

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
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

«*28*» *сентября* 2019 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 2018 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.

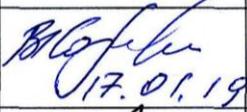
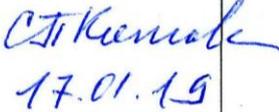
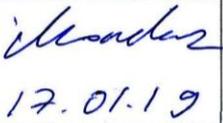
 Михеев П.А.

Ученый секретарь СФ ФИАН, д.т.н.

 Ярьско С.И.

Москва, Самара 2018

СПИСОК ОТВЕТСТВЕННЫХ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ ОТ СФ ФИАН

Директор СФ ФИАН, к.ф.-м.н	 17.01.19	Казакевич В.С. (раздел 26 - 29)
В.н.с., И.о. зав.лаб., д.ф.-м.н.	 17.01.19.	Михеев П.А. (раздел 27)
В.н.с., И.о. зав.лаб., к.ф.-м.н.	 17.01.19	Котова С.П. (раздел 28)
Гл.н.с., И.о. зав.сект., д.ф.-м.н.	 17.01.19	Молевич Н.Е. (раздел 29)

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

Ключевые слова: широкоапертурный лазер, модуляция, плазма, магнитная газодинамика, оптические структуры, магнитоакустические структуры, озон, синглетный кислород, лазер на инертных газах с оптической накачкой, метастабильные атомы, барьерный разряд, кислород, плазма, тлеющий разряд, селективное лазерное спекание/плавление, диоксид титана, керамополимерные матрицы и 3D изделия, солнечные элементы, лазерная ударная обработка, остаточные напряжения, алюминиевые сплавы, дислокации, дефекты упаковки, спиральные пучки, световые поля с фазовыми сингулярностями, модовый конвертор, оптические системы первого порядка, орбитальный угловой момент, двухлепестковые световые поля, контурный анализ, жидкокристаллический пространственный модулятор модального типа, лазерная абляция, поверхностные микро-/наноструктуры, модифицированные тонкие плёнки, металлические наночастицы, внешнее электрическое поле, фрагментация, лазерная модификация, инструментальная сталь, коэффициент трения, нормальное напряжение на контакте.

РЕФЕРАТ

Отчет на ... стр., ... рис., ... табл., ... теточников

ШИРОКОАПЕРТУРНЫЙ ЛАЗЕР, МОДУЛЯЦИЯ, ПЛАЗМА, МАГНИТНАЯ ГАЗОДИНАМИКА, ОПТИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ, МАГНИТОАКУСТИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ, ОЗОН, СИНГЛЕТНЫЙ КИСЛОРОД, ЛАЗЕР НА ИНЕРТНЫХ ГАЗАХ С ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКОЙ, МЕТАСТАБИЛЬНЫЕ АТОМЫ, БАРЬЕРНЫЙ РАЗРЯД, КИСЛОРОД, ПЛАЗМА, ТЛЕЮЩИЙ РАЗРЯД, СЕЛЕКТИВНОЕ ЛАЗЕРНОЕ СПЕКАНИЕ/ПЛАВЛЕНИЕ, ДИОКСИД ТИТАНА, КЕРАМОПОЛИМЕРНЫЕ МАТРИЦЫ И 3D ИЗДЕЛИЯ, СОЛНЕЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ, ЛАЗЕРНАЯ УДАРНАЯ ОБРАБОТКА, ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ, АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ, ДИСЛОКАЦИИ, ДЕФЕКТЫ УПАКОВКИ, СПИРАЛЬНЫЕ ПУЧКИ, СВЕТОВЫЕ ПОЛЯ С ФАЗОВЫМИ СИНГУЛЯРНОСТЯМИ, МОДОВЫЙ КОНВЕРТОР, ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПЕРВОГО ПОРЯДКА, ОРБИТАЛЬНЫЙ УГЛОВОЙ МОМЕНТ, ДВУХЛЕПЕСТКОВЫЕ СВЕТОВЫЕ ПОЛЯ, КОНТУРНЫЙ АНАЛИЗ, ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ МОДУЛЯТОР МОДАЛЬНОГО ТИПА, ЛАЗЕРНАЯ АБЛЯЦИЯ, ПОВЕРХНОСТНЫЕ МИКРО-/НАНОСТРУКТУРЫ, МОДИФИЦИРОВАННЫЕ ТОНКИЕ ПЛЁНКИ, МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ НАНОЧАСТИЦЫ, ВНЕШНЕЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ, ФРАГМЕНТАЦИЯ, ЛАЗЕРНАЯ МОДИФИКАЦИЯ, ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ СТАЛЬ, КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ, НОРМАЛЬНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ НА КОНТАКТЕ.

