

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ
ФАНО РОССИИ
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

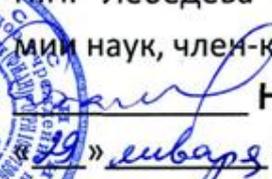
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук
Самарский филиал

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук
(СФ ФИАН)

УДК 621.79+548.73+539.8:621.373.826+535.33/.34:621.373.826

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, член-корр. РАН


Н.Н. Колачевский

«29» *сентября* 2018 г.



ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
по теме № АААА-А17-117111470058-8

«Физические основы лазерных, фотонных и оптоэлектронных технологий и взаимодействие лазерного излучения с веществом для решения задач навигации, УТС, информатики и биомедицины»

ГОСУДАРСТВЕННОГО ЗАДАНИЯ ФИАН

за 2017 год

Руководитель работ от СФ ФИАН,
директор СФ ФИАН, к.ф.-м.н.

Казакевич В.С.

Руководитель работ от СФ ФИАН,
в.н.с., и.о. зав. лаб. СФ ФИАН, д.ф.-м.н.

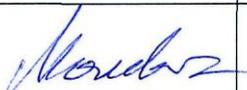
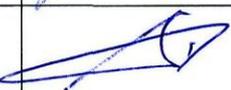
Михеев П.А.

Ученый секретарь СФ ФИАН, д.т.н.

Ярьеско С.И.

Москва, Самара 2017

СПИСОК ОТВЕТСТВЕННЫХ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ ОТ СФ ФИАН

Рук. группы, д.ф.-м.н.		Попов Ю.М. (раздел 21)
Рук. группы, к.ф.-м.н.		Кузнецов С.П. (раздел 22)
Гл. н. с., и.о. зав. сектором, д.ф.-м.н.		Молевич Н.Е. (раздел 23)
В. н. с., и.о. зав. лаб., д.ф.-м.н.		Михеев П.А. (раздел 24)
В. н. с., и.о. зав. лаб., к.ф.-м.н.		Котова С.П. (раздел 25)
Директор СФ ФИАН, к.ф.-м.н.		Казакевич В.С. (раздел 26, 27)
Помощник директора ФИАН, д.ф.-м.н.		Неволин Н.В. (раздел 28)

УДК 621.79+548.73+539.8:621.373.826+535.33/.34:621.373.826

Ключевые слова: широкоапертурный лазер, частично ионизованный газ, магнитная газодинамика, конденсационная неустойчивость, оптические структуры, лазерно-индуцированная флуоресценция, тушение синглетного кислорода, лазер на инертных газах с оптической накачкой, барьерный разряд, лазерная ударная обработка, остаточные напряжения, алюминиевые сплавы, рентгеноструктурный анализ, глубокое легирование, моделирование, лазерное упрочнение, режущий инструмент, лазерная абляция металлов, селективное лазерное плавление, субмикронные и наноструктуры, спиральные пучки света, фазовые сингулярности, орбитальный угловой момент, аксиально-симметричные световые поля, жидкокристаллический пространственный модулятор модального типа

РЕФЕРАТ

Отчет на 42 стр., 29 рис., 2 табл., 7 источников

ШИРОКОАПЕРТУРНЫЙ ЛАЗЕР, ЧАСТИЧНО ИОНИЗОВАННЫЙ ГАЗ, МАГНИТНАЯ ГАЗОДИНАМИКА, КОНДЕНСАЦИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ, ОПТИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ, ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННАЯ ФЛУОРЕСЦЕНЦИЯ, ТУШЕНИЕ СИНГЛЕТНОГО КИСЛОРОДА, ЛАЗЕР НА ИНЕРТНЫХ ГАЗАХ С ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКОЙ, БАРЬЕРНЫЙ РАЗРЯД, ЛАЗЕРНАЯ УДАРНАЯ ОБРАБОТКА, ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ, АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ, РЕНТГЕНОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ, ГЛУБОКОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ, МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЛАЗЕРНОЕ УПРОЧНЕНИЕ, РЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ, ЛАЗЕРНАЯ АБЛЯЦИЯ МЕТАЛЛОВ, СЕЛЕКТИВНОЕ ЛАЗЕРНОЕ ПЛАВЛЕНИЕ, СУБМИКРОННЫЕ И НАНОСТРУКТУРЫ, СПИРАЛЬНЫЕ ПУЧКИ СВЕТА, ФАЗОВЫЕ СИНГУЛЯРНОСТИ, ОРБИТАЛЬНЫЙ УГЛОВОЙ МОМЕНТ, АКСИАЛЬНО-СИММЕТРИЧНЫЕ СВЕТОВЫЕ ПОЛЯ, ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ МОДУЛЯТОР МОДАЛЬНОГО ТИПА

Цель проекта – проведение исследований в области магнитной газовой динамики плазмы, в области генерации и управления характеристиками световых полей со сложной пространственной структурой, в области химической кинетики, спектроскопии, физики и химии горения, физики газового разряда, в области разработки лазерных технологий упрочнения, селективного лазерного спекания, глубокого легирования и аблирования металлов и сплавов.

Методология проведения работы – в рамках выполнения данной тематики Государственного задания проводились экспериментальные работы и теоретические исследования с использованием аналитических и численных методов в области нелинейной динамики, когерентной оптики, физики лазеров и лазерных технологий.

Результаты работы

1. С использованием уравнений Максвелла-Блоха в широкоапертурных лазерах динамического класса В теоретически исследована возможность подавления поперечных неустойчивостей с помощью когерентной оптической инжекции и исследована пространственно-временная динамика при периодической временной модуляции параметра накачки.
2. Построена бифуркационная диаграмма, показывающая зависимость пороговой амплитуды инжекции от управляющих параметров лазера, и найдено, что пороговая амплитуда инжекции, требуемая для полного подавления неустойчивости, оказывается много меньше амплитуды поля в резонаторе.
3. С помощью теории Флоке показано, что параметрически индуцированные поперечные неустойчивости возникают при частоте модуляции близкой к частоте релаксационных колебаний лазера или к её удвоенному значению, определены характерные размеры параметрически возбуждаемых поперечных структур.
4. С использованием двухжидкостной магнитогазодинамической модели проведено исследование изобарической (конденсационной) неустойчивости в частично ионизированном тепловыделяющем газе, находящемся в магнитном поле, найдены условия возникновения неустойчивости конденсационной моды ионной компоненты.
5. Создана экспериментальная установка для проведения экспериментов по тушению молекул $O_2(b^1\Sigma)$ молекулами атмосферных газов, и на основе измерений констант скоростей тушения $O_2(b^1\Sigma)$ молекулами O_2 , H_2O , CO_2 , N_2 методом лазерно-индуцированной флуоресценции в диапазоне температур 300-800 К получены аналитические выражения для значений констант в указанном диапазоне температур.

6. Измерены коэффициенты столкновительного уширения линий аргона и криптона перехода $(n+1)s[3/2]_2 \rightarrow (n+1)p[5/2]_3$ атомами He, Ne, Ar и Kr, коэффициент столкновительного сдвига линии Ar в Ar и концентрации метастабильных атомов Ar($1s_5$) и Kr($1s_5$) в плазме барьерного разряда.
7. Найдены конфигурации барьерного разряда, обеспечившие концентрации Ar($1s_5$) $\sim 10^{11} \div 10^{13} \text{ см}^{-3}$ в плазме в смесях с He при давлении до атмосферного.
8. Показано, что расчеты параметра приведенного электрического поля E/N плазмы положительного столба тлеющего разряда в кислороде с достаточной для большинства приложений точностью позволяет проводить упрощенная модель, в которой пренебрегается наличием в плазме отрицательных ионов, их влиянием на распределение заряженных частиц. Представлены требующиеся для расчетов зависимости скорости ионизации и характеристической энергии электронов
9. Проведена обработка алюминиевого сплава излучением лазера LSP 2500 ($\lambda=1,06 \text{ мкм}$; $\tau=10 \text{ нс}$, $E = 0,55 \text{ Дж}$) в диапазоне плотности мощности $q = 1,3\text{-}5,8 \text{ ГВт/см}^2$. Методами рентгеноструктурного анализа, оптической и электронной микроскопии изучена структура сплава АМг6 до и после лазерной обработки. Проведены измерения остаточных напряжений в обработанном материале рентгеновским методом (метод $\sin^2\psi$) на глубину до 1,5 мм.
10. Для анализа структуры металлов с ГЦК решеткой после ударного лазерного упрочнения создано программное обеспечение, позволяющее проводить обработку дифрактограмм, по-слойно определять макронапряжения с учетом разгрузки слоев; моделировать аппаратные искажения дифракционных линий с учетом условий съемки, а также получать физические профили линий, определять размеры субзерен, плотности дислокаций и вероятности дефектов упаковки.
11. Экспериментально установлены значения энергии, длительности, плотности мощности и профиль формы импульса для эффективного глубокого легирования сталей ШХ15 и 20Х23Н18 чистыми порошками Ta и SiC-M-100.
12. Разработана технология глубокого легирования стали чистыми металлическими и керамическими порошками, включающая три этапа: 1 этап – сплавление порошка с подложкой первым импульсом излучения; 2 этап – глубокое проникновение легирующего порошка в расплав при облучении вторым импульсом в среде аргона; 3 этап – выравнивание поверхности и улучшения перемешивания легированной фазы с основным металлом.
13. Установлено присутствие легированных структур в виде твёрдого раствора внедрения по всей глубине плавления (3 мм) с максимумом концентрации в поверхностных слоях и равномерным убыванием вглубь расплава.
14. Измерена средняя концентрация легирующих компонентов, которая составила 15 % от объёма расплава. Отмечена высокая равномерность распределения в расплаве легированной фазы. Установлено, что по процентному содержанию легирующих компонентов в расплаве и равномерности распределения легированной фазы легирование порошковой фракцией эффективнее, чем легирование присадками в виде проволоки.
15. Методом конечных элементов в трехмерной постановке численно решена задача о нагреве режущего инструмента импульсным лазерным излучением треугольной формы. Разработанная модель учитывает влияние, как геометрии инструмента, так и пространственных и временных характеристик лазерного излучения на формирование температурного поля в зоне лазерной обработки. Для различных углов заострения инструмента установлены закономерности формирования температурного поля при упрочнении импульсным лазерным излучением, определены

режимы обработки (плотность энергии, кратность обработки и расположение центра пятна лазерной обработки относительно режущих кромок инструмента), обеспечивающие наилучшие параметры зоны лазерного воздействия (максимальную глубину упрочнения и протяженность зоны упрочнения). Разработана методика выбора технологических параметров процесса упрочнения режущего инструмента.

16. Методом лазерной абляции на поверхности титана и никеля в жидком аргоне получены микронные и субмикронные поверхностно-периодические структуры и наноструктуры.

17. Экспериментально определены оптимальные режимы СЛП для отдельных проходов интерметаллидных порошков Ni_3Al и $TiAl$, режимы послойного синтеза при сканировании лазерным лучом по меандру, зигзагом и с поворотом меандра на 90° на каждом следующем слое, а также указанные выше методики но с подогревом платформы до $T_n = 300^\circ C$.

18. Зафиксирована литая структура интерметаллидных фаз Ni_3Al и $TiAl$ по данным ОМ, которая имеет более грубую дисперсность, нежели чем у поверхности. У Ni_3Al фазы литая структура довольно однородная, а вот у фазы $TiAl$ видны включения пор и выделения второй фазы. Микротвердость фазы $Ni_3Al \sim 360 HV_{0.1}$ и фазы $TiAl \sim 489 HV_{0.1}$.

19. Методами СЭМ микроэлементный анализ со всей площади указанного изображения дает Al -15.17 % и Ni -84.83 %, что соответствует исходной фазе Ni_3Al и данным РФА после СЛП. Субмикроструктура фазы $TiAl$ имеет особенности в сравнении с ОМ. Микроэлементный анализ со всей площади указанного изображения дает Al -34.04 %, Ti -65.04 % и Ni -0.9 %.

20. Разработаны методы построения спиральных пучков с различными значениями параметра поворота, обладающих различными распределениями интенсивности симметричного вида. Разработано необходимое программное обеспечение для реализации этого метода.

21. Получено аналитическое выражение для орбитального углового момента светового поля как суперпозиции пучков Эрмита-Гаусса. Показано, что астигматическая модовая конверсия для эквивалентных с точки зрения орбитального углового момента исходных световых полей приводит к существенно различному конечному результату.

22. Найдены типы световых полей, формируемых жидкокристаллическим фокусатором в разных режимах работы. Предложена новая конфигурация модального жидкокристаллического фокусатора с дополнительными узкими электродами и ограничивающей апертуру круглой диафрагмой, обеспечивающая его работу в качестве управляемой спиральной пластинки. Исследованы особенности распространения аксиально-симметричных по интенсивности световых полей с различным топологическим зарядом, формируемых с помощью спиральной пластинки и вихревого аксикона. Полученные результаты представляют интерес для расширения функциональных возможностей лазерных пинцетов, увеличения продольного разрешения микроскопов, для передачи информации в квантовых системах связи.

За отчетный период подготовлено 68 публикаций в высокорейтинговых рецензируемых журналах индексируемых в системах WoS, Scopus или РИНЦ.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	8
23. Результаты Теоретического сектора СФ ФИАН	9
23.1 Исследования нелинейных механизмов образования структур и подавления поперечных неустойчивостей в широкоапертурных лазерах класса В	9
23.2 Выводы	12
Образовательная значимость проекта	12
Список публикаций по проекту	12
24. Результаты Лаборатории химических и электроразрядных лазеров СФ ФИАН	14
24.1 Кинетика тушения $O_2(b^1\Sigma)$ молекулами атмосферных газов	14
24.2 Спектроскопия линий атомов инертных газов	15
24.3 Моделирование плазмы тлеющего разряда	16
24.4 Выводы	17
Список публикаций по проекту	17
25. Результаты Лаборатории моделирования и автоматизации лазерных систем СФ ФИАН	17
25.1 Спиральные пучки света с параметром поворота больше единицы	17
25.2 Генерация и анализ аксиально-симметричных световых полей с угловым моментом	19
25.3 Исследование поведения орбитального углового момента светового поля при астигматической модовой конверсии	20
25.4 Выводы	20
Образовательная значимость проекта	21
Список публикаций по проекту	21
26. Результаты Лаборатории технологических лазеров СФ ФИАН	22
26.1 Влияние лазерных импульсов наносекундной длительности с длиной волны 1,064 мкм на структуру сплава АМгб	23
26.2 Взаимосвязь механических свойств и структурно-фазового состава интерметаллидов после селективного лазерного плавления	24
26.3 Выводы	27
Список публикаций по проекту	27
27. Результаты Лаборатории лазерной сварки СФ ФИАН	28
27.1 Глубокое легирование сталей порошковыми присадками с использованием импульсного лазерного излучения	29
27.2 САЕ-обеспечение процесса автоматизации лазерного упрочнения режущего инструмента	32
27.3 Гальваническое нанесение металлов на ПС/ППС полученных методом лазерной абляции жидких средах	34

27.4 Жидкофазная лазерная абляция Ni фольги нанесенной на Ti подложку	37
27.5 Выводы	38
Образовательная значимость проекта	38
Список использованных источников	38
Список публикаций по проекту	39
Заключение	41

Введение

Основное внимание в проекте было уделено решению актуальных задач, связанных с нелинейной динамикой оптических и магнитогазодинамических активных систем, с физикой спиральных лазерных пучков, с вопросами кинетики тушения $O_2(b^1\Sigma)$ молекулами атмосферных газов, спектроскопией атомов инертных газов в приложении к недавно предложенному лазеру на инертных газах с оптической накачкой, с разработкой лазерных технологий упрочнения, селективного лазерного спекания, глубокого легирования и аблирования металлов и сплавов.

23 Результаты Теоретического сектора СФ ФИАН

В данном разделе описаны результаты теоретического исследования нелинейных механизмов подавления поперечных неустойчивостей в широкоапертурных лазерах класса В, формирования устойчивых двумерных пространственно-временных структур, в том числе при внешней модуляции параметров, а так же условий неустойчивости конденсационной моды в частично-ионизованном газе в присутствии магнитного поля.

23.1 Исследования нелинейных механизмов образования структур и подавления поперечных неустойчивостей в широкоапертурных лазерах класса В

В настоящей работе проведён бифуркационный анализ для приосевой стационарной генерации в широкоапертурных лазерах класса В. Получены в явном виде аналитические выражения, описывающие неустойчивые моды.

