

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр "Институт общей физики им.
А.М. Прохорова Российской академии наук"

Научный доклад
по результатам подготовленной научно-квалификационной
работы (диссертации)
Тема: Пассивная синхронизация мод со сверхвысокой частотой
повторения импульсов в твердотельных волноводных лазерах с
использованием графена

Понарина Мария Владимировна

Направление подготовки: 03.06.01 ФИЗИКА И АСТРОНОМИЯ

Специальность: 01.04.21 Лазерная физика

Аспирант _____/ Понарина М.В

Научный руководитель _____/Образцов П.А

Зав. отделом аспирантуры _____/Ракова И.А

Москва 2021

Оглавление

1. Общая характеристика работы.....	3
1.1 Введение.....	3
1.2 Цели и задачи исследования.....	4
1.3 Выносимые на защиту положения.....	5
1.4 Научная новизна.....	6
1.5 Практическая значимость.....	7
2. Методы исследования.....	8
3. Основные результаты.....	9
3.1 Создание компактного Nd: YAG лазера с волноводными структурами диаметром 30 мкм	9
3.1.1 Исследование режимов генерации в Nd: YAG лазере с волноводными структурами диаметром 30 мкм	11
3.1.2 Расчет параметров внутрирезонаторного интерферометра	15
3.2 Создание компактного Nd: YAG лазера с волноводными структурами диаметром 20 мкм и одномодовым излучением накачки.....	19
3.2.1 Исследование влияния поляризации излучения накачки на выходные характеристики волноводного Nd: YAG лазера	20
4. Апробация работы.....	31
5. Список публикаций, опубликованных по теме диссертации.....	32
6. Список литературы.....	33

1. Общая характеристика работы

1.1. Введение

Лазеры ультракоротких импульсов (УКИ) являются широко распространенными источниками для различных применений в таких областях, как фундаментальные исследования, измерение динамики химических реакций, микрообработка материалов и медицина [1-5].

Лазеры УКИ можно разделить на категории по частоте повторения импульсов. На лазерах с низкой частотой повторения импульсов (КГц-МГц) получают очень высокие энергии, что делает их привлекательными для таких приложений, как ускорение частиц, генерация ультрафиолетового излучения и физика плазмы [6]. Частоты повторения импульсов порядка 100 МГц с фемтосекундной длительностью достигаются с помощью Ti: Sa лазеров [7, 8] и различных объемных лазерных систем, легированных ионами Yb [9–11], которые являются широко востребованными для большого количества технологических приложений, таких как оптическая метрология [12], оптическая когерентная томография [4] и нелинейная микроскопия [13]. Сверхбыстрые лазеры, работающие в режиме синхронизации мод, с частотой повторения более 1 ГГц находят множество применений в таких областях, как телекоммуникации, нелинейная микроскопия и метрология оптических частот [14-17].

Кубические кристаллы, такие как алюмо-иттриевые гранаты, являются привлекательными материалами для твердотельных лазеров из-за их простой кристаллической структуры, высокой теплопроводности и небольшого теплового расширения. Nd: YAG является наиболее распространенным в исследовательских и коммерческих целях, излучающим на длинах волн 940, 1120, 1064 и 1440 нм в непрерывном и импульсном режимах.

Генерация лазера может быть как в непрерывном, так и в импульсном режиме. Для получения генерации коротких и энергичных лазерных

импульсов используется методика синхронизации мод.

Существуют два метода получения синхронизации мод: активная или пассивная. Активные элементы модулируют интенсивность излучения в резонаторе и преобразуют акустическую, электрическую или механическую модуляцию в оптическую. Вторым способом генерации лазерных импульсов — это пассивное переключение добротности, в котором для оптической модуляции используются пассивные материалы, а именно медленные насыщающиеся поглотители (НП). В последние годы особое внимание привлекают новые насыщающиеся поглотители на основе наноматериалов. Хорошими примерами являются НП на основе углеродных наноструктур, таких как графен, однослойные или многослойные углеродные нанотрубки (ОУНТ, МУНТ) и т.д. [18-22]. Эти материалы имеют быстрое время релаксации, низкую интенсивность насыщения и высокие пороги разрушения. Благодаря своим уникальным оптическим и электронным свойствам, графен обладает сверхбыстрой скоростью релаксации в широком спектральном диапазоне. В частности, из-за малой толщины и возможности нанесения графена непосредственно на оптический элемент этот насыщающийся поглотитель особенно перспективен для разработки миниатюрных лазерных систем.

Геометрия лазерного резонатора играет важную роль в достижении желаемых результатов: должна обеспечивать надежность, простоту, компактность. Одной из таких систем является лазер, резонатор которого состоит из двух плоскопараллельных зеркал частично или полностью заполненный активной средой. Важной особенностью концепции миниатюрного лазера являются термооптические свойства лазерного материала. Волноводная структура, созданная внутри активной среды, помогает стабилизировать режим работы лазера, предотвратить образование термо-линзы и нестабильность режима модуляции добротности резонатора.

Таким образом, сочетание волноводной технологии и графена создает

универсальный подход для разработки новых твердотельных компактных лазеров с высокой частотой повторения ультракоротких импульсов [23,24].

1.2. Цели и задачи исследования

Целью диссертационного исследования было проведение комплексных исследований режимов генерации в компактных волноводных лазерах на основе твердотельных активных сред, работающих в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне длин волн и получение стабильного режима пассивной синхронизации мод со сверхвысокой частотой повторения за счет использования двумерных материалов в качестве насыщающихся поглотителей.

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.

1.3. Выносимые на защиту положения

1. Графен, нанесенный на выходное зеркало компактного волноводного

Nd: YAG лазера, обеспечивает пассивную синхронизацию мод с гигагерцовой частотой повторения импульсов.

2. В компактном волноводном Nd: YAG лазере изменение ширины воздушного зазора между торцом волновода и выходным зеркалом с графеном позволяет перестраивать длину волны генерации в режиме пассивной синхронизации мод и частоту повторения импульсов.

3. В волноводном Nd: YAG лазере, работающем в режиме пассивной синхронизации мод, с насыщающимся поглотителем на основе графена изменение длины волны и поляризации излучения накачки приводят к переключению между одно- и двухволновым режимами генерации на длинах волн 1061 и 1064 нм.

4. Подход, основанный на использовании волноводных структур внутри твердотельных активных сред и насыщающегося поглотителя на основе графена, является универсальным для создания компактных лазеров с гигагерцовой частотой повторения ультракоротких импульсов, работающих в широком спектральном диапазоне.

1.4. Научная новизна

- 1) Впервые экспериментально получен режим пассивной синхронизации мод за счет насыщающегося поглотителя на основе однослойного графена при одновременной генерации на длинах волн 1061.58 и 1064.55 нм с помощью контроля внутрирезонаторных потерь в волноводном Nd: YAG лазере.
- 2) Впервые экспериментально получен режим пассивной синхронизации мод за счет насыщающегося поглотителя на основе однослойного графена на длине волны 1061.58 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 внутри резонатора.

- 4) Впервые продемонстрирована возможность переключения между одно- (1064.18 нм) и двухволновым (1061.58 нм + 1064.55 нм) режимом работы волноводного Nd: YAG лазера с помощью контроля параметров излучения накачки и точной настройки внутрирезонаторных потерь, не увеличивая габариты системы.

1.5. Практическая значимость

Полученные в работе результаты могут быть использованы для:

- создания компактных лазерных источников с частотой повторения импульсов более 1 ГГц, оптический спектр излучения которых представляет собой набор эквидистантных линий;
- использования разработанного волноводного Nd:YAG лазера в качестве задающего источника для волоконно-оптических систем;
- создания лазерного источника с перестраиваемой частотой;
- генерации терагерцового излучения на разностной частоте между длинами волн 1061.58 нм и 1064.18 нм;
- применения разработанного подхода для других активных сред со сложным профилем усиления.

2. Методы исследования

Для выполнения исследований в ходе диссертационной работы использовались следующие методы:

1. Применение подхода, основанного на использовании волноводных структур внутри активной среды и графена в качестве насыщающегося поглотителя, для создания волноводного Nd:YAG лазера с гигагерцовой частотой повторения пикосекундных импульсов.
2. Определение характеристик волноводных структур внутри кристалла Nd:YAG методом фемтосекундной лазерной записи. Чтобы обеспечить существование только основной моды генерируемого излучения, предлагается использование технологии записи волновода в объеме кристалла с помощью нанесения контура волновода в виде параллельных треков (линий) уменьшенного показателя преломления, в зависимости от энергии фемтосекундного импульса и концентрации легирующих примесей в кристалле.
3. Нанесение одноатомного слоя графена методом химического осаждения из газовой фазы (CVD) на медной фольге с последующим травлением и осаждением на выходные зеркала с различными коэффициентами пропускания выходного излучения.
4. Измерение и контроль параметров выходного импульсного излучения осуществлялся с помощью сверхбыстрого фотодиода (ДИЛАЗДФДМШ 40-16, полоса пропускания 16 ГГц) и скоростного осциллографа (Tektronix DPO 71604C, полоса пропускания 16 ГГц). Контроль модового и спектрального состава осуществлялся с помощью CCD камеры и анализатора спектра (ANDO AQ6317B, разрешение 0.01 нм). Радиочастотные спектры были получены с помощью Agilent N9020A со спектральным разрешением 2 Гц.
5. Подбор оптимального коэффициента пропускания выходного зеркала с нанесенным насыщающимся поглотителем на основе графена для получения режима непрерывной синхронизации мод.