Цель проекта – проведение исследований в области магнитной газовой динамики плазмы и пространственно-временной динамики оптических структур в поле излучения широкоапертурных лазеров, в области физико-химической кинетики, спектроскопии, физики и химии горения, физики газового разряда, в области разработки лазерных технологий упрочнения, селективного лазерного спекания, жидкофазного аблирования металлов, в области формирования спиральных пучков света, их преобразования в линейных оптических системах, а также разработки жидкокристаллических пространственных модуляторов модального типа.

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. Проведено исследование влияния модуляции параметра накачки на неустойчивости в лазерах динамического класса В. Показано, что модуляция накачки может стабилизировать излучение лазера, если частота модуляции оказывается близкой к частоте релаксационных колебаний, а амплитуда модуляции находится в некотором заданном диапазоне.
2. В рамках существующей двухжидкостной магнитогазодинамической модели проведено исследование изобарической (конденсационной) неустойчивости в тепловыделяющей плазме с произвольной степенью ионизации, находящейся в магнитном поле, вектор индукции которого перпендикулярен направлению, вдоль которого происходят возмущения. В двумерной геометрии проведено численное моделирование эволюции газодинамических возмущений в тепловыделяющей среде в условиях изоэнтропической неустойчивости. Показан распад начального локализованного газодинамического возмущения на последовательность концентрических автоволн. Показано, что фронты двумерных автоволновых структур являются устойчивыми к поперечной модуляции, а позади фронтов образуется квазирегулярная ячеистая структура. В ходе исследования образования двумерных пространственно-временных магнитогазодинамических структур в тепловыделяющей плазме в постоянном магнитном поле было показано, что в области тепловой неустойчивости изоэнтропического типа быстрая и медленная магнитоакустические волны усили-

ваются, образуя быстрые и медленные нелинейные магнитоакустические структуры, соответственно. Численное моделирование показало, что амплитуда быстрых структур много больше амплитуды медленных структур в областях с доминирующим газодинамическим давлением. В среде с доминирующим магнитным давлением наблюдается обратная ситуация. Анизотропная теплопроводность не подавляет процесс образования магнитоакустических структур в изоэнтропически неустойчивой среде, но значительно уменьшает амплитуду волн, распространяющихся вдоль линий магнитного поля.

3. Измерена степень восстановления озона в присутствии CO и N₂O. Методом время-разрешенной абсорбционной спектроскопии исследована релаксация колебательно-возбужденных молекул озона в смесях O₂-O₃-CO/N₂O-Ar. Получена константа скорости процесса O₃(v) + CO → O₃ + CO, равная (1.5±0.2)×10⁻¹³ см³ с⁻¹. Определены порядки величин констант скоростей для процессов O₃(v) + NO → NO₂ + O₂ (~ 10⁻¹¹ см³ с⁻¹) и O₃(v) + N₂O → O₃ + N₂O (~ 10⁻¹³ см³ с⁻¹).

4. Измерены константы скоростей столкновительно-индуцированного излучения молекул O₂(a¹Δ) для следующих столкновительных партнёров: CO₂ – 10 ± 2; N₂ – 3.2 ± 0.6; SF₆ – 7 ± 1; He – 1.1 ± 0.3; Ne – 1.3 ± 0.3; Ar – 2.8 ± 0.6; Kr – 6 ± 1 в единицах 10⁻²⁴ см³ с⁻¹.

5. Измерены коэффициенты столкновительного сдвига линий криптона перехода (n+1)s[3/2]₂ → (n+1)p[5/2]₃ атомами He (0.51±0.04), Ne (-0.65±0.01), Ar (-2.07±0.08) и Kr (-1.4±0.1) в единицах 10⁻¹⁰ с⁻¹ см³.

6. Показано, что полная эффективность лазера на метастабильных атомах Xe с учётом требований к электрическому разряду составляет более 60 %. Найдены конфигурации барьерного разряда, обеспечившие концентрации Kr(1s₅) в плазме в смесях с He при давлении до атмосферного порядка 10¹¹÷10¹² см⁻³.

