

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе и
цифровому развитию ВлГУ, д.ф.-м.н.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых" (ВлГУ) о диссертации соискателя Путилова Алексея Геннадьевича на тему «Оптимизация функциональных и конструктивных характеристик перестраиваемых лазеров на вибронных кристаллах ближнего ИК-диапазона и их применение», представленной па соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.5 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки»

Соискатель Путилов Алексей Геннадьевич окончил в 2022 году аспирантуру федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых" (ВлГУ) по специальности «Лазерная физика». В настоящее время является научным сотрудником отделения института проблем лазерных и информационных технологий Курчатовского комплекса кристаллография и фотоника и выполняет научные исследования в рамках исполнения научно-исследовательских работ. Основополагающие научные и прикладные результаты выполненной и завершенной диссертационной работы соискателя Путилова А.Г. достигнуты, обоснованы и подготовлены к опубликованию в ВлГУ

Соискатель Путилов А.Г. успешно сдал в ВлГУ экзамены кандидатского минимума: «История и философия науки» - отлично; иностранный язык (английский) - отлично; специальная дисциплина 2.5.5 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки» - отлично.

Научный руководитель соискателя – Аракелян Сергей Мартиросович, доктор физико-математических наук, профессор.

По итогам обсуждения результатов диссертационной работы Путилова А.Г на

расширенном заседании Ученого совета института прикладной математики, физики и информатики принято следующее заключение:

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, изложены проблемы современного состояния объекта и предмета исследований. Сформулированы цель и задачи исследования, новизна, теоретическая и практическая значимость работы, применяемые методы решения. Представлены основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор научно-технической литературы по перестраиваемым твердотельным лазерам ближнего ИК-диапазона. Описаны твердотельные лазеры на кристаллах $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$, $\text{Cr}^{3+}:\text{LiSrAlF}_6$, $\text{Cr}^{3+}:\text{BeAl}_2\text{O}_4$, $\text{Cr}^{3+}:\text{BeAl}_6\text{O}_{10}$ их основные достоинства и недостатки. Представлены и проанализированы способы перестройки твердотельных лазеров в зависимости от типа применяемого дисперсионного элемента. На основе проведенного анализа научной литературы определен подход к созданию твердотельных лазеров на $\text{Cr}^{3+}:\text{BeAl}_2\text{O}_4$ и $\text{Cr}^{3+}:\text{BeAl}_6\text{O}_{10}$, способам перестройки спектра излучения в диапазоне 700 – 950 нм для создания лазеров со средней выходной мощностью более 50 Вт.

Вторая глава диссертационной работы посвящена созданию оригинальных перестраиваемых твердотельных лазеров на кристаллах alexandrita и гексаалюмината бериллия (ГАБ). Изучены их основные генерационные характеристики в зависимости от температуры охлаждающей жидкости, коэффициента отражения зеркал и базы резонатора, энергии и частоты повторения импульсов накачки. Рассчитаны дисперсионные элементы для реализации перестройки длины волны генерации.

В главе приводятся основные характеристики кристалла alexandrita. Выполнен расчет параметров источника питания лазера. Выполнен тепловой расчет для термостабилизации квантрона лазера. Проведено исследование генерационных характеристик кристалла в резонаторе Фабри-Перо. Определена оптимальная база резонатора и коэффициенты отражения выходных зеркал. Для кристалла alexandrita максимальная энергия излучения составила > 4 Дж с длительностью импульса 250 мкс на длине волны ~ 750 нм.

Приводятся основные характеристики кристалла ГАБ. Выполнен расчет параметров источника питания лазера. Выполнен тепловой расчет для термостабилизации квантрона лазера. Проведено исследование генерационных характеристик кристалла в резонаторе Фабри-Перо. Определена оптимальная база резонатора и коэффициенты отражения выходных зеркал. Для кристалла alexandrita максимальная энергия излучения составила $> 0,7$ Дж с длительностью импульса 65 мкс на длине волны ~ 833 нм.