3. Основные результаты

3.1 Создание компактного Nd: YAG лазера с волноводными структурами диаметром 30 мкм

В ходе диссертационной работы был создан твердотельный волноводный Nd: YAG лазер, работающий в режиме пассивной синхронизации мод на основе графена. Схема данного лазера показана на рисунке 1.

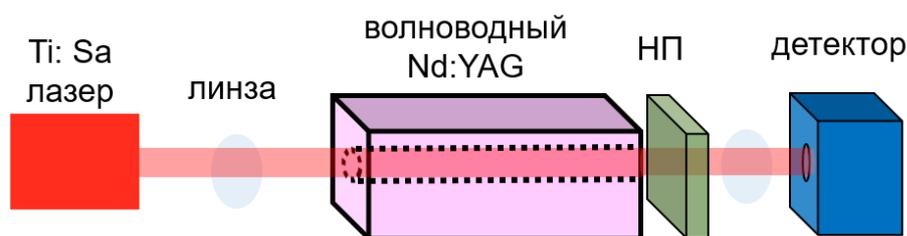


Рис. 1. Экспериментальная схема волноводного Nd: YAG лазера

В данной схеме для накачки активного элемента используется излучение непрерывного Ti: Sa лазера с центральной длиной волны 808 нм и средней мощностью 600 мВт. Излучение накачки фокусируется в волноводную структуру, созданную внутри кристалла Nd: YAG (1 ат.%) методом прямой записи пучком фемтосекундного лазера [25]. Волновод трубчатого типа с оболочкой пониженного показателя преломления и диаметром сердцевины 30 мкм записан пучком фемтосекундного лазера, излучающего импульсы длительностью 180 фс на длине волны 1030 нм. Лазерный пучок фокусировался в объёме кристалла Nd: YAG на глубине около 200 мкм объективом с числовой апертурой $NA=0,65$ и цилиндрической линзой с фокусным расстоянием $f = -400$ мм, помещённой непосредственно перед объективом по ходу пучка. Таким образом, после объектива создавался астигматичный пучок с двумя эллиптическими в поперечном сечении пучка перетяжками и соотношением большой и малой осей эллипса около 10. Образец помещался на прецизионный подвижный трёх-координатный стол фирмы Aerotech, и сканировался относительно перетяжки пучка, в результате чего в образце оставался след уменьшенного показателя преломления (трек)

на величину $5 \cdot 10^{-3}$. Запись проводилась перетяжкой ближайшей к объективу, а дальняя перетяжка не производила никакой модификации кристалла, потому что энергия импульса в этой перетяжке была уже ниже порога модификации. Большая ось эллиптической перетяжки была ориентирована вдоль сканирования, то есть была параллельна записываемому треку. Поляризация была перпендикулярна направлению сканирования.

Оболочка волновода сформирована 32 параллельными треками, расположенных по образующей цилиндра, при этом сердцевина осталась нетронутой областью кристалла.

Кристалл с записанным волноводом был отождён на воздухе при температуре 1200°C в течении 24 часов, чтобы уменьшить механические напряжения, возникшие в процессе записи в областях, прилегающих к трекам. Затем торцы кристалла полировались по лазерному качеству чистоты и плоскостности. На один из торцов было нанесено диэлектрическое дихроичное зеркало, с коэффициентом отражения более 99.8% в области 1000- 1100 нм, и менее 4% в области накачки (790-820 нм).

Плоскопараллельный резонатор образован двумя зеркалами: дихроичным зеркалом, нанесенным на входной торец кристалла, и выходным зеркалом с коэффициентом отражения 98% на длине волны 1064 нм. Элементом, обеспечивающим пассивную синхронизацию мод, является насыщающийся поглотитель (НП) на основе графена, нанесенный непосредственно на выходное зеркало резонатора. Для прецизионного контроля длины резонатора выходное зеркало с графеном оснащено пьезоэлектрическим элементом.

Для изготовления насыщающегося поглотителя одноатомный слой углерода (графен) [26] был синтезирован методом химического осаждения из газовой фазы (CVD) на медной фольге с последующим травлением и осаждением на зеркало [27].

На рисунке 2 представлены (а) микрофотография торца кристалла с записанным волноводом и (б) профиль пучка, демонстрирующий модовый состав излучения в волноводе (генерация на основной поперечной моде).

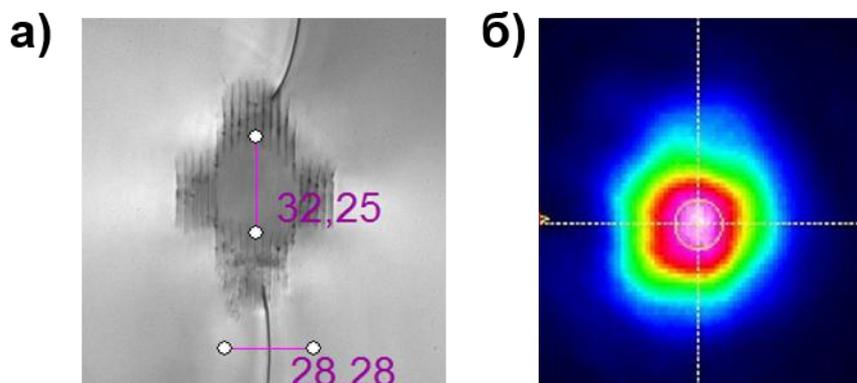


Рис. 2. (а) Микрофотография волновода, (б) профиль пучка, демонстрирующий модовый состав излучения в волноводе.

3.1.1 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 с длиной ~ 8.4 мм обеспечивает частоту повторения импульсов ~ 9.8 ГГц. Для точной подстройки длины резонатора выходное зеркало было оснащено пьезоэлементом, который осуществлял перемещение в диапазоне 2 мкм, соответственно, перестройку частоты с точностью до единиц МГц.

На рисунке 3 представлены (а) осциллограмма выходного излучения, (б) радиочастотный и (в) оптический спектры волноводного Nd: YAG лазера, измеренные с помощью анализатора оптического и радиочастотного спектра, соответственно. Средняя мощность выходного излучения 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 [28]. Длительность полученных импульсов составила менее 20 пс.

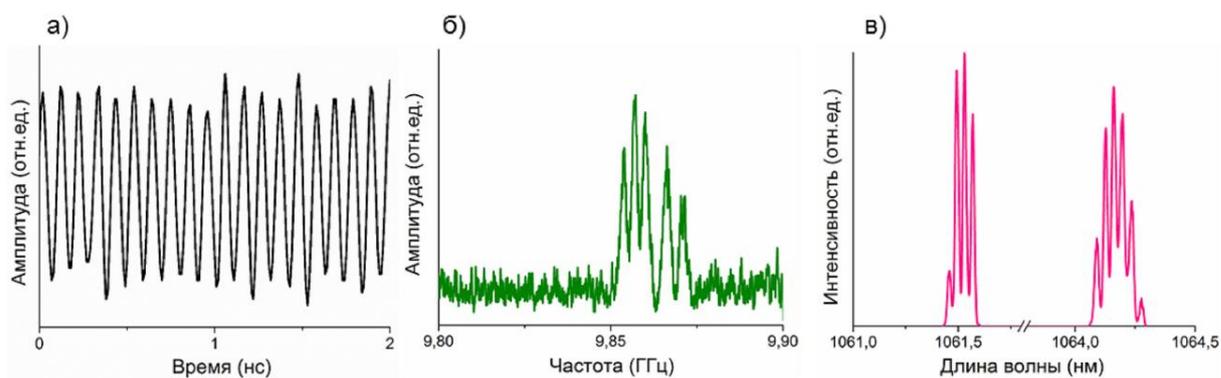


Рис. 3. (а) Осциллограмма выходного излучения лазера, (б) радиочастотный и (в) оптический спектры

На рисунке 3 (а) наблюдается модуляция мощности выходного излучения, которая приводит к дополнительным линиям в радиочастотном спектре (рис. 3 (б)). При этом, из рис. 3 (в) видно, что в оптическом спектре присутствует генерация на двух длинах волн (1061.58 и 1064.18 нм). Благодаря высокому разрешению анализатора оптического спектра, в спектрах генерации наблюдается прорезания, соответствующие продольным модам.