7. Представлена полная математическая модель положительного столба тлеющего разряда в электроотрицательном газе с одним типом отрицательных ионов без пренебрежений малыми членами. Разработана компьютерная программа, которая обеспечивает решение системы уравнений разработанной модели.

8. Экспериментально определены оптимальные режимы СЛС/П для создания 3D изделий и получены эти изделия в виде прямоугольных параллелепипедов из систем ПК + TiO₂ (поликарбонат - диоксид титана) в составах 10:1 и 5:1 (объем. доли).

9. Выполнены исследования геометрических и микроструктурных особенностей 3D образцов системы поликарбонат – диоксид титана методами линейных измерений поперечных размеров, оптической микроскопии и рентгеновского анализа. Отмечено расслоение образцов после СЛС/П на некоторых режимах. Оптическая микроскопия свидетельствует о гетерогенном распределении диоксида титана по полимерной матрице. РСА показывает наличие исходной фазы (TiO₂) без существенных изменений, что полезно для приложений в фотонике.

10. Установлено, что дополнительный термический нагрев в течение 30 мин 3D образцов в печи при температурах: 150, 200, 250, 300, 350 и 400 градусов не позволяет выявить оптимальные условия удаления полимерного связующего и фиксации каркаса из диоксида титана. Поликарбонат практически полностью деструктурирует при 400°C, однако сохранить каркас из TiO₂ не удается.

11. Проведена обработка алюминиевого сплава АМг6 без поглощающих покрытий излучением лазера LSP 2500 (λ=0,532 мкм; τ=10 нс, E = 0,4 Дж, плотность мощности 1-4 ГВт/см²). Методами рентгеноструктурного анализа, оптической и электронной микроскопии изучена структура сплава после лазерной обработки.

12. Проанализировано напряженное состояние обработанного сплава АМг6, установлено наличие в материале значительных сжимающих напряжений на глубине до 1,1 мм, максимальное значение

которых достигает -110 МПа.

13. Методом анализа профиля рентгеновской дифракционной линии рассчитаны структурные характеристики обработанных образцов сплава АМг6. Показано, что средняя плотность дислокаций после лазерной обработки увеличивается, как минимум, на порядок. Вероятность образования двойников практически равна нулю; основными дефектами упаковки являются дефекты вычитания.
14. Проведены комплексные исследования по генерации, преобразованию и управлению характеристиками световых полей со сложной пространственной структурой, обладающих орбитальным угловым моментом, для задач наноскопии и контурного анализа.
15. Получены аналитические формулы, описывающие преобразование спиральных пучков в астигматических оптических системах. Разработан алгоритм построения широкого класса спиральных пучков с параметрами вращения больше единицы в форме плоской кривой.
16. Предложены различные конфигурации модальных спиральных перестраиваемых ЖК пластинок, позволяющих формировать аксиальные оптические вихри, управлять их характеристиками (диаметром формируемых колец, величиной и знаком топологического заряда), а также перемещать сформированные кольца по апертуре устройства за счет изменения прикладываемых напряжений.
17. Исследовано влияние амплитудных и фазовых искажений на формирование двухлепестковых световых полей с помощью фазовых масок, полученных на основе оптики спиральных пучков света. Рассмотрены следующие случаи амплитудных искажений: несовпадение диаметров фазового элемента и освещающего Гауссова пучка, относительное смещение центров освещающего Гауссова пучка и элемента, хаотическая модуляция интенсивности освещающего поля, регулярная кольцеобразная модуляция интенсивности освещающего поля. Исследовались влияние хаотических фазовых искажений формирующего поле многоэлементного фазового модулятора (часть пикселей элемента) и случай неточного задания фазового распределения.
18. Найден новый способ построения обобщенных квантованных спиральных пучков с различным количеством нулей внутри порождающей кривой с различной величиной орбитального углового момента. Исследованы экстремальные свойства удельного орбитального углового момента таких световых полей.
19. На основе методов оптики спиральных пучков разработан принципиально новый метод анализа контурных изображений, свободный от недостатков, имеющихся у стандартных методов (проблема начальной точки на контуре и поворот).
20. Методом импульсной лазерной абляции в среде 96 % этилового спирта на торцах титановой фольги синтезированы два ряда микронных конусов, диаметр основания которых составлял величину 6 микрон, а высота – порядка 5 микрометров.
21. На нитаноловой проволоке диаметром 165 микрон методом импульсной лазерной абляции в среде 96 % этанола получены массивы микро-/наноструктур.
22. Разработана оригинальная методика получения тонких перфорированных металлических плёнок (толщиной 6 мкм) путём сочетания методик электрохимического осаждения и лазерной абляции в жидкости. Плотность перфораций составила величину 1 перфорация на 20 мкм², а диаметр отверстий – от 0.5 до 1 мкм ($\lambda/2, \lambda$).
23. Впервые зафиксировано формирование плотного столба наночастиц по направлению распространения лазерного излучения в случае лазерного синтеза Au наночастиц в этиловом спирте в присутствие внешнего электрического поля.
24. В результате лазерной абляции золота в условиях внешнего электрического поля наблюдалось изменение оптических характеристик коллоида в случае генерации наночастиц в среде этилового спирта. При синтезе наночастиц в дистиллированной воде приложение внешнего электрического поля не внесло изменений в спектры поглощения.