Методом фокального пятна измерена расходимость лазеров. Распределение энергии по сечению пучка в дальней зоне для обоих лазеров. Расходимость по уровню $1/e$ для лазера на alexandrite составила 3 мрад, а для гексаалюмината бериллия – 6 мрад.

Приведен расчет интерференционно-поляризационного фильтра, типа фильтра Лио для применения в качестве дисперсионного элемента селективных резонаторов. Определен диапазон перестройки для лазеров при применении трехкомпонентного фильтра Лио.

Проведены исследования по перестройки спектра излучения лазера на александрите и ГАБ. Для лазера на александрите диапазон перестройки составил от 720 до 792 нм, а ГАБ лазера – от 790 до 890 нм.

Установкой в резонатор тонкого эталона (толщина 200 мкм) удалось добиться сужения ширины линии генерации более чем в 2 раза. Продемонстрировано сужение спектра генерации лазера на гексаалюминате бериллия при последовательном добавлении в неселективный резонатор трехступенчатого фильтра Лио и тонкого эталона.

В последней части главы приведен расчет дисперсионной призмы для перестройки спектра излучения лазера на александрите и ГАБ лазера. Проведены исследования по перестройки спектра излучения. Так использование дисперсионной призмы позволило увеличить диапазон длин волн генерации. В лазере на александрите от 712 до 804 нм, а ГАБ лазере от 780 до 930 нм. При этом ширина спектра генерации стала шире, чем в резонаторе с фильтром Лио.

В главе 3 представлена оригинальная экспериментальная установка с использованием лазера на александрите работающего на длине волны 750 нм. Временная форма излучения лазера представляет собой цуг импульсов наносекундной длительности не затухающий в пределах 250 мкс, что соответствует световому импульсу накачки.

Методом лазерной абляции в жидкость получены однокомпонентные коллоидные растворы с наночастицами меди и стеклоуглерода. Проведен анализ однокомпонентных коллоидных растворов и осаждение из них наночастиц. С помощью лазера со сканатором сформированы проводящие структуры на твердой диэлектрической подложке и исследованы их электрические характеристики.

Интерес представляет медно-никелевый сплав и его электропроводимость т.к. смешивание никеля и меди приводит не только к улучшению коррозионных свойств, но и изменению электросопротивления. Для проведения первичных экспериментов на диэлектрическую подложку наносились 2 капли разного коллоидного раствора. Они перемешивались до однородной массы, на которую производилось лазерное воздействие. В результате сканирования на поверхности диэлектрической подложки, формировался осажденный слой. Рассчитанное удельное сопротивление составило порядка 291,6кОм·м.

В главе 4 проведен анализ в области источников излучения для оптической накачки паров рубидия, применяемого в методе спино-бменной оптической накачке ^{129}Xe для создания гиперполяризованного состояния.

С помощью излучения лазера на александрите, настраиваемого по длине волны для воздействия на линии поглощения рубидия, продемонстрирована оптическая накачка паров рубидия.

Методом спин-обменной оптической накачки получена прецессия ядер ^{129}Xe , указывающая на гиперполяризацию благородного газа. Проведенные исследования показывают перспективность разрабатываемого перестраиваемого твердотельного лазера для оптической накачки паров рубидия. Перестройка спектра излучения лазера на александрите позволяет эффективно воздействовать на 87 и 85 изотопы рубидия, линии поглощения которых соответствуют D2 – 780 нм, а D1 – 795 нм. Высокая плотность мощности излучения, недостижимая для лазерных диодов, позволит накачивать плотные пары рубидия, тем самым, открывая возможности к получению больших объемов гиперполяризованного ксенона при использовании многопроходных реакционных ячеек.