Аналогичный вид осциллограммы и спектров выходного излучения наблюдался при различной длине резонатора. С помощью точной подстройки выходного зеркала пьезоэлементом не удавалось получить одну спектральную составляющую в радиочастотном спектре в окрестности 10 ГГц.

В Nd: YAG вблизи $1 \mu\text{m}$ существует несколько энергетических переходов, соответствующих длинам волн 1061.58 (9420 cm^{-1}), 1064.18 (9397 cm^{-1}) и 1064.55 нм (9394 cm^{-1}) [29]. Экспериментально полученный спектр выходного излучения соответствует генерации на переходах с подуровней R_1 и R_2 энергетического уровня ${}^4F_{3/2}$ в ионе Nd^{3+} на расщепленный уровень ${}^4I_{11/2}$ (отмечены на рис.4). На рисунке 4 представлен измеренный спектр люминесценции кристалла Nd: YAG.

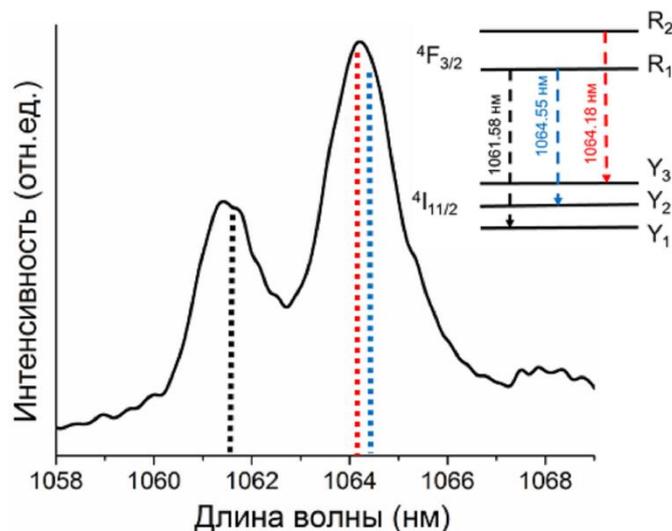


Рис. 4. Спектр люминесценции кристалла Nd: YAG и схема энергетических переходов, соответствующие длинам волн 1061.58, 1064.18, 1064.55 нм

Полученный спектр люминесценции демонстрирует различие между интенсивностями пиков для лазерных переходов, соответствующим длинам волн 1061.58, 1064.18 и 1064.55 нм. Сечение перехода $R_2 \rightarrow Y_3$ на длине волны 1064.18 нм - $\sigma_{1064.18} = 45.8 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$. Переход на $\lambda = 1061.58$ нм ($\sigma_{1061.58} = 22.8 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$) имеет общий верхний уровень R_1 с переходом на $\lambda = 1064.55$ нм ($\sigma_{1064.55} = 8.1 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$) [20]. 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.

В представленной конструкции лазера, внутрирезонаторный интерферометр образуется между непросветленным торцом активного кристалла и выходным зеркалом (рис. 5).

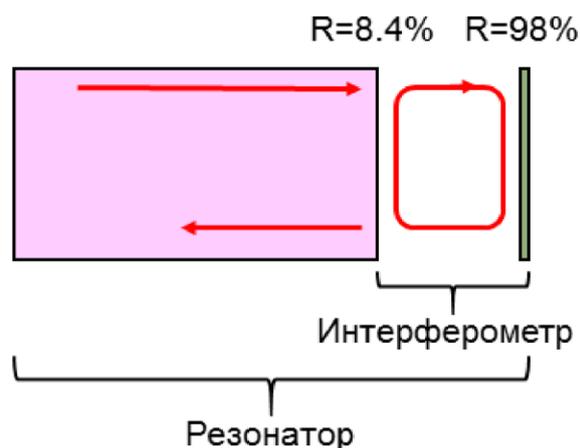


Рис. 5. Схема резонатора волноводного Nd: YAG лазера с образованным воздушным интерферометром

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.

Как уже было сказано выше, подстройка ширины интерферометра с помощью пьезоэлемента не обеспечивает одинаковый период следования импульсов с различными длинами волн. Поэтому для выделения излучения одной компоненты генерации (1061 или 1064 нм) использовался оптический фильтр, расположенный вне резонатора. В работе использовался перестраиваемый в диапазоне длин волн от 1040 до 1080 нм фильтр (OF-LINK TOF-1064) с шириной полосы пропускания 1 нм и диаметром входного волокна 6 мкм.

На рисунке 6 приведены (а) осциллограмма, (б) радиочастотный и (в) оптический спектры выходного излучения лазера, отфильтрованного на длине волны 1061 нм.

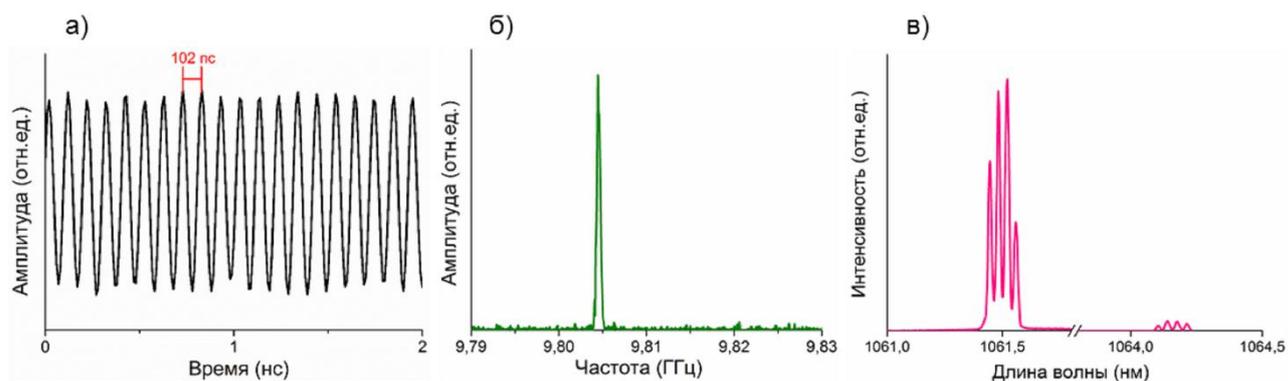


Рис. 6. (а) Осциллограмма выходного излучения лазера после прохождения оптического фильтра, (б) радиочастотный и (в) оптический спектры

После прохождения оптического фильтра, как показано на рисунке 6, 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 [30]. Используя данный волноводный Nd: YAG лазер в качестве задающего генератора для волоконного Yb усилителя [31,32], выходная мощность составила 530 мВт. При выделении излучения на длине волны 1064 нм радиочастотный спектр содержит набор неэквидистантных линий (спектр имеет вид аналогичный радиочастотному спектру, полученному на рис. 3 (б), по-видимому, связанных с неполной синхронизацией мод.

3.1.2 Расчет параметров внутрирезонаторного интерферометра

Для исследования возможных режимов работы созданного волноводного лазера был проведен расчет параметров внутрирезонаторного интерферометра.

Коэффициент отражения интерферометра:

$$R = 1 - \frac{(1-r_1)(1-r_2)}{(1-\sqrt{r_1 r_2})^2 + 4\sqrt{r_1 r_2} \left(\sin \left[\pi \frac{lgap}{\lambda} \right] \right)^2}, \quad (1)$$

где $r_1 = 8.44\%$ - коэффициент отражения торца кристалла Nd: YAG, $r_2 = 98\%$ - коэффициент отражения выходного зеркала, l_{gap} - ширина интерферометра.

Зависимость логарифмических потерь $g_{losses} = -\ln R$ от ширины интерферометра для длин волн 1061 и 1064 нм показана на рис.7(а).

Для выполнения условия двухволновой генерации необходимо, чтобы потери, вносимые интерферометром, на длине волны 1064 превышали потери на 1061 нм. Представленная на рис. 7 (а) периодическая зависимость потерь (g_{losses}) показывает возможность генерации на двух длинах волн.

Дисперсия групповых скоростей, вносимая интерферометром:

$$GDD = 2\pi \left(2 \frac{l_{gap}}{c}\right)^2 \frac{(r_1^2 - 1) 2r_1 \sin\left[4\pi \frac{l_{gap}}{\lambda}\right]}{\left(1 - r_1^2 - 2r_1 \cos\left[4\pi \frac{l_{gap}}{\lambda}\right]\right)^2}. \quad (2)$$

Соответствующая групповая задержка, вносимая интерферометром:

$$t = \int GDD = \left(2 \frac{l_{gap}}{c}\right) \times \frac{r_1^2 - 1}{\left(r_1^2 - 1 + 2r_1 \cos\left(4\pi \frac{l_{gap}}{\lambda}\right)\right)}. \quad (3)$$

На рис. 7 (б) представлена периодическая зависимость групповой задержки от ширины интерферометра, рассчитанная для продольных мод излучения в окрестностях длин волн 1061 и 1064 нм.