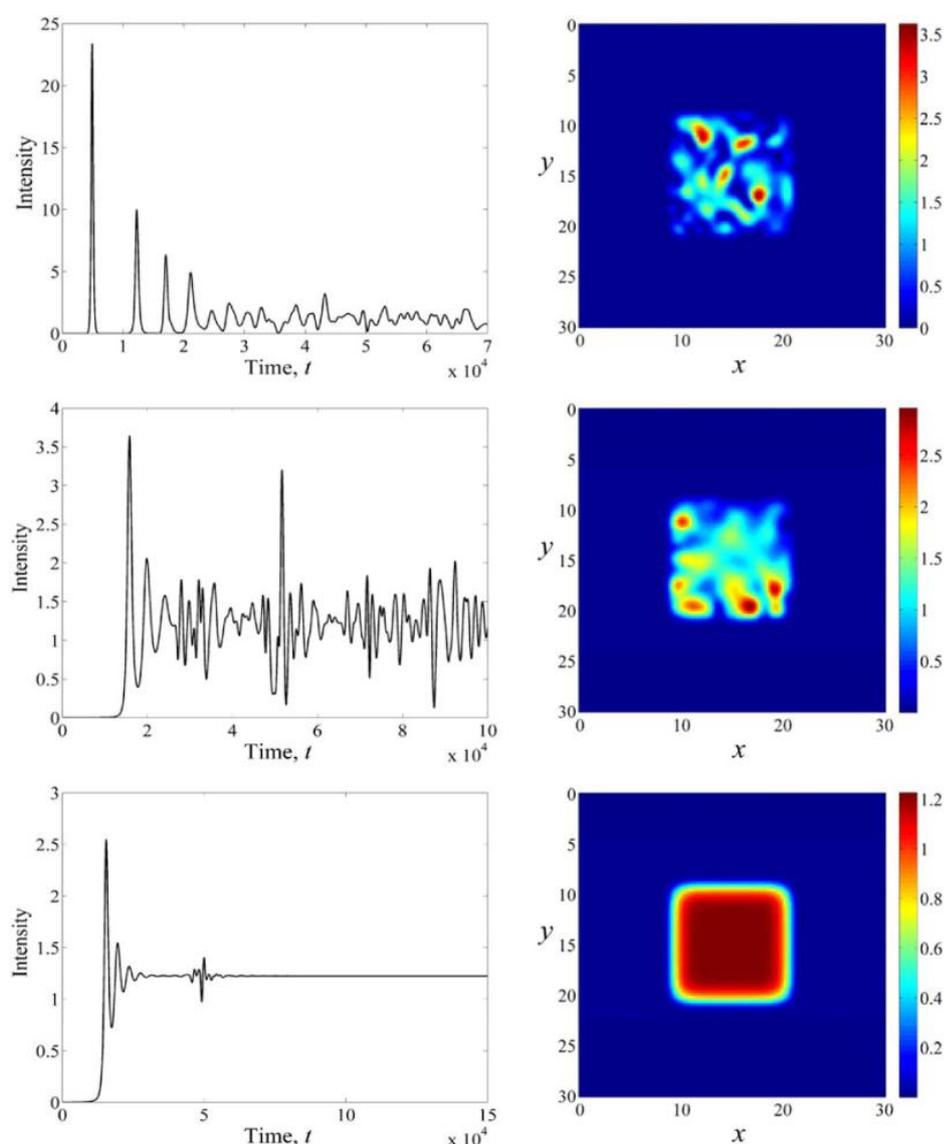


Рисунок 23.1 – Пространственно-временная структура излучения широкоапертурного лазера динамического класса В при интенсивности оптической инжекции 0 (верхние рисунки), 0,0001 (средние рисунки), 0,0004 (нижние рисунки). Левые рисунки – зависимость интенсивности генерации от времени. Правые рисунки – профиль интенсивности в поперечном сечении

Численное моделирование показало, что развитие обнаруженных неустойчивостей приводит к установлению филаментационной структуры поперечного профиля излучения. При этом характерно, что лазер в режиме свободной генерации может демонстрировать устойчивую генерацию лишь в узком диапазоне значений параметров.

Теоретически исследована возможность подавления поперечных неустойчивостей в широкоапертурных лазерах класса В с помощью когерентной оптической инжекции. На основе уравнений Максвелла-Блоха было подробно рассмотрено влияние введенной инжекции на основные механизмы неустойчивости выходного излучения, связанные с внутренними нелинейностями активной среды. Было продемонстрировано, что инжекция эффективно подавляет неустойчивые компоненты оптического поля, таким образом, делая возможным стабильный выходной пучок (рис. 23.1). Построена бифуркационная диаграмма, показывающая зависимость пороговой амплитуды инжекции от управляющих параметров лазера. Пороговая интенсивность инжекции, требуемая для полного подавления неустойчивости, оказывается много меньше интенсивности лазерной генерации в резонаторе. Важность полученных результатов состоит в том, что они показывают возможный механизм эффективного устранения филаментации излучения мощных широкоапертурных лазерных систем.

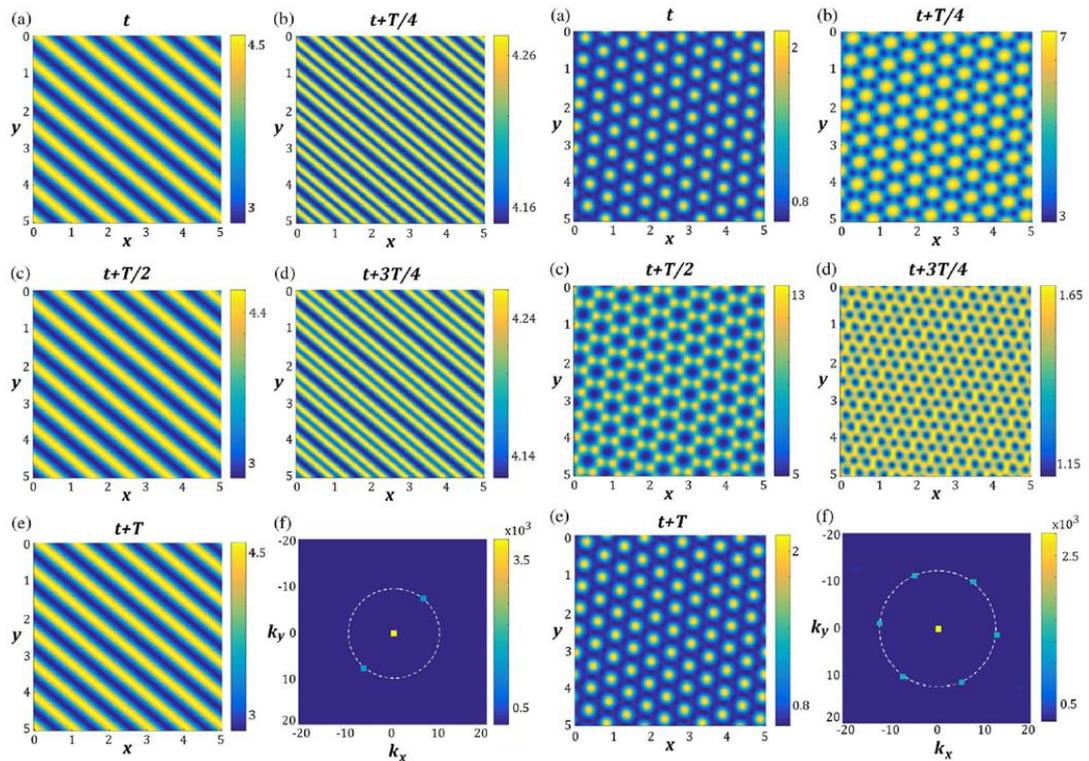


Рисунок 23.2 – Вид модулированных стоячих волн на одном периоде. Левые два столбца – модулированные полосковые (страйп) структуры. Правые два столбца – модулированные гексагоны. Пунктирная окружность соответствует значениям поперечных волновых векторов, полученных аналитически. Синие точки – поперечные волновые вектора, соответствующие страйп-структурам и гексагонам, полученные численным моделированием

Исследована пространственно-временная динамика широкоапертурного лазера с периодической временной модуляцией параметра накачки. С практической точки зрения, поперечные неустойчивости в лазерах с модуляцией накачки могут играть важную роль в оптических каналах связи. С помощью теории Флоке показано, что параметрически индуцированные поперечные неустойчивости возникают при частоте модуляции близкой к частоте релаксационных ко-

лебаний лазера или к её удвоенному значению, определены характерные размеры параметрически возбуждаемых поперечных структур. Численное моделирование показало, что при резонансе 2:1 реализуются структуры (так называемые модулированные стоячие волны) в виде модулированных полос (два левых столбца на рисунке 23.2), а при резонансе 1:1 в виде модулированных гексагонов (два правых столбца на рисунке 23.2). Получено, что характерные размеры возбуждаемых структур хорошо согласуются с результатами анализа Флоке. При выборе параметров из области устойчивости полученных бифуркационных диаграмм с помощью численного моделирования было подтверждено, что режим колебаний однородного профиля оказывается устойчивым, формирования пространственных структур не происходит. Любые малые возмущения режима колебаний пространственно-однородного профиля затухают с течением времени.

Также в проекте на основе двухжидкостной магнитогазодинамической модели получены дисперсионные соотношения магнитоакустических и конденсационной мод в слабоионизованной плазме с тепловыделением, находящейся во внешнем магнитном поле. На рисунке 23.3 приведены характерные зависимости инкремента конденсационной моды от волнового числа при разных степенях ионизации и β параметре плазмы.

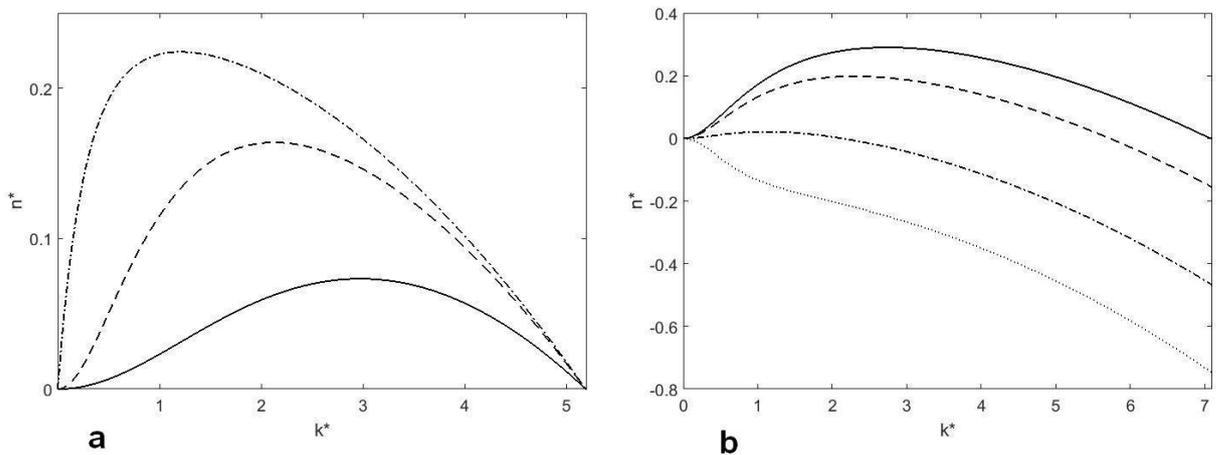


Рисунок 23.3 – Зависимость нормализованного инкремента конденсационной моды ионной компоненты от нормализованного волнового числа а) для $\beta = 2$ при различных значениях частоты нейтрально-ионных столкновений $\nu_{n,i,0}/(c_{\infty n}k_p)$: 0 (штрих-пунктирная кривая), 0,03 (пунктир) и 0,3 (сплошная кривая); б) для $\nu_{n,i,0}/(c_{\infty n}k_p) = 0,03$ при $\beta = \infty$ (сплошная кривая), $\beta = 2,4$ (пунктир), $\beta = 1,2$ (штрих-пунктир) и $\beta = 0,8$ (точки)

Из рисунка 23.3 а видно, что увеличение частоты нейтрально-ионных столкновений приводит к уменьшению временного инкремента конденсационной моды ионной компоненты, но не изменяет область неустойчивости. Увеличение магнитного поля на развитие конденсационной моды в ионной компоненте влияет по-другому. На рисунке 23.3 б приведен пример расчетных зависимостей безразмерного инкремента от волнового вектора возмущений (плотности и температуры) в конденсационной моде при $\nu_{n,i,0}/(c_{\infty n}k_p) = 0,03$ для различных значений параметра плазмы бета (отношение газодинамического давления к магнитному давлению). Как видно из рисунка 23.3 б, увеличение магнитного поля (уменьшение параметра β) приводит к уменьшению как величины n^* , так и интервала значений k^* , при которых конденсационная мода ионной компоненты неустойчива ($n^* > 0$).

23.2 Выводы

В ходе выполнения проекта было

Показано, что эффективное подавление неустойчивых гармоник поля в широкоапертурном лазере динамического класса В может достигаться при инжекции в резонатор внешнего оптического излучения. Построена бифуркационная диаграмма, позволяющая определить пороговую интенсивность поля инжекции для подавления пространственно-временной неустойчивости в зависимости от параметров лазерной системы.

Проведено исследование формирования оптических структур при параметрах из области устойчивости однородного решения для лазеров класса В в результате модуляции параметра накачки. Показано, что существуют области параметров лазерной системы (при частоте модуляции накачки, близкой к частоте релаксационных колебаний или к её удвоенному значению), при которых периодическая модуляция параметра накачки приводит к формированию модулированных стоячих волн в форме модулированных полос (страйпов) и гексагонов. Определены характерные размеры возбуждаемых структур.

Проведено исследование изобразительной (конденсационной) неустойчивости в частично ионизированном тепловыделяющем газе, находящемся в магнитном поле. Были получены линейные уравнения, описывающие, в том числе, тепловую неустойчивость в слабоионизированной плазме, и найдено дисперсионное соотношение для конденсационной моды ионной компоненты при произвольном направлении вектора индукции внешнего магнитного поля. С использованием данного соотношения найдены условия возникновения неустойчивости конденсационной моды ионной компоненты.

Образовательная значимость проекта

В работе над проектом активное участие приняли студенты 4-го - 6-го курсов и аспиранты кафедры Физики Самарского национально-исследовательского института.

По результатам работы защищены 2 дипломные работы для защиты на соискание степени бакалавров: Ярунова Елизавета Андреевна (инженер СФ ФИАН) «Моделирование динамики оптического поля в кольцевом резонаторе с нелинейным метаматериалом и запаздывающей обратной связью», Белов Сергей Александрович (инженер-исследователь СФ ФИАН) «Теоретическое исследование нелинейного взаимодействия МГД-волн в изоэнтропически неустойчивых тепловыделяющих средах».

Список публикаций по проекту

1. Завершинский Д. И. и др. Неустойчивость конденсационной моды в тепловыделяющем слабоионизированном газе в магнитном поле // Краткие сообщения по физике Физического института им. П.Н. Лебедева Российской Академии Наук. – 2017. – Т. 44. – №. 10. – С. 35-42.
2. Ryashchikov D. S., Molevich N. E., Zavershinskii D. I. Characteristic times of acoustic and condensation instability in heat-releasing gas media // Procedia Engineering. – 2017. – Т. 176. – С. 416-422.
3. Krents A. A. et al. Generation of regular optical pulses in VCSELs below the static threshold // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2017). – 2017. – С. 159-161. DOI: [10.18287/1613-0073-2017-1900-52-54](https://doi.org/10.18287/1613-0073-2017-1900-52-54)
4. Anchikov D. A., Krents A. A., Molevich N. E. Spatially inhomogeneous pattern formation due to parametric modulation in large broad-area lasers // Computer Optics. – 2017. – Т. 41. – №. 3. – С. 363-368.