25. Изучено влияние импульсной лазерной упрочняющей обработки инструментальных сталей на адгезионную составляющую коэффициента трения при подвижном контакте с конструкционной сталью. На примере фрикционного контакта в системе втулка-конус показано, что лазерное упрочнение приводит к снижению коэффициента трения на $\sim 20-50\%$ при величине контактных нормальных напряжений $\sim 120-180$ МПа.

За отчетный период подготовлено **84** публикации в высокорейтинговых рецензируемых журналах, индексируемых в системах WoS, Scopus или РИНЦ, получено 3 Патента РФ и 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Определения, обозначения и сокращения

АдП/Т	– аддитивное производство/технологии
СЛС/П	– селективное лазерное спекание/плавление
ФГС	– функционально - градиентные структуры
CAD/CAE	– Computer Aid Design/Engineering
ЛВ	– лазерное воздействие
ЛИ	– лазерное излучение
ЛО	– лазерная обработка
ИК	– инфракрасное излучение
ЖК	– жидкокристаллический
ЗЛВ	– зона лазерного воздействия
КПМ	– керамополимерная матрица
СКСЭ	– сенсibilизированные красителями солнечные элементы
ПСЭ	– перовскитовые солнечные элементы
КПД	– коэффициент полезного действия
ПК	– поликарбонат
ПА	– полиамид
ПЕЕК	– полиэфирэфиркетон
P	– мощность ЛВ [Вт]
d	– диаметр пятна ЛИ [мм]
Sh	– расстояние между проходами ЛИ [мкм]
v	– скорость сканирования ЛИ [см/с]
s	– толщина насыпаемого слоя [мм]
D	– истинный размер ОКР
ОКР	– область когерентного рассеяния
ρ	– плотность дислокаций
α	– вероятность образования дефектов упаковки
β	– вероятность двойникования
РСА	– рентгеноструктурный анализ
РФА	– рентгенофазовый анализ
ОМ	– оптическая микроскопия
СЭМ	– сканирующая электронная микроскопия
ЛОНИГ	– лазер с оптической накачкой на метастабильных атомах инертных газов

СОДЕРЖАНИЕ

Введение

26. Результаты Лаборатории технологических лазеров и Лаборатории лазерной сварки СФ ФИАН

26.1 Оптимизация СЛС диоксида титана (TiO_2) микронных и нано размеров со связующим - полимеры (ПЕЕК, ПК, ПА, ФТ и т.п.) или титан

26.2 Характеризация образцов системы поликарбонат – диоксид титана после СЛС (геометрические, микроструктурные исследования, качественный РФА и СЭМ)

26.3 Поиск режимов пост обработки для удаления связующего и сравнительная характеристика 3D образцов на основе керамополимерных матриц и диоксида титана после этой операции

26.4 Анализ лазерной ударной обработки алюминиевых деформируемых нетермоупрочняемых сплавов импульсами наносекундной длительности с длиной волны 0,532 мкм

26.5 Лазерный синтез в жидкости металлических структур на мишенях, поперечные размеры которых меньше размеров пятна фокусировки лазерного излучения

26.5.1 Лазерная модификация никелевой плёнки микронной толщины

26.6 Лазерная абляция в жидкости с приложенным внешним электрическим полем

26.7 Трибомеханические свойства инструментальных сталей после лазерной модификации