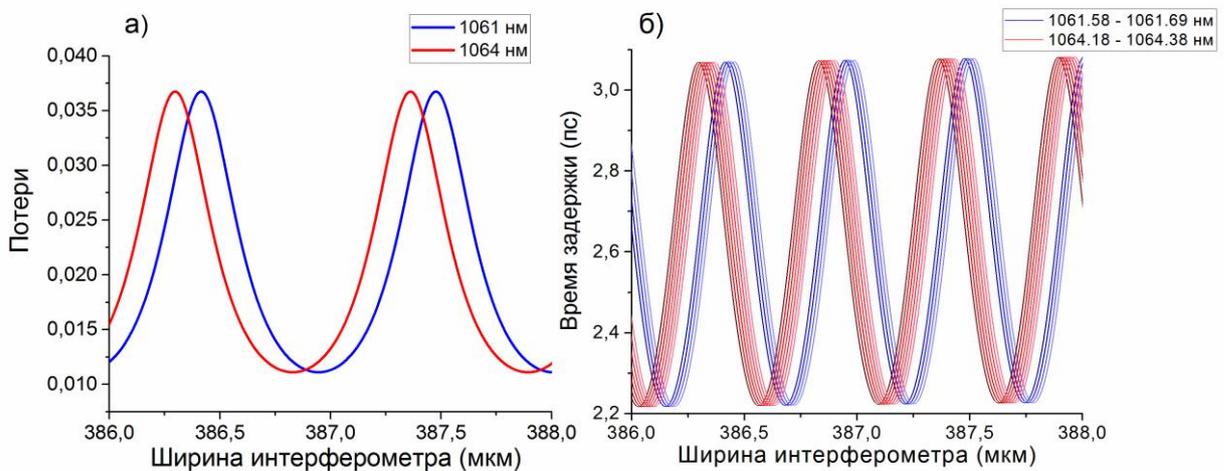


Рис. 7. (а) Изменение потерь в резонаторе, вносимых интерферометром, (б) временная задержка для продольных мод на длинах волн 1061 и 1064 нм в зависимости от ширины интерферометра в диапазоне 386 – 388 мкм

На основе полученных данных была рассчитана зависимость частоты повторения импульсов с учетом распределения продольных мод на длинах волн 1061 и 1064 нм (рис. 8). Также был выбран диапазон ширины интерферометра, при котором выполняется условие двухволновой генерации, например, при ширине интерферометра в области 387 мкм.

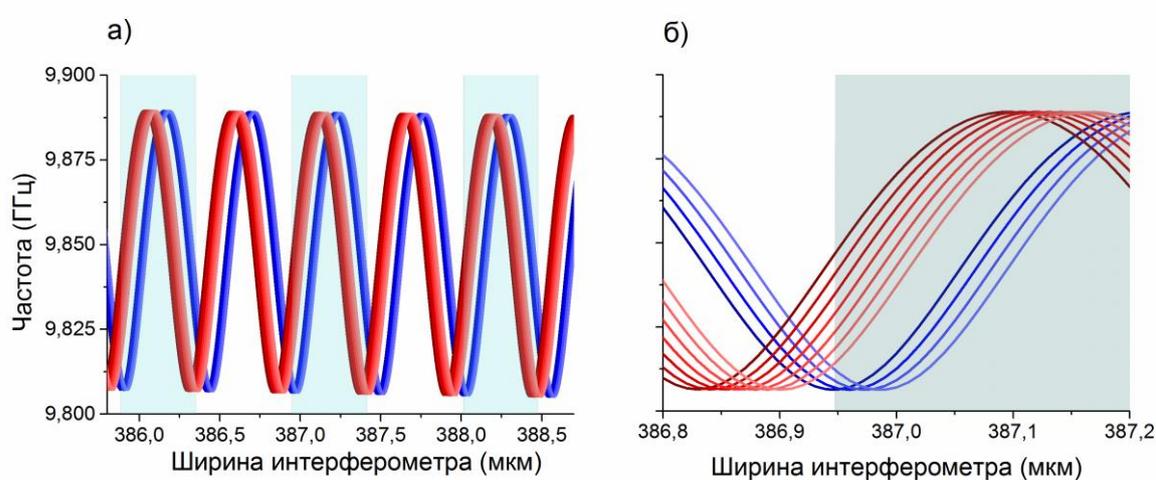


Рис. 8. Зависимость частоты повторения импульсов с учетом распределения продольных мод на длинах волн 1061 и 1064 нм от ширины интерферометра. Голубым отмечены положения, при которых внутрирезонаторные потери на длине волны 1064 нм превышают потери на длине волны 1061 нм.

При ширине 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.

На рисунке 9 представлены экспериментальные радиочастотные спектры, полученные при выделении излучения на длинах волн 1061 нм и

1064 нм, и частоты повторения импульсов, рассчитанные при ширине интерферометра равной 386.97 мкм и 397.0 мкм.

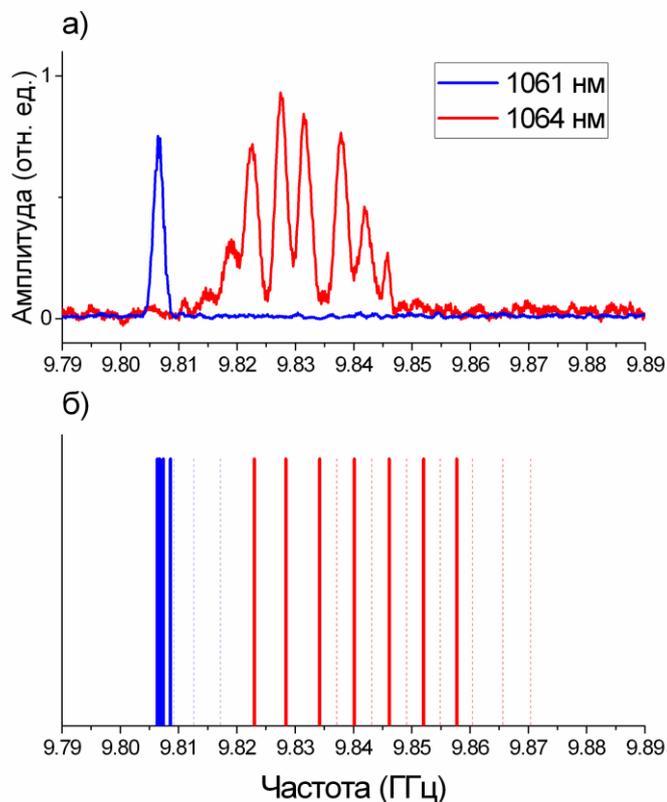


Рис. 9. (а) Сравнение положения пиков радиочастотных спектров, полученных в эксперименте, и (б) рассчитанных для двух различных положений выходного зеркала. Сплошными линиями обозначены частоты, соответствующие ширине интерферометра 386.97 мкм, пунктирными - 387.00 мкм.

Частоты повторения, рассчитанные для интерферометра с шириной 386.97 мкм, хорошо согласуются с радиочастотным спектром, полученным в эксперименте. При этом увеличение ширины интерферометра всего на 0.03 мкм дает значительное изменение рассчитанных частот. Совпадение рассчитанных частот на длине волны 1061 нм создает условие для синхронизации мод, что и наблюдалось в эксперименте (рис.б). 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 и возможность перестройки между ними.

3.2 Создание компактного Nd: YAG лазера с волноводными структурами диаметром 20 мкм и одномодовым излучением накачки

Как было сказано выше, чтобы получить стабильную серию пикосекундных импульсов, необходимо было изолировать одну длину волны с помощью оптического фильтра вне резонатора. Используя этот подход, в волноводном лазере Nd: YAG была получена пассивная синхронизация мод на длине волны 1061 нм с частотой следования импульсов 9,8 ГГц и длительностью импульса менее 20 пс. Однако использование дополнительных элементов вне резонатора существенно усложняет оптическую схему и не обеспечивает компактность устройства. Поэтому 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 новые одномодовые волноводы с диаметром сердцевины 20 мкм. На рис. 10 показана новая экспериментальная схема Nd: YAG лазера, микрофотография волноводной структуры и распределение интенсивности лазерного излучения внутри волновода.