5. Pakhomov A. V., Arkhipov R. M., Molevich N. E. Stabilization of class-B broad-area laser emission by external optical injection // *JOSA B*. – 2017. – T. 34. – №. 4. – C. 756-763.
6. Krents A. A., Molevich N. E., Anchikov D. A. Resonant excitation of transverse patterns in broad-area lasers by periodic temporal pump modulation // *JOSA B*. – 2017. – T. 34. – №. 8. – C. 1733-1739.
7. Molevich N. et al. Nonlinear acoustic and magnetoacoustic waves in media with isentropic instability // Proc. of “The 24rd International Congress on Sound & Vibration”, 23-27 July 2017, London, UK. <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-85029431414&partnerID=MN8TOARS>; https://www.iiav.org/archives_icsv_last/2017_icsv24/content/papers/papers/full_paper_367_20170128205912237.pdf
8. Zavershinskii D., Molevich N., Ryashchikov D. Dispersion properties of magnetoacoustic waves in plasma with non-adiabatic processes // Proc. of “The 24rd International Congress on Sound & Vibration”, 23-27 July 2017, London, UK. <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-85029425572&partnerID=MN8TOARS>; https://www.iiav.org/archives_icsv_last/2017_icsv24/content/papers/papers/full_paper_240_20170130152516183.pdf
9. Arkhipov R. M., Pakhomov A. V. Emission of radiation by a resonance medium excited with a variable superluminal velocity // *Optics and Spectroscopy*. – 2017. – T. 122. – №. 5. – C. 768-773.
10. Arkhipov R. M. et al. Collisions of unipolar subcycle pulses in a nonlinear resonantly absorbing medium // *Optics and Spectroscopy*. – 2017. – T. 123. – №. 4. – C. 610-614.
11. Rosanov N. N. et al. On diagnostics of media using extremely short terahertz radiation pulses // *Optics and Spectroscopy*. – 2017. – T. 123. – №. 1. – C. 100-104.
12. Arkhipov R. M. et al. Nonlinear-photonics devices on the basis of the coherent interaction of optical radiation with resonant media (a review) // *Optics and Spectroscopy*. – 2017. – T. 122. – №. 6. – C. 949-954.
13. Munhoz D. S. et al. Air flow control around a cylindrical model induced by a rotating electric arc discharge in an external magnetic field. Part II // *Journal of Technical Physics*. – 2017. – T. 62. – C. 1171-1176.
14. Munhoz D. et al. Air flow control around the cylindrical rotating model by means of rotating electric arc in an external magnetic field // *Procedia Engineering*. – 2017. – T. 176. – C. 675-680.
15. Zavershinskii I. P. et al. The stability of swirling flows with a heat source // *High Temperature*. – 2017. – T. 55. – №. 5. – C. 746-752.
16. Arkhipov R. M. et al. Population density gratings induced by few-cycle optical pulses in a resonant medium // *Scientific reports*. – 2017. – T. 7. – №. 1. – C. 12467.
17. Pakhomov A. V. et al. All-optical control of unipolar pulse generation in a resonant medium with nonlinear field coupling // *Physical Review A*. – 2017. – T. 95. – №. 1. – C. 013804.
18. Arkhipov R. M. et al. Population difference gratings produced by unipolar subcycle pulses in a resonant medium // *Quantum Electronics*. – 2017. – T. 47. – №. 7. – C. 589.
19. Arkhipov R. M. et al. Radiation of a resonant medium excited by few-cycle optical pulses at superluminal velocity // *Laser Physics*. – 2017. – T. 27. – №. 5. – C. 053001.
20. Arkhipov M. V. et al. Generation of unipolar half-cycle pulses via unusual reflection of a single-cycle pulse from an optically thin metallic or dielectric layer // *Optics Letters*. – 2017. – T. 42. – №. 11. – C. 2189-2192.
21. Arkhipov R. M. et al. Generation of unipolar pulses in nonlinear media // *JETP Letters*. – 2017. – T. 105. – №. 6. – C. 408-418.

24 Результаты Лаборатории химических и электроразрядных лазеров СФ ФИАН

В данном разделе описаны результаты изучения кинетики тушения $O_2(b^1\Sigma)$ молекулами атмосферных газов; результаты измерений спектральных характеристик линий метастабильных атомов инертных газов и концентраций метастабильных атомов в плазме барьерного разряда в приложении к недавно предложенному лазеру на инертных газах с оптической накачкой (ЛО-НИГ); результаты моделирования плазмы тлеющего разряда.

24.1 Кинетика тушения $O_2(b^1\Sigma)$ молекулами атмосферных газов

Молекула кислорода в синглетном электронно-возбужденном состоянии $b^1\Sigma$ проявляет повышенную реакционную способность по сравнению с молекулой кислорода в основном состоянии и играет существенную роль в атмосферных явлениях, в кислородно-содержащих газовых разрядах, процессах горения, в активной среде кислородно-йодного лазера, однако кинетика энергообменных процессов с её участием, в особенности температурные зависимости, изучены недостаточно подробно.

Схема эксперимента по наблюдению эмиссии от кислорода $O_2(b^1\Sigma)$ представлена на рисунке 24.1. Через флуоресцентную ячейку (ФЯ) продувалась газовая смесь, содержащая кислород. Нагрев газа производился путем нагрева стенок ФЯ. Эксперименты по лазерно-индуцированной флуоресценции кислорода производились с помощью лазера на красителях (Sirah), который накачивался второй гармоникой (532 нм) YAG-лазера (Quanta-Ray).

Скорость тушения $O_2(b^1\Sigma)$ при столкновении с молекулами O_2 , N_2 , CO_2 и H_2O определена в диапазоне температур от 297 до 800 К. Молекула $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ возбуждалась импульсами света на длине волны 690 нм длительностью 10 нс от лазера на красителях на длине. Наблюдалась кинетика дезактивации путем наблюдения временной зависимости интенсивности флуоресценции на переходе $b^1\Sigma_g^+ - X^3\Sigma_g^-$ молекулы кислорода. Измерялась скорость тушения люминесценции от концентрации и температуры молекул O_2 , CO_2 , N_2 и H_2O . Скорость тушения K люминесценции линейно зависела от концентрации молекул N_M : $K=k_M(T)N_M$, где k_M - константа скорости тушения.

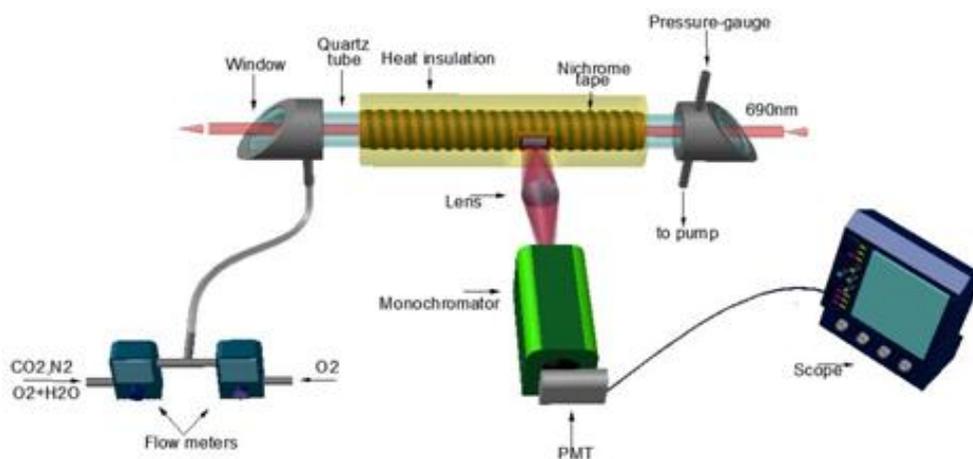


Рисунок 24.1 – Схема эксперимента по измерению скорости тушения $O_2(b^1\Sigma_g^+)$

Получены значения констант скоростей тушения в диапазоне температур 297-800 К с шагом 50 К. Аналитически температурную зависимость можно приближенно описать форму-

лами:

$$k_{\text{CO}_2} = (1.18 \pm 0.05) \times 10^{-17} \times T^{1.5} \times \exp\left(\frac{595 \pm 25}{T}\right); k_{\text{N}_2} = (8 \pm 0.3) \times 10^{-20} \times T^{1.5} \times \exp\left(\frac{503 \pm 21}{T}\right), \text{ и}$$

$$k_{\text{H}_2\text{O}} = (1.27 \pm 0.08) \times 10^{-16} \times T^{1.5} \times \exp\left(\frac{675 \pm 27}{T}\right). k_{\text{O}_2} = (7.4 \pm 0.8) \times 10^{-17} \times T^{0.5} \times \exp\left(\frac{-1104.7 \pm 53.3}{T}\right) \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}.$$

24.2 Спектроскопия линий атомов инертных газов

Для реализации ЛОНИГ необходима наработка достаточных количеств ($10^{12} \div 10^{13} \text{ см}^{-3}$) метастабильных атомов инертных газов при атмосферном давлении в непрерывном режиме и знание коэффициентов столкновительного уширения и сдвига линий инертных газов для разных газовых смесей. На рисунке 24.2 изображена схема экспериментальной установки для спектроскопических измерений. В разрядной ячейке в ВЧ разряде нарабатывались метастабильные атомы аргона и криптона в заданном диапазоне давлений, при котором столкновительное и доплеровское уширения были одного порядка. Это позволило учитывать меняющуюся в ходе эксперимента температуру в разрядной камере за счет определения гауссовой компоненты профиля поглощения Фойгта. Небольшая отпаянная разрядная ячейка низкого давления с аргоном, в которой зажигался ВЧ разряд, использовалась в качестве репера оптической частоты, относительно которого определялся сдвиг линии поглощения аргона в измерительной ячейке при изменении давления. Измеренные значения коэффициентов столкновительного уширения приведены в таблице 24.1. Вместо ВЧ разряда могла быть установлена разрядная ячейка с барьерным разрядом, где производились измерения концентраций метастабильных атомов по измерению площади под кривыми поглощения спектральных линий.

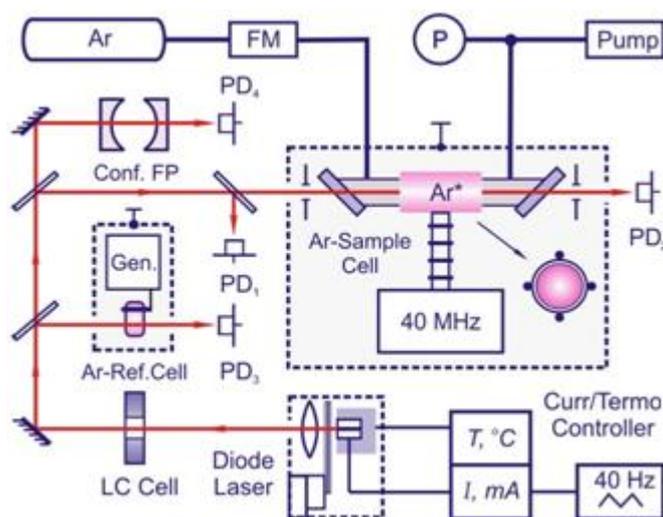


Рисунок 24.2 – Схема экспериментальной установки для спектроскопических измерений. Ar – аргон или другие инертные газы и их смеси, PD – фотодиоды, FP – интерферометр Фабри-Перо, FM – расходомер, Ar-Ref.Cell – ячейка с Ar низкого давления для привязки частоты линии аргона

Измеренное значение коэффициента столкновительного сдвига линии Ar 811.5 нм атомами аргона составило $-(2.1 \pm 0.1) \times 10^{-10} \text{ с}^{-1} \text{ см}^3$.

Объемный барьерный разряд атмосферного давления формировался в смесях инертных газов между двумя электродами из алюминиевого сплава, размером 18×6 мм, покрытыми слоями Al_2O_3 полученными в результате анодирования в щавелевой кислоте. Межэлектродное рас-

стояние составляло 2-3 мм. К электродам прикладывалось переменное напряжение в форме меандра с частотой 20 кГц. Напряжение разряда не превышало 400 В, ток – до 70 мА, максимальная мощность, вкладываемая в разряд порядка 10 Вт.

Таблица 24.1 – Значения коэффициентов столкновительного уширения (ξ) для аргона и криптона, в единицах $10^{-10} \text{ с}^{-1} \text{ см}^3$

	Столкновительные партнёры			
	He	Ne	Ar	Kr
Ar, 811.5 нм	3.1±0.1	1.3±0.1	2.8±0.1	
Kr, 811.3 нм	3.1±0.1	1.50±0.05	3.5±0.3	2.4±0.2

Измеренные концентрации Ar($1s_5$), Kr($1s_5$) и Xe($1s_5$) в плазме барьерного разряда в смесях с He при давлении до атмосферного, в зависимости от параметров разряда составляло $10^{11} \div 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

24.3 Моделирование плазмы тлеющего разряда

Параметр приведенной напряженности электрического поля E/N является, как известно, важнейшей характеристикой плазмы. Например, именно этот параметр оказывает наиболее существенное, определяющее влияние на эффективность наработки в разрядах электронно-возбужденных молекул синглетного кислорода.

В 2017 г. в ходе работ по данному подразделу показано, что для расчета параметра E/N плазмы положительного столба тлеющего разряда в кислороде применима упрощенная модель, в которой пренебрегается наличием в плазме отрицательных ионов, их влиянием на распределение заряженных частиц. Представлены используемые в расчетах зависимости скорости ионизации и характеристической энергии электронов в плазме кислорода, которые получены на основе решения кинетического уравнения с сечениями процессов из недавних работ. Представлены значения параметра E/N из многих экспериментальных работ. Сравнение показывает, что рассчитанные по модели значения E/N, оказываются в полном качественном и хорошем количественном согласии с экспериментальными. Они дают хорошее начальное приближение, требующееся при расчетах в полных моделях, учитывающих отрицательные ионы. В диапазоне параметра NR (N – концентрация частиц, R – радиус трубки) от 6×10^{15} до $7 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ обеспечивается полное количественное согласие. При дальнейшем от $7 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ увеличении параметра NR появляется и нарастает небольшое превышение расчетных значений над экспериментальными. Не исключено, что и эти расхождения вызваны неточностями результатов эксперимента в области NR больше $7 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$, где измерения проведены в единственной работе. Предложенная расчетная модель при её сравнительной простоте обеспечивает точность, достаточную для большинства приложений.

Указаны физические особенности, благодаря которым пренебрежение влиянием процессов с участием отрицательных ионов не вызывает больших количественных погрешностей E/N. Важнейшая особенность – это то, что в плазме кислорода, как и в плазме без отрицательных ионов, определяющими являются диффузионные потери заряженных частиц, а потери, вызываемые рекомбинацией отрицательных и положительных ионов, являются малыми по отношению к диффузионным.

В 2017 г. в рамках работ по данному подразделу также сформулирована расширенная система уравнений, описывающая распределение заряженных частиц в плазме положительного

столба разряда в электроотрицательном газе. Моделью и, соответственно, системой уравнений описывается присутствие в плазме двух типов отрицательных ионов.

24.4 Выводы

Впервые предложены простые соотношения, позволяющие аппроксимировать значения констант скоростей тушения $O_2(b^1\Sigma)$ молекулами атмосферных газов в диапазоне температур 297–800 К, что актуально для моделирования кинетики систем с молекулами синглетного кислорода. Впервые измерены коэффициенты столкновительного уширения линий аргона и криптона атомами He, Ne, Ar и Kr и коэффициент столкновительного сдвига линии Ar в Ar, причём часть из них с точностью лучше 5%. Впервые найдены конфигурации барьерного разряда, обеспечившие концентрации Ar($1s_5$), Kr($1s_5$) и Xe($1s_5$) в плазме в смесях с He при давлении до атмосферного порядка $10^{11} \div 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Предложен и подтвержден сравнением с результатами экспериментов простой метод расчета приведенного электрического поля E/N в плазме положительного столба тлеющего разряда в кислороде.

Список публикаций по проекту

1. Zagidullin M. V. et al. $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ Quenching by O_2 , CO_2 , H_2O , and N_2 at Temperatures of 300–800 K // *The Journal of Physical Chemistry A*. – 2017. – Т. 121. – №. 39. – С. 7343-7348. DOI: 10.1021/acs.jpca.7b07885;
2. Mikheyev P. A. et al. Production of Ar and Xe metastables in rare gas mixtures in a dielectric barrier discharge // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2017. – Т. 50. – №. 48. – С. 485203. DOI: 10.1088/1361-6463/aa91bf.
3. Mikheyev P. A. et al. Production of Ar metastables in a dielectric barrier discharge // *XXI International Symposium on High Power Laser Systems and Applications 2016*. – International Society for Optics and Photonics, 2017. – Т. 10254. – С. 102540X. DOI: 10.1117/12.2256172.
4. Ghildina A. R. et al. Pressure broadening coefficients for the 811.5 nm Ar line and 811.3 nm Kr line in rare gases // *XXI International Symposium on High Power Laser Systems and Applications 2016*. – International Society for Optics and Photonics, 2017. – Т. 10254. – С. 102540Y. DOI: 10.1117/12.2256708.
5. Гильдина А. Р. и др. Коэффициенты столкновительного уширения линий аргона и криптона в низкотемпературной плазме // *Фотоника*. – 2017. – №5. – С.44-51. DOI: 10.22184/1993-7296.2017.65.5.44.51.

25 Результаты Лаборатории моделирования и автоматизации лазерных систем СФ ФИАН

В данном разделе описаны исследования по формированию структурированных световых полей, в том числе обладающих орбитальным угловым моментом, их преобразованию, а также разработке способов управления характеристиками с помощью жидкокристаллического пространственного модулятора модального типа.

25.1 Спиральные пучки света с параметром поворота больше единицы

В ходе работ над проектом были проведены исследования возможности выбора базисного пучка для формирования спиральных пучков на основе смещённых псевдогауссовых и беселевых пучков. Под спиральными пучками понимаются параксиальные световые поля, распре-

деление интенсивности которых поворачивается при распространении пучка, сохраняя свою форму. Угол поворота распределения интенсивности от плоскости перетяжки до плоскости Фурье составляет $\pi\theta/2$, где θ – параметр поворота пучка. Численные эксперименты показали, что смещённый псевдогауссов пучок является хорошей основой для построения спиральных пучков в виде симметрично расположенных световых пятен (рис. 25.1).