В заключение указано, что в диссертации решена актуальная и существенная по своему значению задача повышения мощности лазерного излучения перестраиваемых лазеров на основе активных элементов александрита и гексаалюмината берилля. Применение селективных резонаторов с дисперсионной призмой и фильтром Лию позволило получить плавную перестройку спектра излучения в совокупности для двух активных сред с 715 до 891 нм. Продемонстрировано применение разработанных лазеров в области взаимодействия лазерного излучения с веществом, а именно получение наночастиц высокоотражающих материалов и формирование наноструктурированных покрытий на их основе. Также показаны возможности и преимущества использования перестраиваемого твердотельного лазера на александрите для накачки паров рубидия и дальнейшей гиперполяризации ^{129}Xe методом спин-обменной оптической накачки в диагностике дыхательных путей.

Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертационной работе

Достигнутые научные результаты, изложенные в диссертации, получены соискателем Путиловым А.Г. лично и при непосредственном участии соискателя в проведении экспериментальных исследований. Формулирование цели и постановка решаемых научных и прикладных задач, а также разработка планов и программы экспериментов, анализ полученных результатов выполнены соискателем самостоятельно. Разработанные и сформулированные Путиловым А.Г. положения, выносимые на защиту, а также результаты научно- практического исследования вносят существенный вклад в решение актуальных производственных задач для предприятий отечественного машиностроения в части применения перестраиваемого лазерного излучения как для обработки поверхности, так и для получения наноструктурированных слоев обладающих различными физико-химическими свойствами. А также для создания нового диагностического оборудования предназначенного для определения деструкции дыхательных путей легких и определения включений в них методом МРТ с помощью

гиперполяризованного ^{129}Xe методом спин-обменной оптической накачки.

Степень достоверности результатов проведенных исследований

Правомерность и адекватность основных научных результатов, достигнутых в диссертационной работе, подтверждена данными выполненных соискателем Путиловым А.Г. научно-теоретических, прикладных и экспериментальных исследований. Основные достижения диссертационной работы не противоречат данным фундаментальных исследований отечественных и зарубежных ученых в области разработки и создания лазеров и их применения. Достоверность научных результатов подтверждена независимой экспертизой опубликованных статей в ведущих рецензируемых российских и международных научных изданиях, рецензентами сборников трудов научных конференций международного и российского уровня и заключением экспертов ФИПС РФ патентной новизне разработанного изобретения.

Новизна и практическая значимость результатов исследования

В рамках данной диссертационной работы получены следующие новые научные достижения и отличия:

1. Предложена и теоретически обоснована схема построения мощного лазера на александрите в неселективном резонаторе. Продемонстрирована генерация излучения на длине волны 750 нм с энергией более 4,2 Дж, длительностью импульса 250 мкс и средней мощностью 78 Вт при комнатной температуре.
2. Впервые выполнена оптимизация параметров накачки и продемонстрирован перестраиваемый твердотельный лазер на гексаалюминате бериллия в резонаторе с фильтром Лио. Средняя выходная мощностью излучения превысила 10 Вт. Теоретически обосновано применение селективного резонатора с трехступенчатым фильтром Лио. Получена перестраиваемая генерация излучения от 795 до 891 нм со спектральной шириной 1,5 нм и длительностью импульса лазерного излучения 40 мкс.
3. Впервые предложено использовать излучение лазера на александрите в режиме свободной генерации для синтеза наночастиц меди в методе лазерной абляции материала в жидкость. Установлено, что в режиме свободной генерации временная форма импульса излучения лазера представляет собой цуг импульсов длительностью ~ 400 нс и частотой следования 200 кГц не затухающий в пределах импульса накачки. Этот факт позволяет использовать излучение лазера без модуляции добротности для управляемого синтеза высокоотражающих наноматериалов.
4. Впервые экспериментально продемонстрирована гиперполяризация ^{129}Xe импульсно-периодическим излучением перестраиваемых лазеров на александрите и гексаалюминате бериллия. Реализован метод непрямой оптической накачки ^{129}Xe путем воздействия излучением перестраиваемого лазера на александрите на линии поглощения изотопов рубидия 85 и 87 на длинах волн 780 и 794,7 нм.
5. Предложена новая конструкция отражателя излучения для твердотельных лазеров (Патент на изобретение № RU 2735133 C1, 2020.)