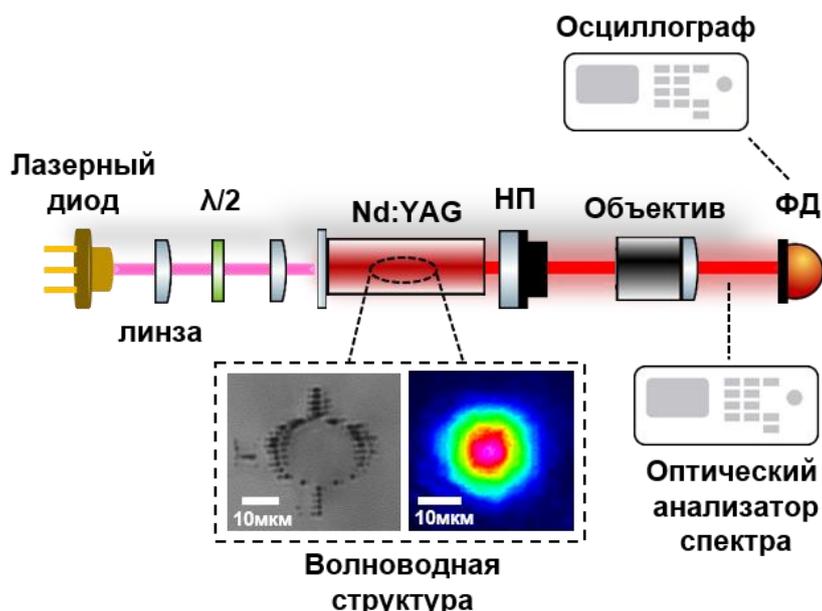


Рис. 10. Компактный Nd: YAG лазер с одномодовыми волноводными структурами диаметром 20 мкм: НП – выходное зеркало с нанесенным насыщающимся поглотителем на основе графена, ФД – фотодиод.

Накачка активного элемента осуществляется непрерывным одномодовым диодным лазером (Thorlabs LD808-SE500) с длиной волны 808 нм и максимальной выходной мощностью 500 мВт. Эффективность ввода излучения накачки в волноводную структуру составила 20%. Резонатор образован двумя плоскими зеркалами, перпендикулярными волноводу: дихроичным зеркалом в диапазоне 1060–1070 нм, нанесенным на торец кристалла, и выходным зеркалом ($R = 99\%$) с нанесенным насыщающимся поглотителем на основе графена.

3.2.1 Исследование влияния поляризации излучения накачки на выходные характеристики волноводного Nd: YAG лазера

Алюмо-иттриевый гранат (YAG) имеет кубическую симметрию и, таким образом, является оптически изотропным в ненапряженном состоянии [33]. Как правило, волноводы с трубчатой оболочкой, вписанные в Nd: YAG, должны поддерживать почти идентичное направление поляризации основной моды излучения, сохраняющие исходную поляризацию излучения накачки

после распространения по волноводу. Однако механические напряжения, сопровождающие процесс записи (особенно в волноводах меньшего диаметра), может повлиять на распределение показателя преломления внутри сердцевинны волновода, что, в свою очередь, приведет к поляризационным потерям и эффектам деполяризации [34,35]. С другой стороны, индуцированная накачкой анизотропия усиления может проявляться в зависимости порогов генерации и интенсивности поляризационных мод от ориентации поляризации накачки [36]. Таким образом, поляризация накачки дает еще одну степень свободы для управления характеристиками генерации миниатюрных волноводных лазеров.

Чтобы выяснить, вносит ли волноводная структура какую-либо поляризационную анизотропию в активную среду, в оптическую схему была интегрирована полуволновая пластина (обозначена $\lambda / 2$ на рис. 10) для управления поляризацией излучения лазерного диода, используемого для накачки волноводной структуры. На рисунке 11 (а) приведено сравнение состояния поляризаций низкоинтенсивного излучения накачки с длиной волны 808 нм, прошедшего через структуру волновода, с излучением накачки, прошедшем через исходную часть кристалла Nd: YAG (то есть вне волновода) для двух ориентаций полуволновой пластины (0° и 45°), соответствующим горизонтально и вертикально поляризованному излучению. Измерения показывают, что структура одномодового волновода незначительно ($\rho \approx 0,2$) деполяризует свет накачки на длине волны 808 нм, в то время как ориентация поляризации излучения, прошедшего через исходную часть кристалла Nd: YAG, остается неизменной.

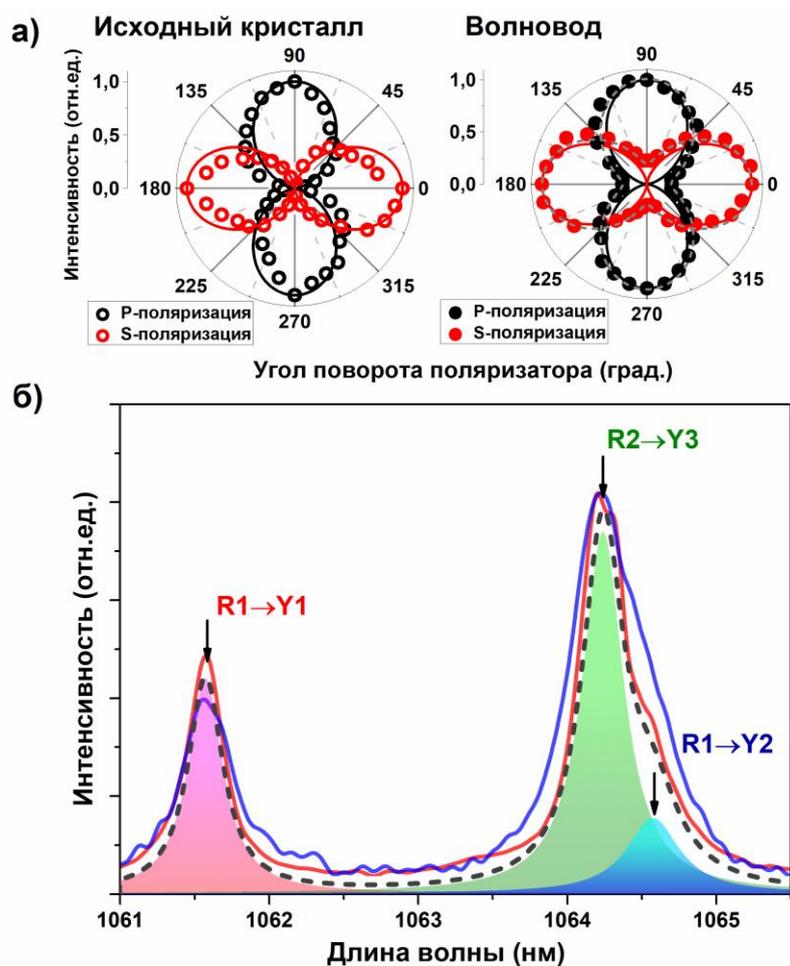


Рис. 11. (а) Зависимости прошедшего излучения накачки от угла поляризатора, расположенного после кристалла $Nd: YAG$, полученные при горизонтальной (красная кривая) и вертикальной (черная кривая) поляризации накачки: справа - в исходной области $Nd: YAG$, слева - в волноводной структуре. (б) Спектры люминесценции, полученные экспериментально в волноводной структуре (красная кривая), в исходной области $Nd: YAG$ (синяя кривая). Суммарная кривая рассчитанных спектров люминесценции соответствует длинам волн 1061,58 нм (розовая область), 1064,18 нм (зеленая область) и 1064,55 нм (синяя область) в волноводной структуре (штрих-черная кривая). На вставке показаны все кристаллографические направления кристалла $Nd: YAG$ (излучение накачки распространяется по кристаллографической оси [320]).

Затем было проведено сравнение спектров люминесценции, полученных при распространении излучения накачки через исходную область Nd: YAG и волноводную структуру при горизонтально и вертикально поляризованной маломощной (12 мВт) накачке (рис. 11 (б)). В полученных спектрах отчетливо видны несколько пиков интенсивности, соответствующих люминесценции ионов Nd^{3+} при переходах с подуровней R_1 и R_2 энергетического уровня ${}^4F_{3/2}$ на подуровни Y_1 - Y_3 ${}^4I_{11/2}$. Более того, распределения интенсивности в обоих спектрах соответствуют сечениям переходов (выделенные области на рис. 11 (б)) и не зависят от поляризации излучения накачки.

Таким образом, структура одномодового волновода обеспечивает одинаковое направление распространения поляризованного излучения накачки на длине волны 808 нм, но слегка деполяризует проходящее излучение. Полученные данные свидетельствуют о сохранении объемных свойств Nd: YAG внутри волноводной структуры.

Для исследования характеристик генерации внутри волноводной структуры была увеличена мощность накачки. На рис. 12 представлены спектры выходного излучения волноводного Nd: YAG лазера, полученные при мощности накачки ниже порога генерации. Как и ожидалось, измерения демонстрируют сужение спектра и хорошо разрешенные продольные моды с одинаковыми интервалами, характерными для усиленного спонтанного излучения (УСИ). Этот результат подтверждает обратную связь с резонатором и позволяет оценить его длину. Измеренные межмодовые расстояния 36 пм соответствуют резонатору длиной 8,63 мм. Как показано на рисунке 12, соотношение пиков интенсивности в спектрах УСИ сильно зависит от ориентации пластины $\lambda/2$ (в отличие от данных спонтанной люминесценции, показанных на рисунке 11).