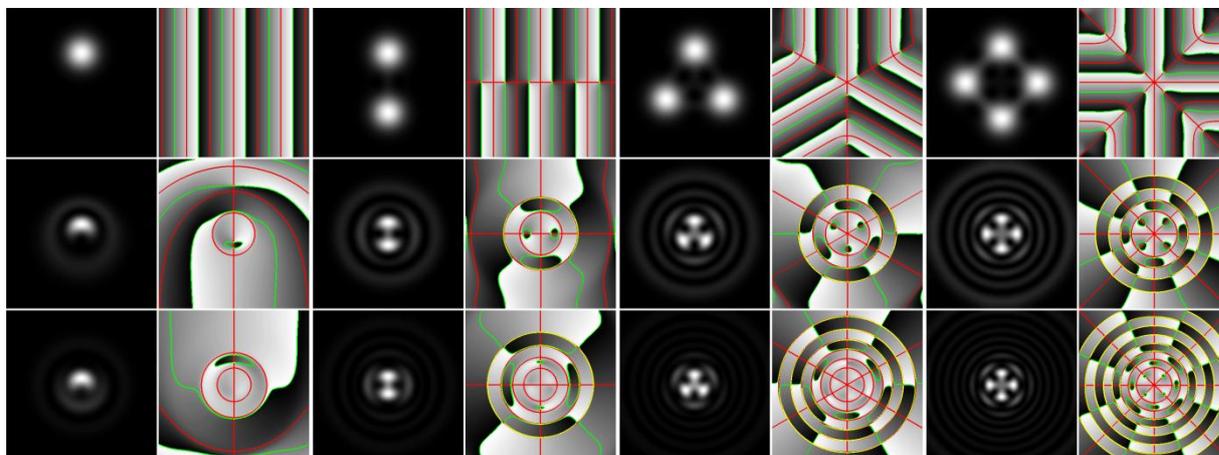


Рисунок 25.1 – Интенсивности и фазы спиральных пучков, построенных на основе смещённых псевдогауссовых пучков для параметров поворота $\theta = -1$ (верхний ряд), $\theta = -3$ (средний ряд), $\theta = -5$ (нижний ряд)

Смещённые бesselевы пучки позволяют создавать такие же световые структуры для параметра вращения $\theta = -3$, но с большей энергетической эффективностью. Кроме того, на их основе можно формировать спиральные пучки в форме произвольной плоской кривой (рис. 25.2).

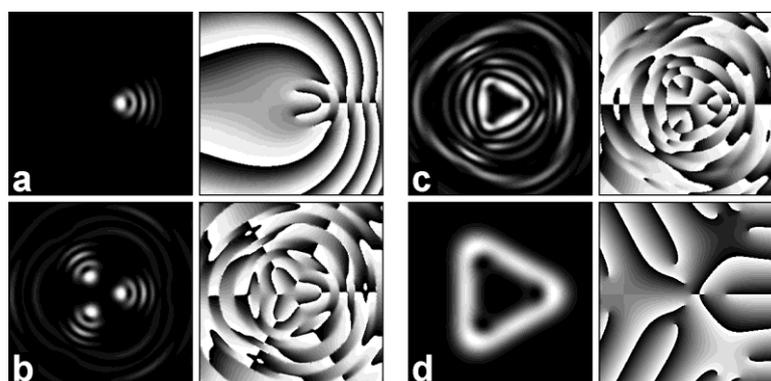


Рисунок 25.2 – Интенсивности и фазы спиральных пучков с параметром поворота $\theta = -3$, построенных на основе функции Бесселя J_0 : смещённый базисный пучок (a), три спиральных пучка, смещённых в вершины правильного треугольника (b), спиральный пучок в форме правильного треугольника (c), для сравнения показан спиральный пучок с параметром поворота $\theta = -1$ (d)

В ходе исследований сформулированы принципы, соблюдение которых позволяет выбирать наиболее эффективные способы формирования световых пучков со сложным распределением интенсивности и большими значениями орбитального углового момента.

25.2 Генерация и анализ аксиально-симметричных световых полей с угловым моментом

Работы этого раздела были направлены на анализ возможностей ЖК модуляторов света модального типа по формированию сложных световых полей. Под такими полями понимались световые поля со сложным распределением интенсивности, либо аксиально-симметричные поля, обладающие угловым моментом. Важность использования ЖК модуляторов модального типа обусловлена тем, что, хотя такие модуляторы не могут составить конкуренцию зональным пространственным ЖК модуляторам с точки зрения разнообразия и сложности формируемых световых полей, в ряде практически значимых задач модальные модуляторы могут быть весьма востребованы как недорогие и технологически простые адаптивные устройства. Были проанализированы типы световых полей, которые можно сформировать с помощью разработанного нами ранее 4-х канального модулятора (ЖК фокусатора) в разных режимах работы. Исследовались режимы работы в зависимости от величины χl (где χ – модальный параметр, l – характерный размер апертуры ЖК фокусатора), квадрат которой характеризует отношение сопротивления высокоомного слоя и импеданса ЖК слоя. Методами численного моделирования показано, что при малых (от 0.1 до 3) значениях χl эквипотенциальные линии напряжения имеют форму колец. Дальнейшее увеличение величины χl приводит к тому, что эквипотенциальные линии напряжения принимают форму квадратных контуров, а при значениях χl близких к 10 форму восьмиугольника. Методами численного моделирования также было показано, что аналогично случаю малого модального параметра, в режиме работы с высоким модальным параметром в поперечной плоскости распределение максимальной интенсивности светового поля, формируемого ЖК фокусатором, будет повторять форму эквипотенциальных линий профиля напряжения. Это позволяет формировать световые поля с распределением интенсивности в поперечной плоскости в виде границ квадратов, ромбов, параллелограммов и восьмиугольников.

Для формирования с помощью световых полей с угловым моментом была предложена новая конфигурация ЖК фокусатора. В конструкцию устройства входят два дополнительных узких электрода, а апертура дополнительно ограничивается круглой диафрагмой. Такие дополнения обеспечивают работу ЖК устройства в качестве ЖК спиральной пластинки. Прикладывая к электродам определенным образом выбранные потенциалы, можно реализовать скачок напряжения и, следовательно, скачок в профиле фазовой задержки. Это приводит к возникновению углового орбитального момента в проходящем через ЖК модулятор или отраженном от него свете. Методами численного моделирования было показано, что использование круговой диафрагмы с диаметром 0.5 мм – 1 мм позволяет получать распределение интенсивности и фазы светового поля в плоскости наблюдения хорошего качества (сопоставимого с качеством распределений для идеальной винтовой пластинки). Также результаты численных экспериментов показали возможность управления величиной топологического заряда и соответственно диаметром кольца в плоскости наблюдения. Предлагаемая конфигурация ЖК модулятора с дополнительными узкими электродами позволяет также легко менять знак топологического заряда и соответственно закрутку аксиально-симметричного светового поля.

Также были проведены численные и натурные эксперименты по анализу поведения аксиально-симметричных световых полей и при распространении вдоль оптической оси. Предварительно были рассчитаны фазовые распределения двух типов, которые могут, обеспечить преобразование однородного светового пучка в аксиально-симметричные поля с различным значением углового момента. Первый тип преобразователя – вихревой аксикон со сферической линзой, второй тип – вихревая сферическая линза. Проведено численное моделирование поведения данных световых полей при распространении вдоль оптической оси. На базе проведенных рас-

четов с помощью цифрового микроплоттера изготовлены фотошаблоны и сформированы на слоях бихромированной желатины фазовые транспаранты, обеспечивающие данные преобразования. Экспериментально исследовано поведение сформированных световых полей при распространении вдоль оптической оси для сравнения с результатами численного моделирования. Получено хорошее совпадение результатов численного и натурального экспериментов.

25.3 Исследование поведения орбитального углового момента светового поля при астигматической модовой конверсии

Рассмотрено поведение орбитального углового момента для светового поля как суперпозиции пучков Эрмита-Гаусса при астигматической модовой конверсии (рис. 25.3). Получено аналитическое выражение для орбитального углового момента таких полей. Найдены выражения для линейной комбинации из двух, трёх и четырёх пучков Эрмита-Гаусса. Показано, что астигматическая модовая конверсия для эквивалентных с точки зрения орбитального углового момента исходных световых полей приводит к существенно различному конечному результату. Поля, имеющие одинаковый орбитальный угловой момент при астигматической модовой конверсии приобретают совершенно различные значения углового момента.

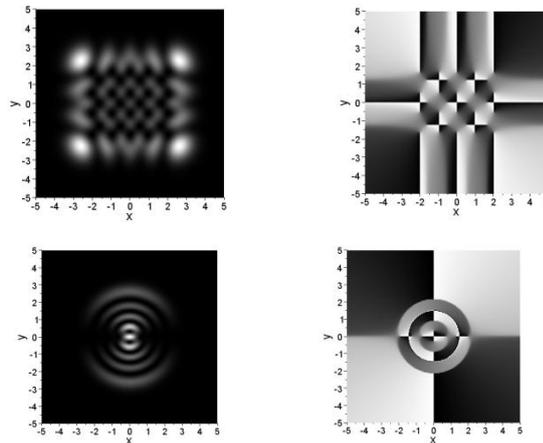


Рисунок 25.3 – Распределения амплитуды и фазы поля для комбинации пучков Эрмита-Гаусса $F = HG_N(x) \times HG_N(y) + iHG_{N+1}(x) \times HG_{N-1}(y)$, (номер моды HG N=4) до (сверху) и после (снизу) астигматической модовой конверсии

25.4 Выводы

В ходе выполнения проекта:

1. Показано, что псевдогауссовы пучки и функции Миттаг-Леффлера могут быть использованы в качестве базисных для построения спиральных пучков с распределением интенсивности в виде симметричного набора световых пятен, расположенных в вершинах правильного N-угольника, для различных значений параметра поворота.
2. Предложен способ построения спиральных пучков с параметром вращения $\theta = -3$ и разнообразными формами интенсивности на основе функций Бесселя комплексного аргумента.
3. Найдены примеры, показывающие, что построение спиральных пучков в виде замкнутых кривых с самопересечениями (фигуры Лиссажу) может быть реализовано более эффективно на основе псевдогауссовых пучков, чем обычных смещённых гауссовых пучков для случая $\theta = -1$.
4. Найдены условия формирования и управления характеристиками световых полей со слож-

ным распределением интенсивности с помощью 4-х канального жидкокристаллического модулятора в различных режимах работы в зависимости от величины модального параметра.

5. Предложена новая конфигурация модального ЖК фокусатора с дополнительными узкими электродами и ограничивающей апертуру круглой диафрагмой, обеспечивающая его работу в качестве спиральной пластинки.

6. Предложены простые соотношения для потенциалов, подаваемых на контактные электроды ЖК спиральной пластинки, для реализации аксиально-симметричных световых полей с угловым моментом.

7. На основе численных и натуральных экспериментов проанализировано поведение аксиально-симметричных по интенсивности световых полей с различным топологическим зарядом при их распространении вдоль оптической оси.

8. Показано, что при астигматической модовой конверсии светового поля как суперпозиции пучков Эрмита-Гаусса происходит радикальное изменение орбитального углового момента.

Образовательная значимость проекта

В работе над проектом активное участие приняли студенты 4-го - 6-го курсов кафедры оптики и спектроскопии Самарского университета. По результатам работы защищены 2 дипломные работы на соискание степени бакалавра и 1 квалификационная работа на соискание степени магистра.

Список публикаций по проекту

1. Котляр В. В. и др. Дробный орбитальный угловой момент Гауссова пучка с внедренным внеосевым оптическим вихрем // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41. – №. 1. – С. 22-29.

2. Abramochkin E., Alieva T. Closed-form expression for mutual intensity evolution of Hermite–Laguerre–Gaussian Schell-model beams // Optics letters. – 2017. – Т. 42. – №. 19. – С. 4032-4035.

3. Alieva T., Abramochkin E., Rodrigo J. A. Coherence singularities: Birth, evolution, possible applications // Information Optics (WIO), 2017 16th Workshop on. – IEEE, 2017. – С. 1-3. DOI: 10.1109/WIO.2017.8038106

4. Котова С. П., Майорова А. М., Самагин С. А. Возможности четырехканального жидкокристаллического модулятора по формированию световых полей со сложным распределением интенсивности // Оптический журнал. – 2017. – Т. 84. – №. 5. – С. 46-55. (перевод: Kotova S. P., Mayorova A. M., Samagin S. A. Ability of a four-channel liquid-crystal modulator to generate light fields with a complex intensity distribution // Journal of Optical Technology. – 2017. – Т. 84. – №. 5. – С. 323-330.)

5. Котова С. П., Майорова А. М., Самагин С. А. Возможности жидкокристаллических пространственных модуляторов модального типа для формирования световых полей с орбитальным угловым моментом // [XI Международный симпозиум по фотонному эхо и когерентной спектроскопии \(ФЭКС - 2017\)](#). – 2017. – С. 106-107.

6. Котова С. П. и др. Анализ возможности создания фазовых пространственных модуляторов света на основе жидкокристаллических сегнетоэлектриков // [XI Международный симпозиум по фотонному эхо и когерентной спектроскопии \(ФЭКС - 2017\)](#). – 2017. – С. 49-50.

7. Mayorova A. M., Zakharov V. P. Foreword to the Special Issue on Laser and optical technologies in biomedicine and ecology // Journal of Biomedical Photonics & Engineering. – 2017. – Т. 3. – №. 2. – С. 020101.

8. Kishkin S. A., Kotova S. P., Volostnikov V. G. Spiral Light Beams and Contour Image Processing

// Physics Procedia. – 2017. – Т. 86. – С. 131-135.

9. Volostnikov V. G. et al. Generation of two-lobe light fields with a rotating intensity distribution under propagation for single emitter spectroscopy // EPJ Web of Conferences. – EDP Sciences, 2017. – Т. 132. – С. 02012. DOI: [10.1051/epjconf/201713202012](https://doi.org/10.1051/epjconf/201713202012)

10. Kotova S. et al. Spatial phase light modulator based on the ferroelectric liquid-crystals: possibility of the device construction // EPJ Web of Conferences. – EDP Sciences, 2017. – Т. 161. – С. 01007. DOI: [10.1051/epjconf/201716101007](https://doi.org/10.1051/epjconf/201716101007)

11. Kotova S., Mayorova A., Samagin S. Capabilities of modal type liquid crystal spatial modulators for formation of light fields with orbital angular momentum // EPJ Web of Conferences. – EDP Sciences, 2017. – Т. 161. – С. 02015. DOI: [10.1051/epjconf/201716102015](https://doi.org/10.1051/epjconf/201716102015)

12. ВОРОНЦОВ Е. Н. и др. Компактная установка для демонстрации спиральных пучков света // VI Международная конференция по фотонике и информационной оптике. – 2017. – С. 594-595.

13. Volostnikov V. et al. Generation of the rotating light fields under amplitude and phase distortions // EPJ Web of Conferences. – EDP Sciences, 2017. – Т. 161. – С. 03010. DOI: [10.1051/epjconf/201716103010](https://doi.org/10.1051/epjconf/201716103010)

14. Волостников В.Г., Воронцов Е.Н., Котова С.П., Лосевский Н.Н., Прокопова Д.В., Самагин С.А. Формирование световых полей с вращением распределения интенсивности при наличии амплитудных и фазовых искажений // [XI Международный симпозиум по фотонному эхо и когерентной спектроскопии \(ФЭКС - 2017\)](#). – 2017. – С. 185-186.

15. Прокопова Д.В., Воронцов Е.Н., Лосевский Н.Н., Самагин С.А. Влияние амплитудных и фазовых искажений на формирование световых полей с вращением распределения интенсивности // XV Всероссийский молодежный Самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике: сб. тр. конф., 14-18 ноября 2017 г. – М.: ФИАН, 2017. С. 182-188.

16. Ефимова К.В., Прокопова Д.В., Лосевский Н.Н. Эксперименты по формированию спиральных пучков света // XV Всероссийский молодежный Самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике: сб. тр. конф., 14-18 ноября 2017 г. – М.: ФИАН, 2017. С. 261-268.

17. Pozhidaev E. P. et al. Electro-Optical Modulation in Planar Aligned Ferroelectric Liquid Crystals with Subwavelength Helix Pitch // Liquid Crystals and their Application Russian Journal 2017, 17 (4), 90–96, 10.18083. DOI:[10.18083](https://doi.org/10.18083). DOI:[10.18083](https://doi.org/10.18083)

18. Волостников В.Г., Кишкин С.А., Котова С.П. Прикладные вопросы распознавания контурных изображений при помощи спиральных пучков света // XV Всероссийский молодежный Самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике: сб. тр. конф., 14-18 ноября 2017 г. – М.: ФИАН, 2017. С. 113-120.

