыщающегося поглотителя на основе графена. Внутри кристалла Tm: YAP были созданы волноводные структуры диаметром 30 мкм. Для получения режима пассивной синхронизации мод на выходное зеркало резонатора был нанесен графен. Продемонстрирована работа лазера в режиме синхронизации мод с модуляцией добротности. Период модуляции, связанной с синхронизацией продольных мод резонатора, составляет ~ 125 пс, что соответствует частоте повторения импульсов 8 ГГц.

За счет использования перестраиваемого внутрирезонаторного интерферометра в схеме волноводного Tm: YAP лазере, 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.

Знакомство с содержанием диссертации позволяет сделать вывод о том, что поставленная цель и задачи были последовательно реализованы в

исследовании, что позволило автору прийти к выводам, определяющим научную новизну исследования. Основными результатами диссертации можно считать следующие:

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 внутрирезонаторного 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.
6. 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.

Материалы диссертации соответствуют п. 2 «Процессы генерации и преобразования когерентного оптического излучения, физические методы управления свойствами и параметрами лазерного излучения, включая разработку источников излучения с неклассическими свойствами» Паспорта специальности ВАК РФ 01.04.21 «Лазерная физика».

Все результаты, представленные автором, являются новыми. Достоверность и обоснованность научных положений и выводов базируется на использовании общепринятых физических и математических методов и соответствии литературным данным. Достоверность представленных в работе экспериментальных результатов обеспечена применением высокоточного оборудования, а также подтверждается публикациями в высокорейтинговых изданиях, входящих в перечень ВАК, и апробацией на международных и всероссийских конференциях. Результаты, полученные в диссертации, могут быть использованы в ООО НТО «ИРЭ-Полюс», ООО "СПЕЦИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ. ФОТОНИКА", холдинг «Швабе», Госкорпорация «Росатом» и других предприятиях, которые занимаются изготовлением лазерных источников.

По диссертации М.В. Понариной имеются следующие замечания:

Формальные:

1. Работа не лишена опечаток (пунктуация, пропущенные скобки и т.д.), местами затрудняющих восприятие материала.
2. Не ко всем формулам приведены используемые расшифровки обозначений.
3. Некоторые физические величины обозначены одинаковыми буквами. Например, τ используется как для длительности импульса, так и для времени жизни на верхнем состоянии.

По существу:

1. Продемонстрированы режимы работы созданных лазеров до 10 ГГц на определенных длинах волн и длительностях импульсов. Однако было бы крайне полезно дать рекомендации по возможному дальнейшему улучшению достигнутых параметров или пояснить фундаментальные ограничения, не позволившие достичь этого.

Отмеченные недостатки не снижают научной ценности работы и не влияют на положительную оценку. Диссертация является завершенной научно-квалификационной работой по актуальной тематике и обладает практической ценностью. Автореферат соответствует тексту рукописи и в полной мере отражает содержание диссертации. Основные результаты опубликованы в открытой печати и доложены на российских и международных конференциях.

На основании вышеизложенного можно заключить, что диссертация Понариной Марии Владимировны на тему «Пассивная синхронизация мод со сверхвысокой частотой повторения импульсов в твердотельных волноводных лазерах с использованием графена» полностью отвечает критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в соответствии с п.9 и п.13 Положения, утвержденного Правительством РФ «О присуждении ученых степеней» от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор М.В. Понарина заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – Лазерная физика.

Отзыв на диссертацию обсуждён и одобрен на семинаре физического факультета Университета ИТМО, протокол № 28847 от 14.07.2022 г.

Отзыв составил

Декан факультета фотоники

Профессор, главный научный

сотрудник физического факультета

Руководитель лаборатории гибридной

нанوفотоники и оптоэлектроники

Университета ИТМО

Доктор физико-математических наук

Сделана
подпись Макарова С.В.
подпись

ДИРЕКТОР ОПС
МАКОВА К.Ю.

Макаров



/ С.В. Макаров

Ведущая организация:

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

Почтовый адрес: 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д.49, лит.А.

Телефон: +7 (812) 480-00-00

Адрес электронной почты: od@itmo.ru

Web-сайт организации: <https://itmo.ru/ru/>