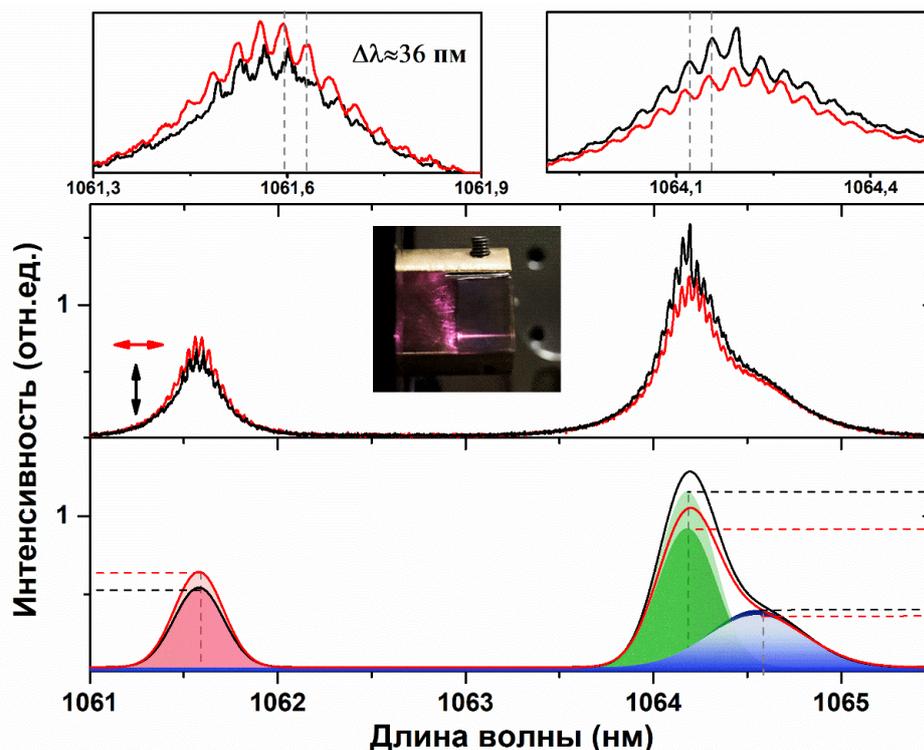


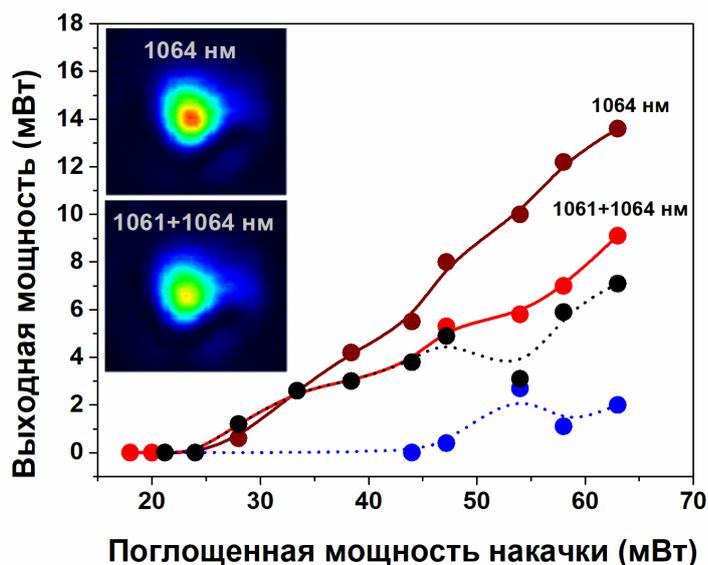
Рис. 12. (а) Спектры усиленного спонтанного излучения, полученные при горизонтальной (красный) и вертикальной (черный) поляризации накачки. Измеренное межмодовое расстояние составляет 36 нм. На вставке представлена фотография кристалла с проходящим через волновод излучением накачки (серые стрелки соответствуют ориентации поляризации накачки). (б) Рассчитанные спектры люминесценции соответствуют длинам волн 1061.58 нм (розовая область), 1064.18 нм (зеленая область) и 1064.55 нм (синяя область) при горизонтальной (красная кривая) и вертикально (черная кривая) поляризованной накачке в волноводной структуре.

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. В данной схеме использовался очень чувствительный лазерный диод, поэтому даже незначительное обратное отражение изменяет режим его генерации. Этот эффект демонстрирует

исключительную чувствительность усиления в волноводе к параметрам накачки (таким как длина волны, поляризация, положение и размер луча). Управление этими параметрами должно позволить переключаться между режимами генерации на нескольких лазерных переходах в кристалле Nd:YAG. При повороте пластины $\lambda/2$ на 0° спектры усиленного спонтанного излучения на длинах волн 1061 и 1064 нм становятся сопоставимы. Исходя из этого, можно предположить, что при повышении мощности горизонтально поляризованной накачки возможно осуществить одновременную генерацию на нескольких энергетических переходах, соответствующих длинам волн 1061,58, 1064,18 и 1064,55 нм.

На рис. 13 показаны зависимости одно- (1064 нм) и двухволнового (1061 + 1064 нм) режимов генерации от поглощенной мощности горизонтально поляризованного излучения накачки. Распределение мощности между двумя лазерными переходами рассчитывалось пропорционально площадям спектров для каждой длины волны. В соответствии с данными УСИ получена генерация в двухволновом режиме с порогом генерации 44 мВт.

а)



б)

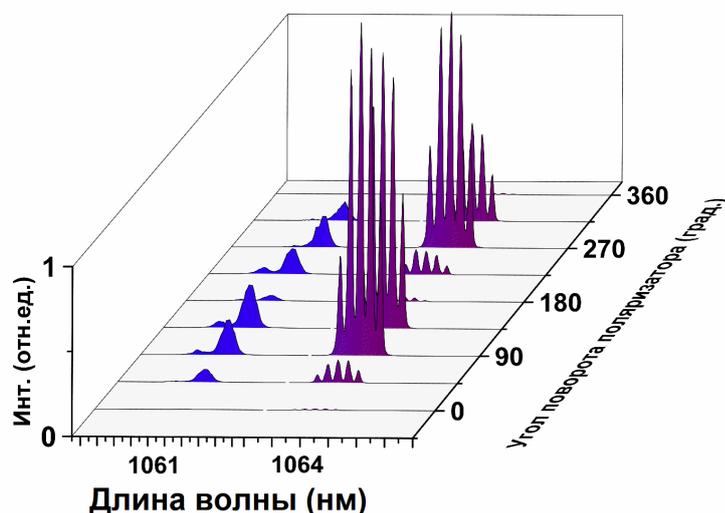


Рис. 13. (а) Зависимости выходной мощности при одно- (коричневая кривая) и двухволновой (красная кривая) генерации, полученные при горизонтальной поляризации накачки и распределение выходной мощности между 1061 (штрих-синяя кривая) и 1064 нм (штрих-черная кривая) при двухволновом режиме, (б) зависимости выходных оптических спектров от угла поворота поляризатора, установленного после кристалла Nd: YAG.

Полученное распределение мощности между длинами волн 1061 и 1064 нм при двухволновой генерации в основном связаны с эффектами, вызванными излучением накачки. Данные эффекты возникают из-за высокой

интенсивности накачки ($I_{\max} = 24 \text{ кВт/см}^2$), которая вызывает тепловое расширение кристалла Nd: YAG. По мере расширения кристалла расстояние между кристаллом и выходным зеркалом уменьшается. Это изменяет количество продольных мод в полосе усиления, соответственно сдвигая оптические спектры выходного излучения.

Поляризация выходного излучения лазера как на длине волны 1061 нм, так и на длине волны 1064 нм всегда ориентирована вертикально (с небольшой деполяризацией) и не зависит от параметров накачки. Вертикальная поляризация выходного излучения определяется разностью потерь между вертикальной и горизонтальной поляризациями в волноводе на длине волны около 1 мкм и зависит от кристаллографической ориентации.

Таким образом, полученные зависимости мощности выходного излучения от поглощенной мощности накачки хорошо согласуются со спектрами усиленной спонтанной люминесценции и подтверждают возможность одно- (1064) и двухволновой (1061 + 1064) генерации в волноводном Nd: YAG лазере.