26 Результаты Лаборатории технологических лазеров СФ ФИАН

В данном разделе описаны результаты исследований по влиянию лазерного ударного воздействия на структуру и распределение остаточных макронапряжений в демпфируемом не термоупрочняемом алюминиевом сплаве АМгб; результаты отработки методики рентгеноструктурного анализа и математическая модель, описывающая фурье-образы дифракционных линий применительно к металлам с ГЦК решеткой, позволяющая определять типы и плотности дислокаций, вероятности двойникования и возникновения дефектов упаковки, средний размер блоков когерентного рассеяния и их распределение по размерам; результаты исследований, направленных на создание функциональных структур при послойном селективном лазерном плавлении готовых интерметаллидов типа Ni_xAl_y и Ti_xAl_y .

26.1 Влияние лазерных импульсов наносекундной длительности с длиной волны 1,064 мкм на структуру сплава АМгб

В качестве исследуемого материала использовался промышленный деформируемый не-термоупрочняемый сплав АМгб как характерный представитель этого класса материалов. Выбор сплава обусловлен также его широким применением в различных областях техники, прежде всего авиационной и космической.

Источником импульсов служил твердотельный YAG: Nd-лазер LSP 2500 (длина волны излучения 1,06 мкм; длительность импульса 10 нс; энергия в импульсе 0,55 Дж). Обработка образцов осуществлялась под слоем воды толщиной 2 мм при пошаговом смещении с перекрытием зон воздействия в 30-50% диаметра лазерного пучка. В качестве поглощающего покрытия использовалась ПВХ пленка толщиной 130 мкм.

Для определения распределения остаточных макронапряжений по глубине проводилось послойное травление. Макронапряжения определялись рентгеновской съемкой по сдвигу линии (511) методом $\sin^2\psi$ (метод наклона).

Основной задачей лазерной ударной обработки является создание необходимого уровня сжимающих напряжений I рода в материале на максимально возможную глубину. Оптическая металлография и сканирующая электронная микроскопия не выявили заметных микроструктурных изменений после обработки с поглощающим покрытием. Микротвердость на поверхности обработанного слоя на 10-15% выше микротвердости исходного сплава и снижается до значения микротвердости исходного материала на глубине 1 мм.

Данные рентгеноструктурного анализа (РСА) показали сильное искажение кристаллической решетки в результате увеличения плотности дефектов и появление сжимающих напряжений.

На рисунке 26.1 представлены распределения измеренных 1 и истинных (в материале) 2 напряжений в обработанном слое образца с поглощающим ПВХ покрытием (образец 1). Обработка образцов осуществлялась импульсами излучения с плотностью мощности 3,6 ГВт/см² и перекрытием зон воздействия в 40% диаметра лазерного пучка.

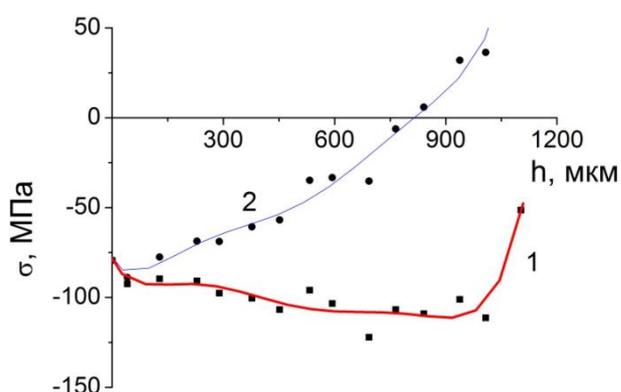


Рисунок 26.1 – Распределение остаточных напряжений в обработанном слое образца АМгб с поглощающим покрытием: 1 – измеренные напряжения, 2 – истинные напряжения

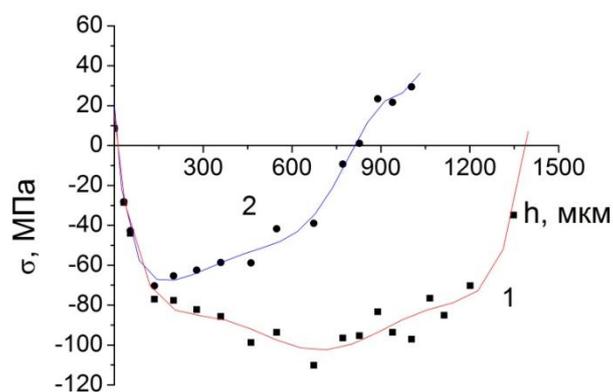


Рисунок 26.2 – Распределение остаточных напряжений в обработанном слое образца АМгб без поглощающего покрытия: 1 – измеренные напряжения, 2 – истинные напряжения

При использовании ПВХ плёнки и изменении плотности мощности от 1,3 до 5,8 ГВт/см² значение остаточных сжимающих напряжений на поверхности изменяется от -15 МПа до -120 МПа, при этом изменяется и глубина упрочненного слоя.

При обработке образцов в воде без поглощающего покрытия в результате взаимодействия плазмы оптического разряда с материалом, согласно данным электронной микроскопии и элементного анализа, на их поверхности образуются соединения с кислородом.

На рисунке 26.2 представлены распределения измеренных 1 и истинных 2 напряжений в обработанном слое образца без поглощающего покрытия. Обработка образцов осуществлялась аналогично обработке образца 1. Глубина обработанного слоя и область сжимающих напряжений для обоих образцов примерно одинаковы. Существенное отличие наблюдается в распределении напряжений по глубине.

Одним из главных преимуществ ударной лазерной обработки является большая глубина упрочненного слоя. Однако исследование структуры материала в упрочненном слое затруднительно: послойный анализ методом просвечивающей электронной микроскопии невозможен, а оптическая микроскопия дает мало информации. Для изучения структурных изменений в алюминиевых сплавах, вызванных ударным лазерным воздействием, был выбран один из методов рентгеноструктурного анализа – метод анализа профиля рентгеновских дифракционных линий.

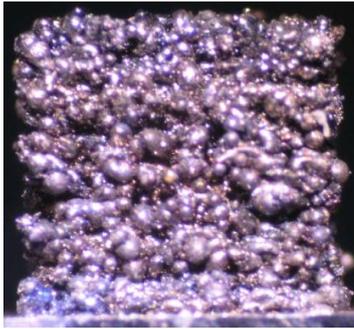
Отработка методики РСА проводилась на образцах корунда. Корунд является низкосимметричным ионным кристаллом с ромбической решеткой и высокой анизотропией упругих свойств, благодаря чему математическая модель описания дислокационных искажений дифракционных линий проще, чем для высокосимметричного слабоанизотропного ГЦК-сплава алюминия. Полученные результаты опубликованы в работе [2]. При анализе дефектов в корундах выявлены серьезные технические трудности выполнения расчетов методом наименьших квадратов, поэтому для изучения структуры сплава АМг6 разработана другая версия программы, использующая для вычислений генетический алгоритм.

К настоящему времени разработана математическая модель, описывающая фурье-образы дифракционных линий в рамках предполагаемой физической модели структуры сплава АМг6 после ударной лазерной обработки, позволяющая определять типы и плотности дислокаций, вероятности двойникования и возникновения дефектов упаковки, средний размер блоков когерентного рассеяния и их распределение по размерам.

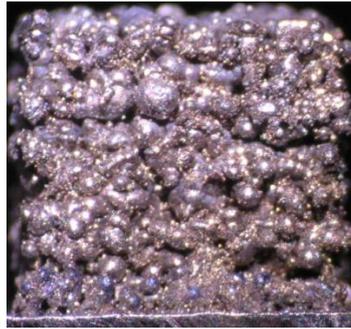
26.2 Взаимосвязь механических свойств и структурно-фазового состава интерметаллидов после селективного лазерного плавления

Основной целью работы в 2017 г. является показ принципиальной возможности создания функциональных структур и 3D изделий (в форме куб) при послойном селективном лазерном плавлении (СЛП) готовых интерметаллидов типа Ni_xAl_y и Ti_xAl_y , поиск оптимальных режимов послойного СЛП в среде аргона по планируемой схеме. А также получение и оценка данных сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), рентгеноструктурного (РСА) и рентгенофазового анализа (РФА) по структурно-фазовому составу, измерения микротвердости образцов СЛП готовых интерметаллидов.

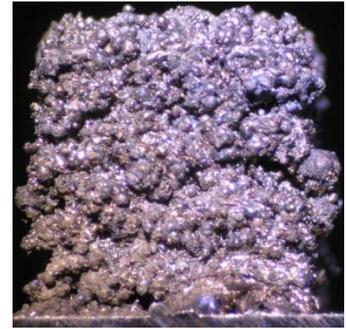
В качестве жаропрочных интерметаллидов $NiAl$, Ni_3Al и/или $TiAl$ были выбраны порошки производство Полема (Тула, РФ) марки ПВ-Н70Ю30 ($NiAl$ - фр. 20-63 мкм), ПВ-Н85Ю15 (Ni_3Al - фр. 20-63 мкм); ПВ-Т65Ю35 ($TiAl$ - фр. 0-63 мкм). Нами экспериментально были определены сначала оптимальные режимы СЛП для отдельных проходов этих порошков, режимы послойного синтеза при сканировании лазерным лучом по меандру, зигзагом и с поворотом меандра на 90° на каждом следующем слое, а также указанные выше методики, но с подогревом платформы до $T_{II} = 300^\circ C$. Обработка проводилась на иттербиевом лазере ИЛМ-100 -В (IPG, Фрязино, РФ). На рисунке 26.3 а-в показан внешний вид 3D кубиков из интерметаллидов после СЛП (режим $P = 80$ Вт; $v = 10$ см/с; аргон, $T_{II} = 200^\circ C$).



а) NiAl - ПВ-Н70Ю30
(фр. 20-63 мкм)



б) Ni₃Al - ПВ-Н85Ю15
(фр. 20-63 мкм)

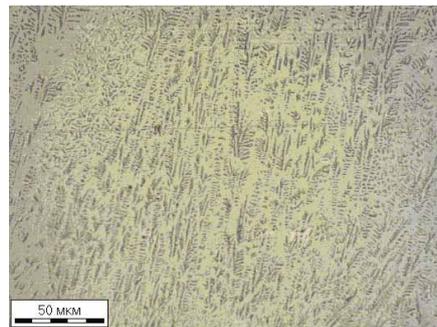
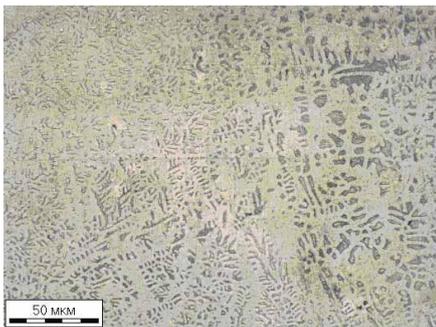


в) TiAl - ПВ-Т65Ю35
(фр. 0-63 мкм)

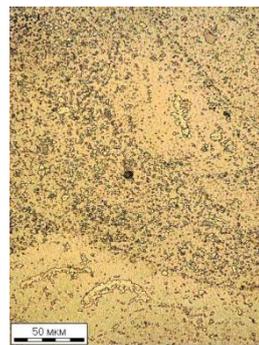
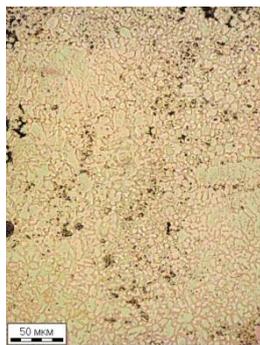
Рисунок 26.3 – Вид сбоку 3D кубиков из готовых интерметаллидов
(производство Полема, Тула, РФ)

Как видно, макроструктура всех полученных 3D изделий еще далека от совершенства. Даже визуально наблюдается значительная пористость и шероховатость сплавленной структуры, форма 3D изделий имеет существенные отклонения от заявленной (куб, площадью основания $5 \times 5 \text{ мм}^2$). По результатам оптимизации режимов СЛП для интерметаллидных суперсплавов был сделан вывод о *безальтернативной необходимости* подъема температуры в камере СЛП до 500-700°C.

Результаты оптической металлографии (ОМ) литых структур после СЛП в исследуемых материалах представлены на рисунке 26.4. Литая структура интерметаллидных фаз Ni₃Al и TiAl по данным ОМ хорошо видна. У основания (левый столбец на рисунке 26.4) она имеет более грубую дисперсность, нежели чем у поверхности (правый столбец). У Ni₃Al фазы (верхний ряд рисунка 26.4) литая структура довольно однородная, а вот у фазы TiAl (нижний ряд рисунка 26.4) видны включения пор и выделения второй фазы. Микротвердость фазы Ni₃Al ~ 360 HV_{0.1} и фазы TiAl ~ 489 HV_{0.1}.



а) Ni₃Al



б) TiAl

Рисунок 26.4 – ОМ после СЛП интерметаллидных сплавов (б-в образцы см. на рисунке 26.3)

В соответствии планом работ был осуществлен РСА и РФА полученных интерметаллидных фаз Ni_3Al и $TiAl$ после СЛП (рис. 26.5).

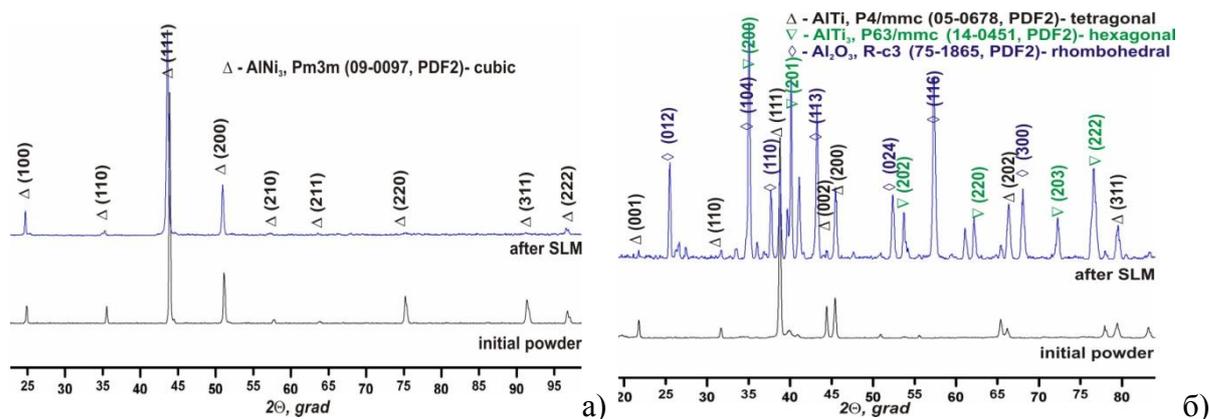
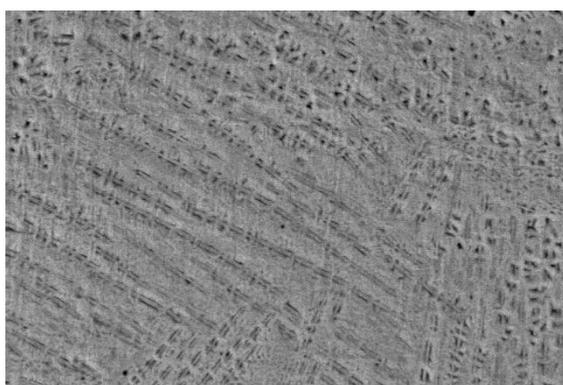
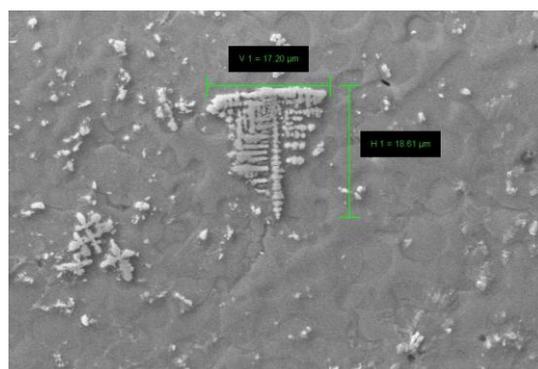


Рисунок 26.5 – РФА после СЛП интерметаллидов: а) Ni_3Al ; б) $TiAl$

Нижние дифрактограммы соответствуют исходным порошкам до лазерного воздействия. Их расшифровка показывает основные фазы Ni_3Al и $TiAl$, соответственно, и без каких-либо нежелательных включений. Т.е. ОАО Полема, в целом, представляет качественные порошки этих типов интерметаллидов. После послойного СЛП никелид алюминия (рис. 26.5 а) сохраняется, что важно для анализа его применений. Однако, титанат алюминия претерпевает существенные изменения. Кроме фазы $TiAl$, появляется фаза Ti_3Al . Заметим, что хотя обработка в обоих случаях проводилась в аргоне, здесь мы фиксируем образования оксида алюминия, что говорит о вероятном процессе превращения некоторое количества фазы $TiAl$ в Ti_3Al при СЛП, выделении Al и последующем связывании его с кислородом. Этот отрицательный факт можно объяснить либо наличием воздуха в исходном порошке, либо примесями его в техническом аргоне, использованном в экспериментах.