Полученные результаты включают в себя разработку и создание перестраиваемых твердотельных лазеров, расчет оптических схем накачки и разработку методики измерения параметров и характеристик лазерного излучения, а также демонстрацию возможного применения лазерных устройств. Достиженные в диссертационной работе результаты имеют как теоретическую, так и практическую значимость. Они могут быть использованы на начальном этапе проектирования рабочего инструмента, предназначенного для обработки или формирования наноструктурированных поверхностей и при создании фотонной фабрики для гиперполяризации ^{129}Xe методом спин-обменной оптической накачки

Результаты исследований приняты к практическому использованию в образовательной и в научно-производственной деятельности предприятий и учебных учреждений.

Ценность научных работ автора

Ценность научных работ Путилова А.Г. состоит в том, что в них обоснованы и отражены особенности применения вибронных кристаллов легированных ионами хрома (александрит и гексаалюминат бериллия) в качестве активных элементов, что позволяет создать мощные твердотельные лазеры. Для создания перестраиваемых твердотельных лазеров используются различные типы дисперсионных элементов: дисперсионные призмы, многоступенчатые интерференционно-поляризационные фильтры. Использование предложенных дисперсионных элементов в резонаторе и активных элементов открывают новые возможности для изготовления компактных и мощных источников перестраиваемого лазерного излучения для разных применений, в частности синтезе наночастиц, формировании наноструктурированных поверхностей и гиперполяризации ^{129}Xe методом спин-обменной оптической накачки. Проведен расчет оптических схем накачки и созданы лазеры на активных элементах александрита и гексаалюмината бериллия. Экспериментально исследованы оптические схемы с различными дисперсионными элементами. Продемонстрировано применение разработанных лазеров в области взаимодействия лазерного излучения с веществом, а именно получение наночастиц высокоотражающих материалов и формирование наноструктурированных покрытий на их основе. Также показаны возможности и преимущества использования перестраиваемого твердотельного лазера на александрите для накачки паров рубидия и дальнейшей гиперполяризации ^{129}Xe методом спин-обменной оптической накачки в диагностики дыхательных путей.

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных автором

Основные положения и результаты диссертационного исследования соискателя Путилова А.Г. отражены в 12 публикациях научных работ, в том числе 4 опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК, 8 в изданиях, включенных в индексируемые базы данных Web of Science и Scopus, получены Патент РФ на изобретение. Результаты диссертационного исследования докладывались на 16 научных и научно-практических

конференциях различного уровня, включая международные.

Соответствие содержания диссертации избранной специальности

Диссертация Путилова А.Г. «Оптимизация функциональных и конструктивных характеристик перестраиваемых лазеров на вибронных кристаллах ближнего ИК-диапазона и их применение» по своему содержанию соответствует профилю специальности 2.5.5 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки», а именно: по пункту 2 «Теоретические основы, моделирование и методы экспериментального исследования процессов механической и физико-технической обработки»; по пункту 5 «Создание оборудования и инструментов для новых технологических процессов механической и физико-технической обработки»; по пункту 7 «Новые технологические процессы механической и физико-технической обработки и создание оборудования и инструментов для их реализации»

Диссертация Путилова Алексея Геннадьевича «Оптимизация функциональных и конструктивных характеристик перестраиваемых лазеров на вибронных кристаллах ближнего ИК-диапазона и их применение» является завершенной научной работой, обладающей внутренним единством, и рекомендуется к защите па соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.5 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки».

Директор института информационных технологий и электроники, к.т.н., доцент

И.о. заведующего кафедрой физики и прикладной математики, к.ф.-м.н.

Подписи А.А. Панфилова и К.С. Хорькова заверяю

Ученый секретарь Ученого совета ВлГУ


А.А. Панфилов

К.С. Хорьков

Т.Г. Коннова


ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ
Уч. СЕКРЕТАРЬ ВлГУ
КОННОВА Т. Г.