На рис. 14 показаны оптические спектры, осциллограммы и радиочастотные спектры выходного излучения волноводного лазера в зависимости от ширины интерферометра, полученные при горизонтально поляризованном излучении накачки ($P_{\text{pump}} = 63 \text{ мВт}$). Осциллограммы и радиочастотные спектры были получены с помощью осциллографа с полосой пропускания 16 ГГц. Как видно из рис. 14 (а), согласно спектрам УСИ, в резонаторе всегда имеется несколько продольных мод, соответствующих различным переходам в Nd: YAG лазере. Изменение ширины интерферометра приводит к периодическому изменению внутрирезонаторных потерь. Когда усиление моды превышает уровень потерь в резонаторе, она может в нем колебаться. Таким образом, в зависимости от размера воздушного зазора можно получить генерацию

одного или нескольких цугов импульсов в режиме синхронизации мод с периодами ~ 105 пс (частота повторения в диапазоне 9,5 ГГц) [37]. Радиочастотный спектр содержит одну или несколько компонент, соответствующих генерации на одной или нескольких длинах волн. В частности, при двухволновой генерации лазер, работающий в режиме пассивной синхронизации мод, излучает серию импульсов с центрами на длинах волн 1061.58 нм и 1064.55 нм, соответствующие переходам с общего верхнего уровня R_1 на Y_2 и Y_3 (см. рис. 11). Интерференция между этими цугами, имеющими несколько разную частоту повторения, приводит к частоте биений 40 МГц (рис. 14 (в)). В одноволновом режиме непрерывная синхронизация мод реализуется на длине волны 1064.18 нм (рис. 14 (б)). Генерация на длине волны 1061.58 нм возможна только путем выделения с помощью дополнительного фильтра от выходного сигнала с двумя длинами волн из-за меньшего поперечного сечения усиления, чем у 1064.18 нм.

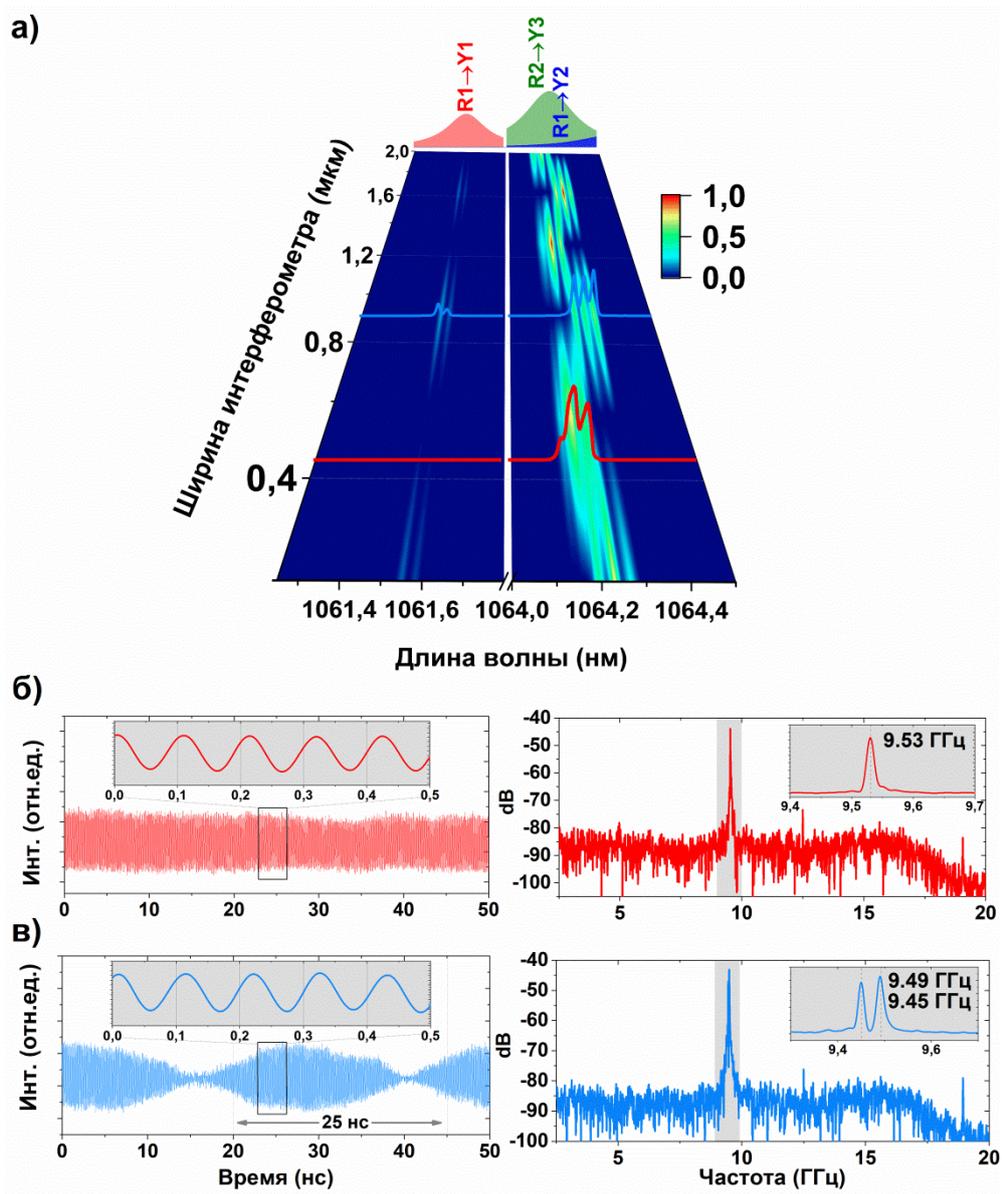


Рисунок 5. (а) Зависимость выходных оптических спектров от ширины интерферометра (от 0 до 2 мкм) и распределение лазерных переходов в оптических спектрах (красный спектр – 1064.18 нм, синий спектр – 1061.58 и 1064.55 нм), (б) осциллограммы сигналов, полученные при генерации в режиме пассивной синхронизации 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.

Следовательно, в зависимости от воздушного зазора между торцом кристалла и выходным зеркалом волноводный Nd: YAG лазер работает в

режиме непрерывной синхронизации мод на одной, двух или нескольких длинах волн.

Заключение

На основе волноводных структур в кристалле Nd:YAG и однослойного графена создан твердотельный пикосекундный лазер с частотой повторения импульсов 9.8 ГГц, работающий на длинах волн 1061.58, 1064.18 и 1064.55 нм. Управление потерями и дисперсией за счет настройки внутрирезонаторного интерферометра позволяет перестраивать длину волны и частоту повторения импульсов, соответственно. Продемонстрирована возможность одновременной двухволновой генерации в режиме пассивной синхронизации мод с использованием одного насыщающегося поглотителя на основе графена. Дополнительно контролируя параметры излучения накачки, продемонстрирована возможность переключения между одно-, двух- и многоволновой генерацией в режиме пассивной синхронизации мод. Полученные режимы генерации представляют интерес для генерации терагерцового излучения на разностной частоте длин волн 1061.58 и 1064.18 нм (или 1064,55 нм). Предлагаемый подход не ограничивается переходом ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ в Nd: YAG, но также применим для других активных сред со сложными профилями усиления.

4. Апробация работы

1. XVIII Научная школа «Нелинейные волны – 2018» (Нижний Новгород, Россия, 2018);
2. XVI Всероссийский молодежный Самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике (Самара, Россия, 2018);
3. The 7th Workshop on Nanocarbon Photonics and Optoelectronics «NPO 2018» (Savonlinna, Finland);
4. 17-й Международная конференция-школа «Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение» (Саранск, Россия);
5. V Международная конференция Лазерные, плазменные исследования и технологии (ЛаПлаз 2019) (Москва, Россия, 2019);
6. Conference on Lasers & Electro-Optics / Europe and European Quantum Electronics Conference (CLEO® / Europe-EQEC) (Munich, Germany, 2019);
7. Международный семинар по волоконным лазерам (Новосибирск, Россия, 2020);
8. 19 Международная конференция «Оптика Лазеров – 2020» (С.-Петербург, Россия, 2020);
9. Школа-конференция молодых ученых «Прохоровские недели» 2018, 2019, 2020 (Москва, Россия)

5. Список публикаций, опубликованных по теме диссертации

1. 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**, 72001 (2021).
2. 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), p. 1.
3. 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**, 365–370 (2019).
4. 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**, 100–103 (2019).
5. 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), p. 1.