а) Ni_3Al - ПВ-Н85Ю15 (фр. 20-63 мкм)



б) $TiAl$ - ПВ-Т65Ю35 (фр. 0-63 мкм)

Рисунок 26.6 – СЭМ после СЛП в интерметаллидных образцах

Вид субмикроструктуры фазы Ni_3Al показан на рисунке 26.6 а и соответствует ОМ (см. рис. 26.4 а). Микроэлементный анализ со всей площади указанного изображения дает $Al - 15.17\%$ и $Ni - 84.83wt\%$, что соответствует исходной фазе Ni_3Al и данным РФА (рис. 26.5 а) после СЛП. Субмикроструктура фазы $TiAl$ (рис. 26.6 б) имеет особенности в сравнении с ОМ (рис. 26.4 б). Отчетливо видны микронные включения. Микроэлементный анализ со всей пло-

щади указанного изображения дает Al -34.04%, Ti -65.04% и N -0.9 wt%. EDX самого включения имеет состав Al -20.16%, Ti -66.63%, N -8.38 % и C -4.9wt%. Если учесть, что РФА (рис. 26.5 б) ясно показывает наличие Al_2O_3 , то можно предположить, что углерод мог выделиться из диоксида углерода, а EDX софт «перепутал» азот с кислородом (они находятся рядом по атм. массам). По данным РФА просматривается и возможность образования фазы $Al_2Ti_4C_2$ (29-0095, PDF2). В любом случае, режимы СЛП для фазы TiAl, как и результаты СЭМ + РФА, следует перепроверять.

26.3 Выводы

Проведенные исследования показали возможность эффективной лазерной ударной обработки отечественных демпфируемых нетермоупрочняемых алюминиевых сплавов и позволили освоить технику и методику лазерной ударной обработки. Методами рентгеноструктурного анализа, оптической и электронной микроскопии изучена структура сплава АМг6 до и после лазерной обработки как без поглощающего покрытия, так и с поглощающим покрытием. Получены распределения остаточных напряжений в обработанном слое при различных условиях лазерного воздействия.

В ходе исследований выявлена возможность формирования функциональных оксидных пленок и упрочненного поверхностного слоя методом лазерной паротермической обработки металлов и их сплавов [3], что открывает возможность разработки новых методов лазерного упрочнения.

На основе проведенных исследований для изучения структурных изменений в материалах выбран метод анализа профиля рентгеновской дифракционной линии как наиболее подходящий и информативный применительно к задачам лазерной обработки. Проведена отработка метода на образцах корунда. По результатам отработки для изучения структуры алюминиевых сплавов разработана версия компьютерной программы, использующая для вычислений генетический алгоритм. В рамках сделанных предположений о структуре сплава после ударной лазерной обработки разработана математическая модель, описывающая фурье-образы дифракционных линий. Программа для расчетов находится в стадии отладки и апробации.

Впервые для порошков готовых жаропрочных интерметаллидных сплавов производства Полема (Тула, РФ) марки ПВ-Н70Ю30 (NiAl - фр. 20-63 мкм), ПВ-Н85Ю15 (Ni_3Al - фр. 20-63 мкм); ПВ-Т65Ю35 (TiAl - фр. 0-63 мкм) получены режимы послойного лазерного плавления с целью создания объемных (3D) изделий на их основе. Методами оптической и сканирующей электронной микроскопии с EDX микроанализом, РСА и РФА, измерениями микротвердости образцов СЛП из готовых интерметаллидов изучены физико-механические свойствами получаемых изделий. Показано, что микротвердость фазы Ni_3Al ~ 360 $HV_{0.1}$ и фазы TiAl ~ 489 $HV_{0.1}$. Фазовый состав изделий из ПВ-Н85Ю15 сохранился в процессе СЛП без изменений, а для ПВ-Т65Ю35 выявлено образование нежелательных фаз.

Список публикаций по проекту

1. Тарасова Е.Ю. и др. Лазерное ударное воздействие на поверхность алюминиевого сплава АМг6 // Деформация и разрушение материалов и наноматериалов: тез. VII междунар. конф., 7-10 ноября 2017 г., ИМЕТ РАН. – М: ИМЕТ РАН, 2017. – С.341-342.
2. Тарасова Е. Ю. и др. Рентгеноструктурный анализ дефектной структуры микро- и наночастиц корунда // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2017. – Т. 81. – №. 11. – С. 1526-1533.
3. Бакулин И.А., Кузнецов С. И., Тарасова Е.Ю., Панин А. С. Способ лазерного паротермиче-

ского оксидирования металлических поверхностей и устройство для его осуществления (варианты) // Заявка на изобретение №2016141294.

4. Shishkovsky I., Scherbakov V. Influence additional heating on phase structure and resistivity of intermetallic SMA fabricated by PBF process // JSPM Inter. Conf. on Powder and Powder Metallurgy (~60 Anniversary~ JSPMIC 2017), Kyoto, Japan, Nov. 6-9, p. 22.
5. Shishkovsky I. TiN and AlN reaction synthesis: laser control and modeling // JSPM Inter. Conf. on Powder and Powder Metallurgy (~60 Anniversary~ JSPMIC 2017), Kyoto, Japan, Nov. 6-9, p. 33.
6. Shishkovsky I. Heat transfer and the dendrite growth kinetics into the titanium alloys during the electron beam melting // JSPM Inter. Conf. on Powder and Powder Metallurgy (~60 Anniversary~ JSPMIC 2017), Kyoto, Japan, Nov. 6-9 p. 35.
7. Shishkovsky I., Scherbakov V. Selective laser fusion of titanium based gradient alloy reinforced by nano sized TiC ceramic // II International Conference on Materials Technology and Applications 2017, ICMTA 2017, Oct. 26-29, Tokyo, Japan, p.32-33.
8. Shishkovsky I., Jacquier M. Direct metal deposition of functional graded structures in NiCr-Ti system // EuroPM 2017 Congress & Exhibition, Milan, Italy, 1-5 Oct. 2017, p. 33.
9. Шишковский И.В. Аддитивные порошковые технологии - возможности и ограничения // Программа международного научно-технического форума "Армия 2017", Моск. обл., 23 августа 2017.
10. Шишковский И.В. Комбинаторное конструирование сплавов методами лазерных аддитивных технологий // Станкоинструмент. – 2017. – №3. – С. 38-49. doi:[10.22184/24999407.2017.8.3.38.49](https://doi.org/10.22184/24999407.2017.8.3.38.49)
11. Shishkovsky I., Missemer F., Smurov I. Metal matrix composites with ternary intermetallic inclusions fabricated by laser direct energy deposition // Composite Structures. – 2018. – Т. 183. – С. 663-670. doi: [10.1016/j.compstruct.2017.09.004](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.09.004)
12. Shishkovsky I., Kakovkina N., Scherbakov V. Layerwise fabrication refractory NiCrBSi composite with gradient grow of nano WC additives by Selective Laser Melting // MECHCOMP3, 3rd International conference on mechanics of composites, Proceeding Eds. J.M. Ferreira and etc., University of Bologna, 4-7 July 2017, p. 111-112.
13. Nazarov A. et al. Fabrication of gradient structures in the Ni-Al system via SLM process // Procedia IUTAM. – 2017. – Т. 23. – С. 161-166. doi.org/10.1016/j.piutam.2017.06.017
14. Kotoban D., Nazarov A., Shishkovsky I. Comparative study of selective laser melting and direct laser metal deposition of Ni3Al intermetallic alloy // Procedia IUTAM. – 2017. – Т. 23. – С. 138-146. doi.org/10.1016/j.piutam.2017.06.014
15. Podrabinnik P., Shishkovsky I. Laser post annealing of cold-sprayed Al-Ni composite coatings for green energy tasks // Procedia IUTAM. – 2017. – Т. 23. – С. 108-113. doi.org/10.1016/j.piutam.2017.06.010

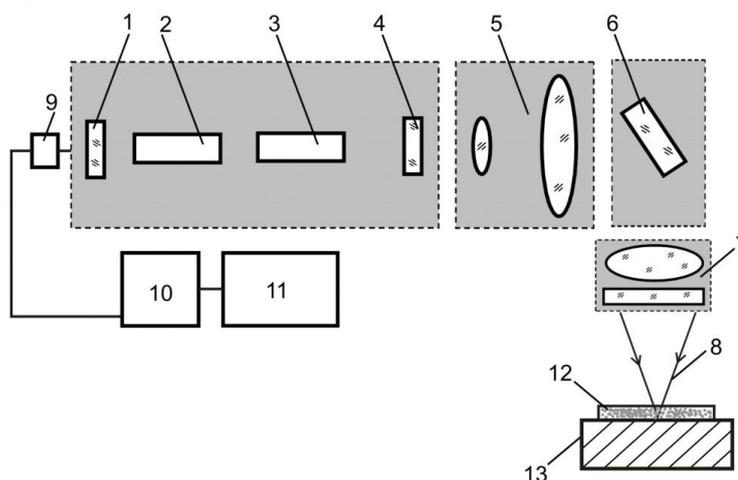
27 Результаты Лаборатории лазерной сварки СФ ФИАН

В данном разделе описаны результаты экспериментальных исследований по глубокому легированию сталей с использованием импульсного лазерного излучения тугоплавкими присадками в виде металлического и керамического порошков; результаты экспериментальных работ по получению субмикронных и наноструктур на поверхности никелевой плёнки, используя сочетание методов лазерной абляции в жидкости при комнатной и криогенных температурах и электрохимического осаждения. Также представлены результаты численных расчетов температурного поля в режущем клине инструмента при импульсной лазерной упрочняющей обработ-

ке, выполненные в трехмерной постановке методом конечных элементов.

27.1 Глубокое легирование сталей порошковыми присадками с использованием импульсного лазерного излучения

Эксперименты по глубокому легированию стали тугоплавкими присадками проводились на лазерной установке с изменяемой формой импульса излучения (рисунок 27.1) с энергий в импульсе $E = 15$ Дж и длительностью импульса $\tau = 15$ мс [1]. В качестве материала основы для легирования была выбрана сталь ШХ15.



1 – заднее зеркало; 2 – задний квантрон; 3 – передний квантрон; 4 – переднее зеркало; 5 – телескоп; 6 – поворотное зеркало; 7 – объектив; 8 – излучение; 9 – фотодиод; 10 – измеритель энергии; 11 – компьютер; 12 – порошок; 13 – образец (ШХ15)

Рисунок 27.1 – Схема экспериментальной установки

Легирование присадки в виде порошка насыпались на поверхность образца слоем толщиной 1 мм без дополнительных связующих компонентов. Легирование из порошковой фракции образцов стали 20Х23Н18 проводилось в 3 этапа.

1 этап. Сплавление порошка с подложкой на воздухе представлено на рисунке 27.2.

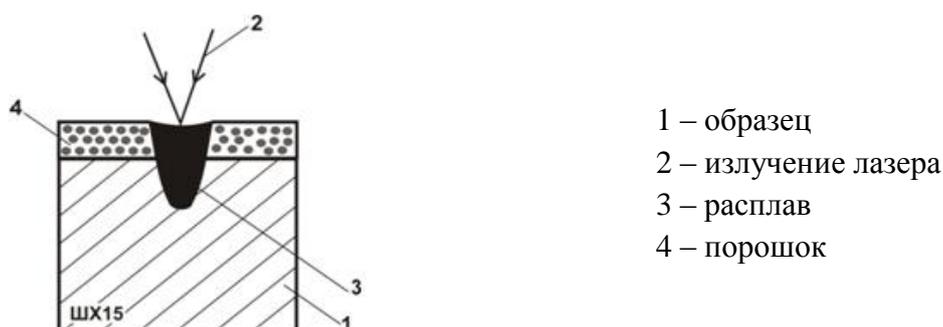
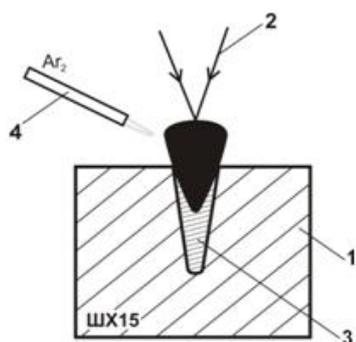


Рисунок 27.2 – Схема 1 этапа легирования

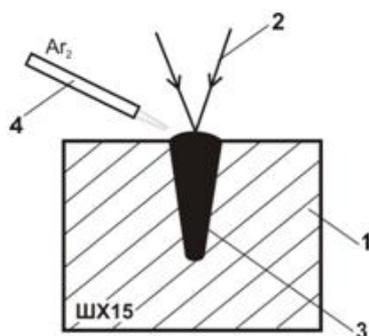
2 этап. Повторное импульсное облучение в среде аргона сфокусированным излучением с целью глубокого проникновения легирующих добавок в расплав представлено на рисунке 27.3.



- 1 – образец
- 2 – излучение лазера
- 3 – расплав
- 4 – защитный газ

Рисунок 27.3 – Схема 2 этапа легирования

3 этап. Выравнивание поверхности расплава рассфокусированным излучением в среде аргона представлено на рисунке 27.4.



- 1 – образец
- 2 – излучение лазера
- 3 – расплав
- 4 – защитный газ

Рисунок 27.4 – Схема 3 этапа легирования

Металлографический анализ расплавов проводился на металлографических шлифах экспериментальных образцов с использованием оптического микроскопа НЕОРНОТ-30, микротвердомера ПМТ-3. Качественный и количественный анализ легированного расплава исследовался на СЭМ LED 1450.

На рисунке 27.5 представлен образец стали 20Х23Н18 легированный игольчатым каркасом из порошка тантала (размер порошка 160 мкм). Легирование проводилось на воздухе и в среде аргона.



1 этап легирования



2 этап легирования



3 этап легирования

Рисунок 27.5 – Сталь 20Х23Н18 легированная игольчатым каркасом из порошка тантала

На рисунке 27.6 представлен образец стали 20Х23Н18 легированный игольчатым каркасом из порошка SiC-M-100 (размер порошка 100 мкм). Легирование проводилось на воздухе и в среде аргона.



1 этап легирования



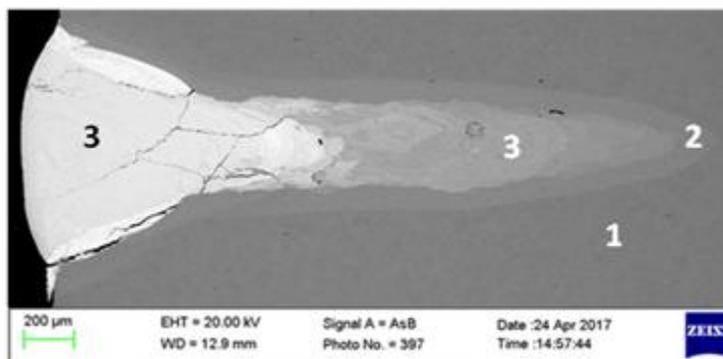
2 этап легирования



3 этап легирования

Рисунок 27.6 – Сталь 20Х23Н18 легированная игольчатым каркасом из порошка Si-M-100

Электронное изображение, полученное детектором AsB образца стали 20Х23Н18 легированное порошком тантала с обозначением фаз представлено на рисунке 27.7 и 27.8.



- 1 – основной металл
- 2 – зона термического влияния
- 3 – зона плавления

Рисунок 27.7 – Электронно-микроскопическое изображение легированного расплава порошком Ta

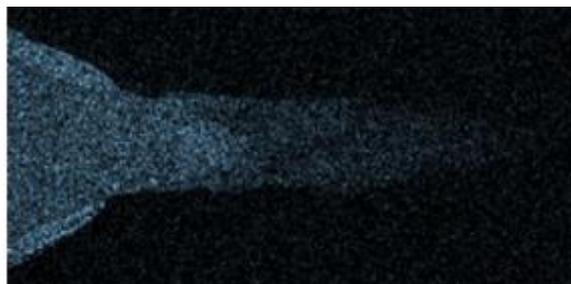
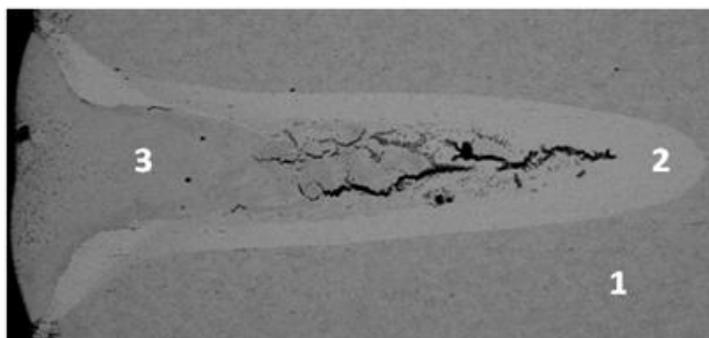


Рисунок 27.8 – Карта распределения химических элементов в расплаве (цветовая индикация) – тантал (голубой)

В результате анализа электронного изображения установлено, что вплавленное вещество (тантал) проникает на глубину 2,5 мм, образуя три структурные зоны (рисунок 27.7): зона чистого тантала, образованная равноосными и игольчатыми кристаллами (глубина 0-1 мм); зона механической смеси тантала и основного металла глубиной 1 -2,5 мм; зона отпуска основного металла в области термического влияния (слой вокруг плавления со средней толщиной 100 мкм).