26.8 Выводы

Образовательная значимость проекта

Список использованных источников

Список публикаций по проекту

27 Результаты Лаборатории химических и электроразрядных лазеров СФ ФИАН

27.1 Анализ скорости восстановления озона в присутствии оксидов углерода и азота

27.2 Восстановление озона в присутствии CO и N_2O

27.3 Столкновительно-индуцированное излучение $\text{O}_2(a^1\Delta)$

27.4 Эффективность лазера с оптической накачкой на метастабильных атомах Xe^*

27.5 Спектроскопия метастабильных атомов криптона в низкотемпературной плазме

27.6 Моделирование плазмы тлеющего разряда

27.7 Выводы

Список публикаций по проекту

28. Результаты Лаборатории моделирования и автоматизации лазерных систем СФ ФИАН

28.1 Преобразование спиральных пучков в линейных оптических системах

28.2 Формирование аксиально-симметричных световых полей с орбитальным угловым моментом с помощью ЖК модулятора модального типа

28.3 Влияние искажений на формирование двухлепестковых световых полей с вращением распределения интенсивности

28.4 Обобщённые квантованные спиральные пучки

28.5 Анализ контурных изображений с помощью оптики спиральных пучков

28.6 Выводы

Образовательная значимость проекта

Список публикаций по проекту

29. Результаты Теоретического сектора СФ ФИАН

29.1 Численное исследование подавления неустойчивостей в широкоапертурном лазере динамического класса В при модуляции параметра накачки

29.2 Численное моделирование эволюции магнитогазодинамических возмущений в области изоэнтропической неустойчивости

29.3 Выводы

Образовательная значимость проекта

Список публикаций по проекту

Заключение

Введение

Основное внимание в проекте было уделено решению актуальных задач, связанных с нелинейной динамикой оптических и магнитогазодинамических активных систем, с физикой спиральных пучков света, управлением их характеристик, их преобразованием в линейных оптических системах для задач высокоразрешающей наноскопии и контурного анализа, с изучением кинетики восстановления озона, измерением столкновительно-индуцированного излучения $O_2(a^1\Delta)$, измерением спектральных характеристик линий метастабильных атомов инертных газов и их концентраций в плазме барьерного разряда, моделированием плазмы тлеющего разряда, с разработкой лазерных технологий упрочнения, селективного лазерного спекания и аблирования металлов и сплавов.

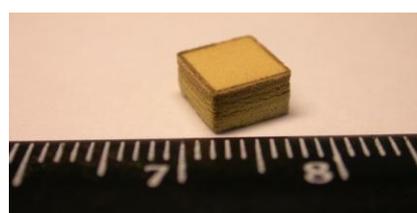
26 Результаты Лаборатории технологических лазеров и Лаборатории лазерной сварки СФ ФИАН

В данном разделе описаны результаты исследований по влиянию ударного воздействия лазерным излучением с длиной волны 0,532 мкм на структуру и распределение остаточных макро-напряжений в сплаве АМгб; приведены результаты расчетов дефектной и дислокационной структуры этого сплава методом анализа профиля дифракционной линии; данные по влиянию импульсной лазерной упрочняющей обработки инструментальных сталей на адгезионную составляющую коэффициента трения при подвижном контакте с конструкционной сталью; результаты исследований по созданию функциональных структур при послойном селективном лазерном спекании диоксида титана со связующими полимерами; по созданию микроструктур на металлических подложках; по жидкофазной лазерной абляции металлических мишеней в условиях внешнего электрического поля; новая экспериментальная методика получения перфорированных микро-структурированных металлических плёнок.

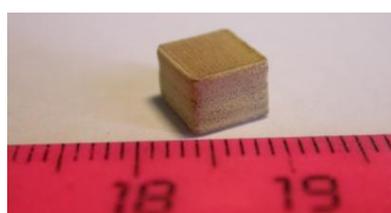
26.1 Оптимизация СЛС диоксида титана (TiO_2) микронных и nano размеров со связующим - полимерами (ПЕЕК, ПК, ПА, ФТ и т.п.) или титан

Пористые керомополимерные матрицы (КПМ) на базе полимера (поликарбонат – ПК, полиамид – ПА, полиэфирэфиркетон (ПЕЕК) и т.п.) с нанокерамическими оксидными включениями имеют широкий спектр приложений. КПМ с диоксидом титана (TiO_2) могут быть рекомендованы для решения различных задач фотоники: солнечные элементы, полимерные матрицы с диоксидом титана в качестве каталитического носителя, биополимерные матрицы с антибактериальными свойствами, электромеханические сенсоры и т.д.