Список литературы

1. A.H. Zewail, "Femtochemistry: Recent Progress in Studies of Dynamics and Control of Reactions and Their Transition States, " *The Journal of Physical Chemistry*, **100** (31), 12701-12724 (1996)
2. A.H. Zewail, "Femtochemistry: Atomic-Scale Dynamics of the Chemical Bond, " *The Journal of Physical Chemistry A*, **104** (24), 5660-5694 (2000)
3. X. Liu, D. Du and G. Mourou, "Laser ablation and micromachining with ultrashort laser pulses," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **33** (10), 1706-1716 (1997)
4. D. Huang, E. A. Swanson, C. P. Lin, J. S. Schuman, W. G. Stinson, W. Chang, M. R. Hee, T. Flotte, K. Gregory, C. A. Puliafito and J. G. Fujimoto, "Optical coherence tomography, " *Science*, **254** (5035), 1178-1181 (1991)
5. F. H. Loesel, J. P. Fischer, M. H. Götz, C. Horvath, T. Juhasz, F. Noack, N. Suhm and J. F. Bille, "Non-thermal ablation of neural tissue with femtosecond laser pulses, " *Applied Physics B*, **66** (1), 121-128 (1998)
6. G. Mourou, W.S. Brocklesby, T. Tajima and J. Limpert, "The future is fibre accelerators, " *Nat Photon*, **7** (5), 258-261 (2013)
7. D.E. Spence, P.N. Kean and W. Sibbett, "60-fsec pulse generation from a self-modelocked Ti:sapphire laser, " *Opt. Lett.*, **16** (1), 42-44 (1991)
8. R. Ell, U. Morgner, F. X. Kartner, J. G. Fujimoto, E. P. Ippen, V. Scheuer, G. Angelow, T. Tschudi, M. J. Lederer, A. Boiko and B. Luther-Davies, "Generation of 5-fs pulses and octave-spanning spectra directly from a Ti:sapphire laser," *Opt. Lett.*, **26** (6), 373-375 (2001)
9. J. J. Carvajal, G. Ciatto, X. Mateos, A. Schmidt, U. Griebner, V. Petrov, G. Boulon, A. Brenier, A. Peña, M. C. Pujol, M. Aguiló and F. Díaz, "Broad emission band of Yb³⁺ in the nonlinear Nb:RbTiOPO₄ crystal: origin and applications, " *Opt. Express*, **18** (7), 7228-7242 (2010)
10. H. Liu, J. Nees and G. Mourou, "Diode-pumped Kerr-lens mode-locked Yb:KY(WO₄)₂ laser, " *Opt. Lett.*, **26** (21), 1723-1725 (2001)
11. C. Hönniger, F. Morier-Genoud, M. Moser, U. Keller, L. R. Brovelli and C. Harder, "Efficient and tunable diode-pumped femtosecond Yb:glass lasers, " *Opt. Lett.*, **23** (2), 126-128 (1998)
12. T. Udem, R. Holzwarth and T. W. Hansch, "Optical frequency metrology, " *Nature*, **416**, 233-237 (2002)
13. J. Mertz, "Nonlinear microscopy: new techniques and applications, " *Current Opinion in Neurobiology*, **14** (5), 610-616 (2004)
14. T. M. Fortier, P. A. Roos, D. J. Jones, S. T. Cundiff, R. D. R. Bhat, and J. E. Sipe, "Carrier-Envelope Phase-Controlled Quantum Interference of Injected Photocurrents in Semiconductors, " *Phys. Rev. Lett.* **92**, 147403 (2004)
15. T. M. Fortier, A. Bartels, and S. A. Diddams, "Octave-spanning Ti:sapphire laser with a repetition rate >1 GHz for optical frequency measurements and comparisons, " *Opt. Lett.* **31**, 1011 (2006)
16. F. R. Giorgetta, W. C. Swann, L. C. Sinclair, E. Baumann, I. Coddington,

- and N. R. Newbury, "Optical two-way time and frequency transfer over free space," *Nat. Photonics* **7**, 434 (2013)
17. Hao Hu, Francesco Da Ros, Minhao Pu, Feihong Ye, Kasper Ingerslev, Edson Porto da Silva, Md. Nooruzzaman, Yoshimichi Amma, Yusuke Sasaki, Takayuki Mizuno, Yutaka Miyamoto, Luisa Ottaviano, Elizaveta Semenova, Pengyu Guan, Darko Zibar, Michael Galili, Kresten Yvind, Toshio Morioka & Leif K. Oxenløwe, "Single-source chip-based frequency comb enabling extreme parallel data transmission," *Nat. Photonics* **12**, 469 (2018).
18. H. Yaguchi, Y. Tanaka, M. Jablonski, A. Rozhin, and M. Tokumoto, "Mode-locked Fiber Lasers based on a Saturable Absorber Incorporating Carbon Nanotubes," *Proc. Opt. Fiber Commun. Conf.*'03, Atlanta, GA, **PD44** (2003)
19. S. Y. Choi, T. Calmano, F. Rotermund, and C. Kränkel, "2-GHz carbon nanotube mode-locked Yb: YAG channel waveguide laser," *Opt. Express*, **26** (5) (2018)
20. Zhipei Sun, Tawfique Hasan, Felice Torrisi, Daniel Popa, Giulia Privitera, Fengqiu Wang, Francesco Bonaccorso, Denis M. Basko and Andrea C. Ferrari, "Graphene Mode-Locked Ultrafast Laser," *ACS Nano*, **4** (2), 803–810 (2010)
21. B. Q. Bao, H. Zhang, Y. Wang, Z. Ni, and Y. Yan, "Atomic-Layer Graphene as a Saturable Absorber for Ultrafast Pulsed Lasers," *Adv. Funct. Mater.*, **19**, 3077–3083 (2009)
22. Christos Grivas, Rand Ismaeel, Costantino Corbari, Chung-Che Huang, Dan W. Hewak, Pavlos Lagoudakis, Gilberto Brambilla, "Generation of Multi-Gigahertz Trains of Phase-Coherent Femtosecond Laser Pulses in Ti:Sapphire Waveguides," *Laser Photon. Rev.*, **1800167**, 1800167 (2018)
23. P. A. Obraztsov, A. G. Okhrimchuk, M. G. Rybin, E. D. Obraztsova, and S. V. Garnov, "Multi-gigahertz repetition rate ultrafast waveguide lasers mode-locked with graphene saturable absorbers," *Laser Phys.*, **26** (8) (2016)
24. A. G. Okhrimchuk and P. A. Obraztsov, "11-GHz waveguide Nd: YAG laser CW mode-locked with single-layer graphene," *Sci. Rep.*, **5**, 11172 (2015)
25. A. Okhrimchuk, V. Mezentsev, A. Shestakov, and I. Bennion, "Low loss depressed cladding waveguide inscribed in YAG: Nd single crystal by femtosecond laser pulses," *Opt. Express* **20**, 3832–3843 (2012).
26. P. A. Obraztsov, M. G. Rybin, A. V. Tyurnina, S. V. Garnov, E. D. Obraztsova, A. N. Obraztsov, and Y. P. Svirko, "Broadband light-induced absorbance change in multilayer graphene," *Nano Lett.* **11**, 1540–1545 (2011).
27. M. G. Rybin, V. R. Islamova, E. A. Obraztsova, and E. D. Obraztsova, "Modification of graphene electronic properties via controllable gas-phase doping with copper chloride," *Appl. Phys. Lett.* **112**, 2–6 (2018).
28. С. Г. Гаранин, С. А. Бельков, Г. С. Рогожников, and Н. С. Воробьев, "Использование пикосекундной стрик-камеры PS-1/S1 для диагностики многоканальных лазерных установок," *Квантовая электроника* **44**, 798–800 (2014).
29. I. V. Ievlev, I. V. Koryukin, Yu. S. Lebedeva, P. A. Khandokhin, "Continuous two-wave lasing in microchip Nd: YAG lasers", *Quantum electron*, **41** (8), 715–

721 (2011)

30. 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**, 365–370 (2019)
31. U. Demirbas, "Optimized Birefringent Filter Design for Broadly- Tunable Multi-color Laser Operation of Nd-based Lasers : Nd: YAG Example, " *JOSA B*, **35**, 2994 (2018)
32. А. И.Тришкев, А. С.Курков, В. Б. Цветков, "Одночастотный гибридный лазер с выходной мощностью до 3 Вт на длине волны 1064 нм," *Квантовая электроника*, **42**, 417 (2012)
33. N. V. Kravtsov, E. G. Lariontsev, and N. I. Naumkin, "Dependence of polarisation of radiation of a linear Nd:YAG laser on the pump radiation polarization," *Quantum Electron*, **34**, 839 (2004)
34. H. Liu, Y. Jia, J. R. V. de Aldana, D. Jaque, and F. Chen, "Femtosecond laser inscribed cladding waveguides in Nd:YAG ceramics: Fabrication, fluorescence imaging and laser performance, " *Opt. Express* **20**, 18620 (2012)
35. F. Chen and J. R. V. de Aldana, "Optical waveguides in crystalline dielectric materials produced by femtosecond-laser micromachining, " *Laser Photon. Rev.* **8**, 251 (2014)
36. P. A. Khandokhin, N. D. Milovsky, Y. A. Mamaev, E. Ovchinnikov, and E. Y. Shirokov, *Proc. SPIE* 3682, 53 (1998)
37. 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**, 72001 (2021)