Электронное изображение, полученное детектором AsB образца стали 20Х23Н18 легированное порошком SiC-M-100 с обозначением фаз представлено на рисунках 27.9 и 27.10.



- 1 – основной металл
- 2 – зона термического влияния
- 3 – зона плавления

Рисунок 27.9 – Электронно-микроскопическое изображение легированного расплава порошком SiC-M-100

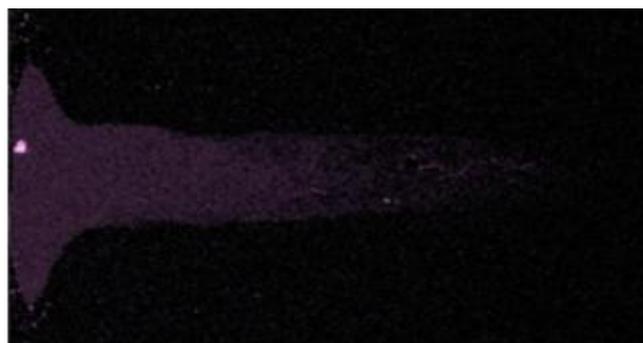


Рисунок 27.10 – Карта распределения химических элементов в расплаве (цветовая индикация) – кремний (фиолетовый)

Химический состав расплава легированного порошком SiC-M-100 представлен в таблице 27.1.

Таблица 27.1 – Результаты анализа химического состава образца стали 20X23H18 легированной порошком SiC-M-100

Измерения в зонах согласно рисунку 27.9	Массовая доля обнаруженных элементов, %			
	C	Si	Mn	Fe
Зона 1	1,16	0,43	0,67	ост.
Зона 2	1,53	0,82	0,59	ост.
Зона 3	1,98	4,27	0,48	ост.

Вплавленное вещество (кремний) проникает на глубину 2 мм, образуя зону повышенной концентрации кремния (4%) и зону термического влияния (слой вокруг вплавления со средней толщиной 100 мкм).

27.2 САЕ-обеспечение процесса автоматизации лазерного упрочнения режущего инструмента

В практике импульсной лазерной термообработки режущего инструмента (РИ) преобладает экспериментальный метод выбора режима упрочнения, позволяющий с точностью, необходимой на практике, выполнить лазерную обработку (ЛО) конкретного типа инструмента. Ряд специфических моментов, касающихся выбора режимов и условий упрочнения в зависимости

от геометрии инструмента, расположения лазерного источника на упрочняемой поверхности, временных и пространственных характеристик лазерного излучения (ЛИ), возникающих при отработке технологии упрочнения конкретного типоразмера инструмента, накладывает существенные ограничения на возможность реализации процесса упрочнения в автоматическом режиме.

Повышение эффективности упрочняющей ЛО инструмента и обеспечение автоматизации процесса упрочнения могут быть достигнуты на основе детальных численных расчетов температурного поля в режущем клине инструмента. В настоящем проекте решение данной задачи выполнено в трехмерной постановке методом конечных элементов в программном пакете ANSYS Workbench.

Моделировался нагрев режущего клина инструмента лазерным импульсом треугольной формы длительностью 10 мс с равномерным распределением плотности энергии ЛИ по сечению лазерного пятна. В экспериментах угол заострения β изменялся от 45° до 85° с шагом 5° , радиус скругления при вершине между главной и вспомогательной режущими кромками полагался равным $R=0,8$ мм, радиус заточки $r=0,1$ мм. Свойства материала соответствовали стали P18.

Область лазерного воздействия на передней поверхности инструмента моделировалась в виде двух вложенных друг в друга квадратных участков, что соответствует процессу упрочнения с использованием фокусирующего призматического растра [2, 3]. В модели размер центральной зоны был принят равным 3×3 мм, общий размер пятна ЛО – 4×4 мм. В каждой из зон распределение плотности энергии принималось равномерным. Приложение тепловой нагрузки было реализовано с помощью подведения теплового потока Heat Flux, причем в центральную зону величиной вдвое больше, чем в периферийную. Положение центра пятна задавалось в декартовых координатах: X (ось абсцисс) – вдоль главной режущей кромки, Y (ось ординат) – вдоль вспомогательной режущей кромки.

При моделировании плотность энергии ЛИ и параметры зоны лазерного воздействия (ЗЛВ) определялись при следующих условиях: 1) температура на поверхности ЗЛВ не должна превышать температуру плавления, принятую в расчетах для стали P18 как 1250°C , 2) с учетом сдвига критических точек температура дна зоны закалки была принята равной 930°C . При расчетах за показатели оптимальности режимов ЛО были приняты глубина зоны упрочнения на главной и вспомогательной режущих кромках, в центре пятна ЛО и протяженность упрочненной зоны вдоль режущих кромок.

В результате численных экспериментов были разработаны методики выбора технологических параметров процесса лазерного упрочнения РИ и рекомендации по организации процесса упрочняющей ЛО инструмента:

- при углах заострения $\beta=45-55^\circ$ однорядная двукратная с коэффициентом перекрытия $K=0,6-0,7$ импульсная упрочняющая ЛО инструмента при плотности энергии ЛИ $\varepsilon \approx 2,22-2,28$ Дж/мм² обеспечивает наилучшие характеристики ЗЛВ: глубину упрочнения до 70 мкм, коэффициент равномерности ЗЛВ до 0,93, ширину упрочненной зоны до 5,5-5,9 мм;

- при углах заострения режущей кромки $\beta=60-85^\circ$ лучшие характеристики ЗЛВ достигаются при однорядной моноимпульсной упрочняющей ЛО инструмента, если центр пятна ЛО находится на расстоянии 1,7 мм от главной режущей кромки (рис. 27.11 а). В этом случае при плотности энергии $\varepsilon \approx 2,28$ Дж/мм² достигаются глубина упрочнения 67 мкм, ширина зоны упрочнения у главной режущей кромки $\Delta x \approx 3,1-3,15$ мм и обеспечивается наибольшая равномерность глубины ЗЛВ.

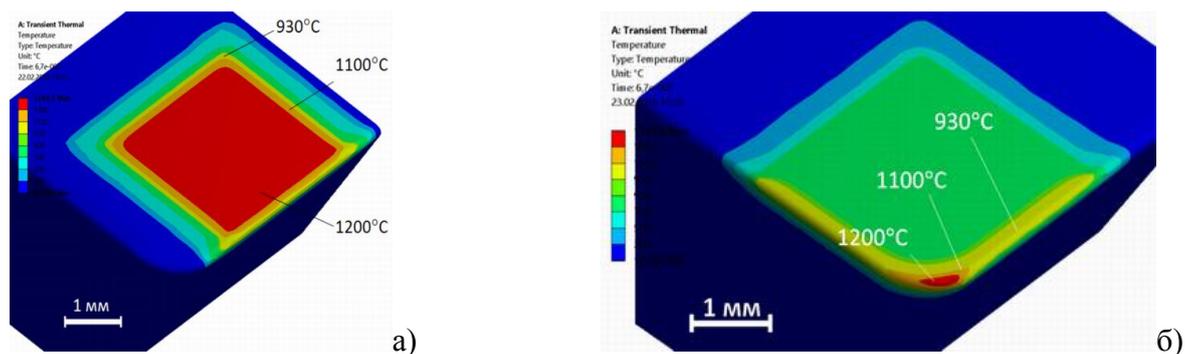


Рисунок 27.11 – Распределение температуры на передней поверхности режущего клина инструмента: а – $X=2,8$ мм; $Y=1,7$ мм; б – $X=1,5$ мм; $Y=1,6$ мм

Особый интерес и определенные сложности при упрочнении РИ любого типа вызывает ЛО вершины режущего клина. По данным моделирования для моноимпульсной ЛО вершины режущего клина с углом заострения $\beta=60^\circ$ (рис. 27.11 б) оптимальным является расположение центра зоны облучения в точке с координатами ($X=1,5$ мм; $Y=1,6$ мм). При выполнении этого условия и значении плотности энергии равном $\epsilon=1,56$ Дж/мм² не наблюдается оплавления режущих кромок, глубина упрочненной зоны в вершине инструмента составляет 138 мкм, ее протяженность в диагональном сечении равна 0,32 мм, вдоль главной режущей кромки – 2,911 мм, вдоль вспомогательной режущей кромки – 2,870 мм.

27.3 Гальваническое нанесение металлов на ПС/ППС полученных методом лазерной абляции жидких средах

Разработана оригинальная методика получения субмикронных и наноструктур на металлической (Ti, Ni) поверхности, при последовательном использовании методов лазерной абляции в жидкости и электрохимического осаждения металлов. Так, в результате воздействия 20000 лазерных импульсов (Nd:YAG лазер: $\lambda = 1064$ нм, $\tau = 250$ пс, $\nu = 20$ Гц, $Q = 0.3$ мДж, $Q_S = 0.18-0.6$ Дж/см²) на поверхности титановой пластины в среде этанола, содержащего 5 % воды, были получены конические структуры с характерным диаметром 6 мкм в центральной области и 200 нм на периферии (рисунок 27.12).

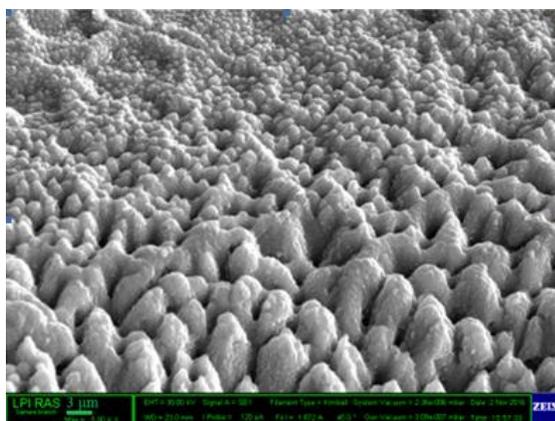


Рисунок 27.12 – Характерные СЭМ-изображения структур на поверхности титановой пластины, полученных методом лазерной абляции в этаноле, содержащем 5 % H_2O . 20000 импульсов, 0.18 Дж/см²

Изменение размера структур по радиусу пятна фокусировки связано с Гауссовым распределением плотности энергии лазерного пучка. Формирование подобных структур при многоимпульсном воздействии происходит за счёт неравномерного плавления поверхности мишени, выноса расплава в среду под воздействием ряда неустойчивостей (Кельвина-Гельмгольца или Рэлея-Тейлора) и дальнейшего «кинжального проплавления» [4]. Выявлено, что неравномерное плавление связано также с наличием как первоначального оксидного слоя на облучаемом образце, так и с формирующимся оксидным слоем, появляющимся в условиях лазерного нагрева металлической мишени в окислительной среде, который изменяет поглощательную способность поверхности мишени в целом. Толщина оксидного слоя Ti в случае лазерного воздействия в среде этилового спирта существенным образом зависит не только от параметров лазерного излучения, но и от концентрации H₂O (рисунок 27.13).

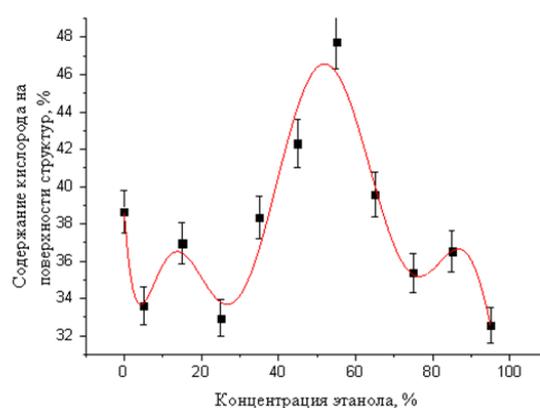


Рисунок 27.13 – График зависимости процентного содержания кислорода на вершинах структур Ti, синтезированных методом лазерной абляции в растворе этанола с водой различной концентрацией H₂O

При поглощении лазерного излучения Ti мишенью, происходит также её термическое расширение, которое приводит к растрескиванию поверхностного оксидного слоя. Данное растрескивание в процессе облучения играет роль маски, так как температура плавления оксида выше температуры плавления чистого Ti [5]. Поскольку в представленной работе производилось многоимпульсное лазерное воздействие с плотностью энергии, близкой к порогу абляции, удаление вещества с поверхности и окисление поверхности являются конкурирующими процессами. В результате этого на поверхности лазерно-индуцированных структур (рисунок 27.12) наблюдается формирование оксидного слоя регистрируемого методами электронной микроскопии.

Следующий этап разработанной методики заключался в электрохимическом нанесении никеля на описанные выше структуры и его последующее механическое отделение. Рост пленки никеля на поверхности титанового образца происходит в островковом режиме [6]. Анализ пленки после отделения от подложки показал, что ее общая толщина составляет 7 мкм (рисунок 27.14 а).

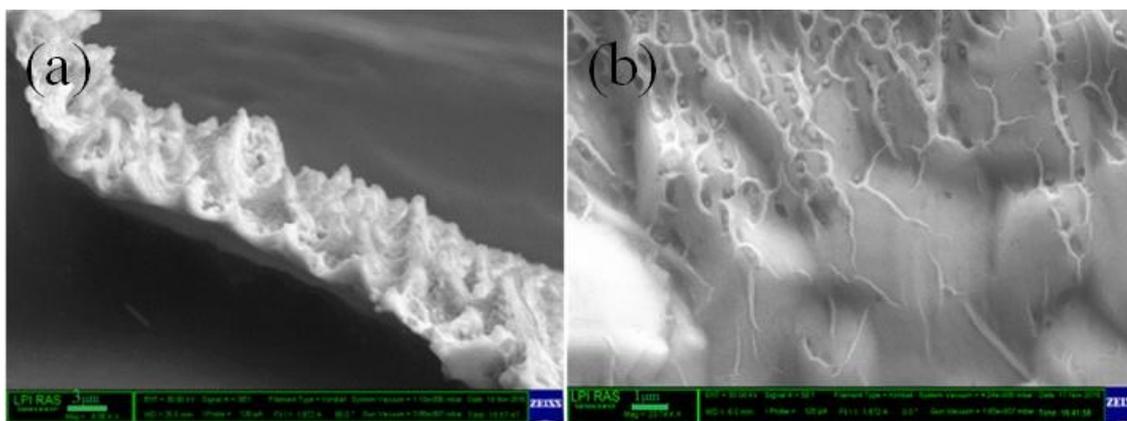


Рисунок 27.14 – СЭМ-изображения никелевой плёнки, отделённой от лазерно-структурированной титановой пластины: (а) вид сбоку. Масштабная метка 3 мкм; (б) СЭМ-изображение поверхности никелевой плёнки, формируемой на периферии облучённой титановой мишени, после отделения от титана. Масштабная метка 1 мкм

В результате электрохимического осаждения никеля в центральной области модифицированного титана происходит формирование никелевых микроструктур высотой 6 мкм, находящихся на основании толщиной 1 мкм (рисунок 27.14 а). При осаждении никеля на периферии модифицированного титана получена никелевая плёнка толщиной 7 мкм, повторяющая рельеф исходной облученной титановой поверхности и покрытая нитевидными никелевыми наноструктурами (рисунок 27.14 б). Данные структуры формируются при осаждении никеля в трещинах оксидного слоя на поверхности облучённого титанового образца. Однако на периферии обнаружены так же субмикронные никелевые ячейки с нановключениями оксида титана (рисунок 27.14). Данный факт объясняется тем, что в процессе отделения никелевого слоя от лазерно-индуцированных структур, покрытых оксидом, часть оксидного слоя осталась на поверхности плёнки.

Для того чтобы исключить внесение материала мишени, на которую производится напыление слоя никеля, в структуру синтезированных никелевых плёнок, была произведена доработка экспериментальной установки и в качестве маски использована никелевая фольга толщиной 0.3 мм. Процесс создания лазерно-индуцированных структур на поверхности мишени осуществлялся в среде жидкого аргона для минимизации химических реакций. После воздействия 20000 лазерных импульсов на поверхность никелевой фольги в среде жидкого аргона были получены вытянутые микронные структуры, промодулированные поверхностными периодическими структурами (рисунок 27.15 а).

Формирование подобных структур связано с тем, при падении электромагнитной волны на шероховатую поверхность за счёт дифракции возникают поверхностные электромагнитные волны — ПЭВ, которые распространяются вдоль границы раздела двух сред и существуют одновременно в них обеих. Интерференция ПЭВ с падающей, отражённой и преломлённой волнами определяет характер электромагнитного поля у поверхности и его диссипацию (поглощение) [7]. Никелевая плёнка, нанесённая на данные структуры и отделённая от них, полностью повторяет период структур на массивном образце (рисунок 27.15 б). Можно выделить 2 основных периода: период поверхностных структур, который составил величину 2.7 мкм, и период модулирующих ППС, равный 0.6 мкм.

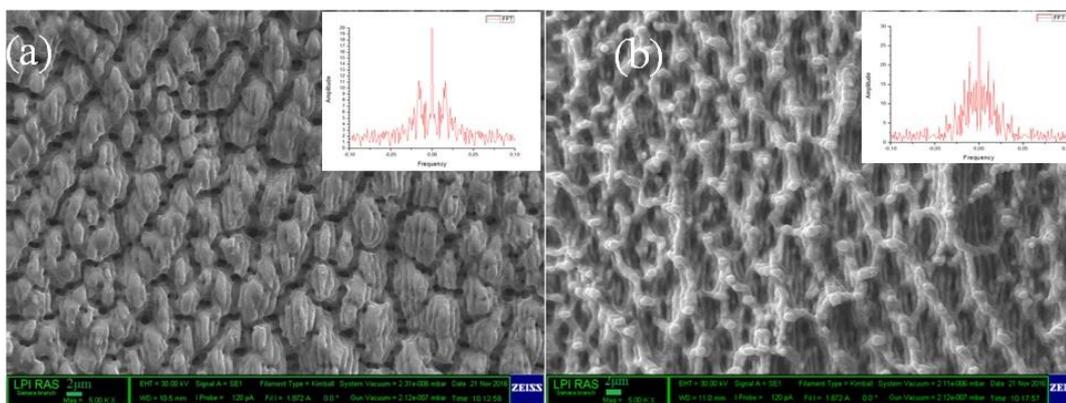


Рисунок 27.15 – (а) СЭМ-изображение характерных структур на поверхности никеля, полученных методом лазерной абляции в жидком аргоне. 0.2 Дж/см^2 , 20000 импульсов; (б) СЭМ-изображение поверхности никелевой плёнки, формируемой на облучённой никелевой мишени, после отделения. На врезках представлены быстрые преобразования Фурье СЭМ-изображений, взятые по горизонтальной прямой

27.4 Жидкофазная лазерная абляция Ni фольги нанесенной на Ti подложку

Отдельной частью работы является облучение тонкого слоя никеля, нанесённого на массивную металлическую подложку, с целью его эффективной. Облучение мишени титана, покрытой никелевой плёнкой, приводит к формированию никелевых структур, общий вид которых представлен на рисунке 27.16 а. При достижении средней плотности энергии в лазерном пучке 0.26 Дж/см^2 , каналы проплавления в никелевом слое достигают поверхности титана, формируя в центре отверстие диаметром в несколько десятков микрон и микронные перфорации на периферии (рисунок 27.16 б).

Увеличение плотности энергии до 0.6 Дж/см^2 приводит к формированию канала в никелевой плёнке и титановой пластине (рисунок 27.16 с). При этом на поверхности титана, в отличие от никеля, наблюдаются структуры, представляющие собой растрескавшийся оксидный слой. Карта распределения по элементам, представленная на врезке, показывает, что при абляции составной мишени в жидкости не происходит осаждения титана на слой никеля, что связано с высоким давлением паров жидкости и мишени в канале.

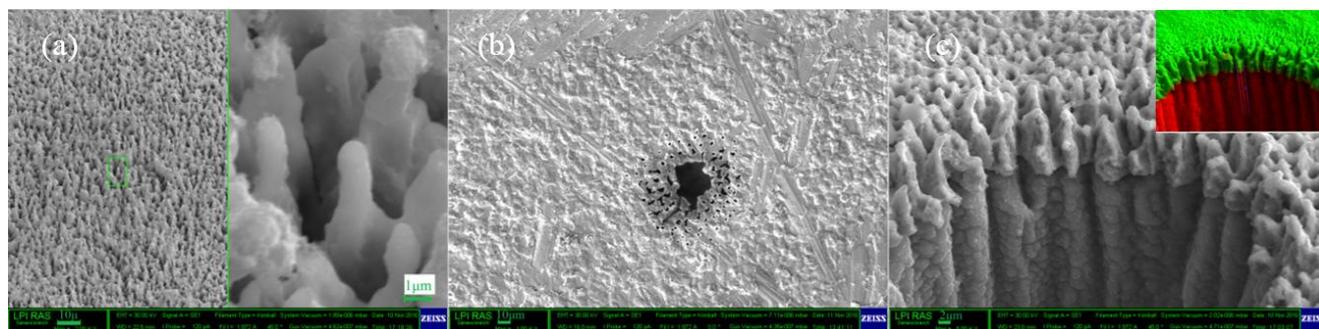


Рисунок 27.16 – СЭМ-изображение (а) никелевых структур, полученных методом лазерной абляции титановой мишени, покрытой слоем никеля, в среде этанола; (б) никелевой пленки с перфорациями после отделения от титановой пластины. 0.26 Дж/см^2 , 20000 импульсов; (с) отверстия, полученного методом лазерной абляции составного образца титана, покрытого никелем, в среде этанола. 0.6 Дж/см^2 , 20000 импульсов. На врезке представлена карта распределения по элементам

27.5 Выводы

1. Экспериментально доказана возможность глубокого локального легирования жаропрочных сталей тугоплавкими металлическими и керамическими порошками.
2. Глубина легирования порошковыми материалами составляет величину более 2 мм.
3. При глубоком импульсном лазерном плавлении отмечена высокая степень равномерности распределения легирующих элементов по объёму ванны расплава.
4. Определяющим в характере распределения и глубине проникновения легирующих материалов является не теплофизические параметры присадок, а форма, направление и глубина гидродинамических потоков в ванне расплава при импульсном воздействии лазерного излучения.
5. Глубокое локальное точечное легирование импульсным лазерным излучением с использованием порошков открывает новые возможности в создании сплавов с заранее заданными теплофизическими и механическими свойствами.
6. Разработаны параметрическая электронная модель и методика расчета температурного поля на режущих кромках и вершине режущего клина инструмента, позволяющие определять режимы и условия упрочняющей ЛО, при которых обеспечиваются наилучшие параметры ЗЛВ.
7. На основе анализа модели разработаны рекомендации по применению ЛО для упрочнения инструмента различного вида и назначения.
8. При автоматизации процесса упрочнения лезвийного инструмента разработанная методика расчета режимов ЛО инструмента может быть положена в основу выбора условий и режимов упрочнения, обеспечивающих наилучшие параметры ЗЛВ.
9. Разработан метод получения химически чистых ПС/ППС микронных и субмикронных Ni структуры на тонких пленках путем объединения метода лазерной абляции в жидкости и гальванического нанесения металлов.
10. Определена эффективность процессов лазерного окисления в зависимости от процентного содержания этанола в водно-этиловом растворе. Максимум содержания кислорода на поверхности структур приходится на 55% концентрацию этанола.

Образовательная значимость проекта

В работе над проектом активное участие приняли студенты 3-го курса, аспирант первого года обучения кафедры оптики и спектроскопии ФГАОУ «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» и аспирант 3-его года обучения кафедры «Технология машиностроения» СамГТУ.

По результатам работы подготовлены для защиты 2 курсовые работы.

Список использованных источников

1. Гусев А. А. Формирование парогазового канала в условиях глубокого плавления металла лазерным излучением миллисекундной длительности // Физика и химия обработки материалов. – 2010. – №. 6. – С. 23-29.
2. Козаков А. Т., Ярьско С. И. Исследование методом оже-спектроскопии состава поверхности многокомпонентных сплавов при импульсном лазерном воздействии // Физика и химия обработки материалов. – 2010. – №. 3. – С. 67-73.
3. Ярьско С. И. Особенности износа режущего инструмента после лазерного упрочнения на воздухе и в среде инертного газа // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2009. – №. 3. –

С. 40-43.

4. Бункин Ф. В., Трибельский М. И. Нерезонансное взаимодействие мощного оптического излучения с жидкостью // Успехи физических наук. – 1980. – Т. 130. – №. 2. – С. 193-239.
5. Kazakevich V. S. et al. Laser-induced surface modification of metals and alloys in liquid argon medium // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2016. – Т. 741. – №. 1. – С. 012188.
6. Bales G. S., Chrzan D. C. Dynamics of irreversible island growth during submonolayer epitaxy // Physical Review B. – 1994. – Т. 50. – №. 9. – С. 6057.
7. Ахманов С. А. и др. Воздействие мощного лазерного излучения на поверхность полупроводников и металлов: нелинейно-оптические эффекты и нелинейно-оптическая диагностика // Успехи физических наук. – 1985. – Т. 147. – №. 12. – С. 675-745.

Список публикаций по проекту

1. Гусев А.А., Гусева Г.В. Глубокое легирование сталей тугоплавкими присадками с использованием импульсного лазерного излучения // МиТОМ (принято в печать).
2. Яреско С. И., Балакиров С. Н. Моделирование лазерного упрочнения вершины режущего клина инструмента // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2017. – Т. 13. – №. 10. – С. 453-458.
3. Yaresko S.I., Balakirov S.N. Design of Technology of the Hardening Laser Treatment of Metal-Cutting Tool on the Method of Finite Elements // Pulsed Lasers and Laser Applications (AMPL-2017): Abstracts of XIII International Conference, Tomsk, 10-15 Sept. 2017. – Tomsk: STT: 2017. – P.95-96.
4. Балакиров С.Н., Яреско С.И. САЕ-обеспечение процесса автоматизации лазерного упрочнения режущего инструмента // "XIV Королёвские чтения": сб. тр. Междунар. молодежной науч. конф. посвящённой 110-летию со дня рождения академика С.П. Королёва, 75-летию КуАИ-СГАУ-СамГУ-Самарского университета и 60-летию со дня запуска первого искусственного спутника Земли, 3-5 октября 2017 года. – Самара: Издательство Самарского университета, 2017. – В 2 т. Т.1. – С.457-458.
5. Kazakevich V. S. et al. Physicochemical properties of submicron and nanoscale particles of Ga and AlGa alloy obtained by laser ablation in a liquid // CEUR Workshop Proceedings. Proceedings of the International conference Information Technology and Nanotechnology. Session Computer Optics and Nanophotonics. – 2017. – Vol. 1900. – P.78-83.
6. Kazakevich V. S. et al. The use of electrochemical deposition of metals at the surface microstructuring by laser ablation in liquids // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2017. – Т. 917. – №. 6. – С. 062015.
7. Казакевича В. С. и др. Физико-химические свойства субмикронных и наночастиц Ga и AlGa сплава, полученных методом лазерной абляции в жидкости // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2017). – 2017. – С. 247-252.
8. Казакевич В.С., Казакевич П.В., Яреско П.С., Камынина Д.А. Влияние физико-химических свойств жидкости на формирование лазерно-индуцированных поверхностных структур Ti // VI международная молодежная научная школа-конференция, посвященная 75-летию НИЯУ МИФИ и 95-летию академика Н.Г. Басова, Современные проблемы физики и технологий, Москва. – 2017. – С. 233-234.
9. Казакевич В.С., Казакевич П.В., Яреско П.С., Камынина Д.А. Электропроводящие свойства пленок оксида титана, индуцированных методом лазерной абляции в этиловом спирте, содержащем 5% H₂O // Pulsed Lasers and Laser Applications (AMPL-2017): Abstracts of XIII International Conference, Tomsk, 10-15 Sept. 2017. – Tomsk: STT: 2017. – P.90.
10. Kazakevich V. S., Kazakevich P.V., Yaresko P.S., D.A. Kamynina. The use of electrochemical

deposition of metals at the surface microstructuring by laser ablation in liquids // Saint Petersburg OPEN 2017 4th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures St. Petersburg. – 2017. – С. 76-77.

11. Казакевич В.С., Казакевич П.В., Ярьско П.С., Камынина Д.А. Лазерная абляция Ti в жидкости с последующей химической обработкой // Нанoeлектроника, наофотоника и нелинейная физика: докл. XII Всерос. конф. молодых ученых, 5-7 сент. 2017, Саратов. – 2017. – С. 332-333.

12. Казакевич В.С., Казакевич П.В., Ярьско П.С., Камынина Д.А. Лазерная абляция титана в криогенных жидкостях и в жидкостях, находящихся при комнатной температуре // Доклады XV Всероссийского молодежного Самарского конкурса-конференции научных работ по оптике и лазерной физике Самара. - 2017 – С. 106-112.

Заключение

В заключении отметим, что план работ по проекту выполнен полностью.

1. Проведены комплексные исследования в области пространственно-временной динамики оптических структур в поле излучения широкоапертурных лазеров и магнитной газовой динамики плазмы.
2. Впервые теоретически детально исследован способ подавления поперечных неустойчивостей с помощью когерентной оптической инжекции и исследована пространственно-временная динамика при периодической временной модуляции параметра накачки.
3. С использованием двухжидкостной магнитогазодинамической модели проведено исследование изобарической (конденсационной) неустойчивости в частично ионизированном тепловыделяющем газе, находящемся в магнитном поле, найдены условия возникновения неустойчивости конденсационной ионной моды. Важность полученных результатов состоит в том, что они показывают возможный механизм эффективного устранения филаментации излучения мощных широкоапертурных лазерных систем и определяют степень влияния магнитного поля на тепловую неустойчивость ионной компоненты неравновесной газо-плазменной среды.
4. Созданные экспериментальные установки позволили провести комплексные исследования в области физической кинетики, спектроскопии и физики газового разряда.
5. Проведены комплексные исследования в области лазерной ударной обработки отечественных демпфируемых нетермоупрочняемых алюминиевых сплавов. Дальнейшее продолжение исследований в этом направлении позволит оптимизировать процесс обработки и развить перспективные ее разновидности, а также отработать методы рентгеноструктурного анализа для изучения структурных изменений при поверхностной обработке материалов различного вида.
6. Впервые детально исследована возможность и разработана технология легирования сталей порошковыми материалами с использованием импульсного лазерного излучения.
7. По результатам оптимизации режимов СЛП для интерметаллидных сплавов был сделан вывод о *безальтернативной необходимости* подъема температуры в камере СЛП до 500-700°C.
8. Впервые разработаны параметрическая электронная модель и методика расчета температурного поля на режущих кромках и в вершине режущего клина инструмента, учитывающие влияние, как геометрии инструмента, так и пространственных и временных характеристик лазерного излучения на формирование температурного поля в зоне лазерной обработки.
9. На основе анализа модели разработаны рекомендации по применению лазерного оборудования для упрочнения инструмента различного вида и назначения. Важнейший инновационный результат проекта – при автоматизации процесса упрочнения лезвийного инструмента разработанная методика расчета режимов ЛО инструмента может быть положена в основу выбора условий и режимов упрочнения, обеспечивающих наилучшие параметры ЗЛВ.
10. Впервые показана возможность получения поверхностных структур микронных (субмикронных) и наноразмеров путем объединения методик лазерной абляции в жидкой среде, в том числе и криогенной, с методикой гальванического нанесения металлов.
11. Проведены комплексные исследования по генерации, анализу и управлению характеристиками световых полей со сложной пространственной структурой, обладающих орбитальным угловым моментом, для задач микроскопии, передачи информации и манипуляции микро- и нанообъектами.

К работам по проекту были привлечены студенты старших курсов кафедры физики и аспиранты Самарского национально-исследовательского университета. За это время они приобрели необходимый опыт использования современных теоретических и численных методов расче-

та, опыт планирования и выполнения экспериментальных работ в области оптики, лазерной физики и лазерных технологий. Приняли непосредственное участие в написании статей и квалификационных работ. Студенты и аспиранты активно принимали участие в конкурсах и конференциях разного уровня (в России, Великобритании и Японии) с докладами по материалам проекта.

Выполнение проекта обеспечило получение новых научных результатов в области современной нелинейной динамики оптических и газо-плазменных неравновесных систем, физической кинетики, спектроскопии и физики газового разряда, оптики, лазерной физики и лазерной технологии, для передачи информации в квантовых системах, а также подготовку и закрепление в сфере науки и образования научных и научно-педагогических кадров, формирование эффективных жизнеспособных научных коллективов.

В этой связи целесообразно продолжить работу в рамках дальнейшего развития проекта. Реализация этой задачи существенно расширит возможные применения результатов работ.