В связи с вышесказанным на этапе 2018г. обрабатывались режимы послойного СЛС и создание трехмерных (3D) изделий из КПМ на основе поликарбоната и диоксида титана. Были приготовлены две смеси ПК+ TiO_2 : 10:1 и 5:1 (объемные доли).



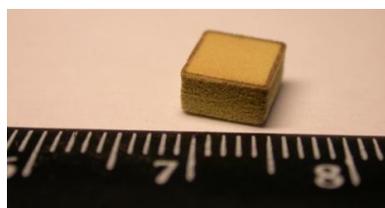
– а –



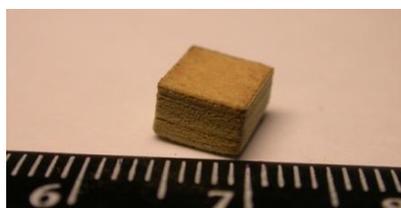
– б –



– а –



– г –



– д –



– е –

ПК + nano TiO_2 = 5:1

ПК + nano TiO_2 = 10:1

ПЕЕК + nano TiO_2 = 10:1

Рисунок 26.1 – Внешний вид 3D изделий, площадь поверхности 5×5 мм: первый ряд – СЛС без подогрева, второй – СЛС с подогревом камеры до 100°C

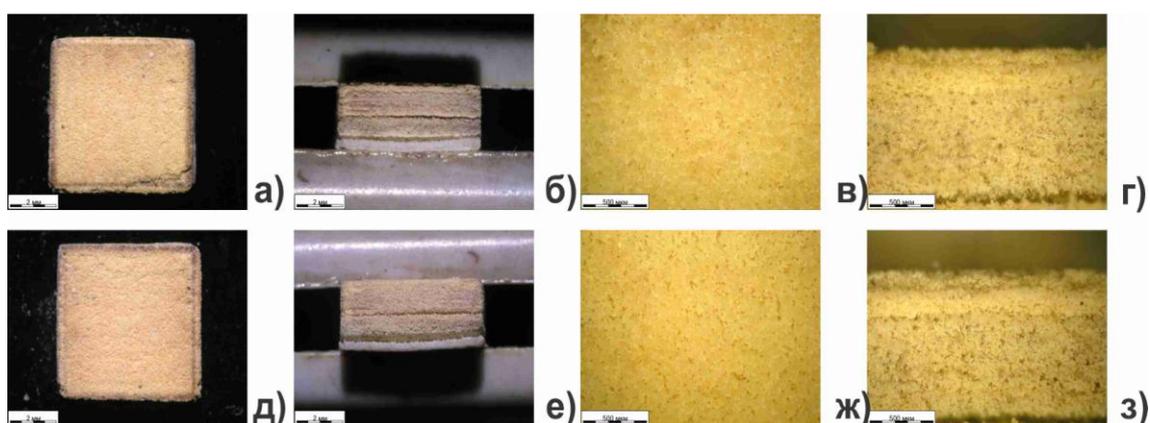
На рисунке 26.1 (а-е) показаны результаты СЛС 3D изделий в зависимости от режимов СЛС в том числе при совмещении аддитивного процесса с дополнительным подогревом всей камеры

синтеза. Температура подогрева была выбрана в диапазоне температуры текучести полимерной фазы (поликарбонат ~ 120°C). Оптимизированные режимы СЛС были следующие $P = 4.4$ Вт, $v = 60$ мм/с, $s = 0,1$ мм, $Sh = 0.05$ мм, $d = 0,3$ мм. Обработка проводилась в фокусе, направление сканирования менялось на 90° в каждом следующем слое.

На рисунке 26.1 (в, е) для сравнения приведены результаты СЛС КПМ из ПEEK + nTiO₂ (данные 2016 года). Лазерное спекание проводилось тогда с использованием ЛИ 1.07 мкм (непрерывный волоконный иттербиевый лазер). Режим СЛС – (рис. 26.1 в) 3D образцов без подогрева камеры синтеза ($P = 2.5$ Вт, $v=11$ см/с, верхний ряд) и с подогревом (рис. 26.1 е) до $T = 150^\circ\text{C}$ ($P=2.0$ Вт, $v=11$ см/с, нижний ряд). Как видно, ранее изделия получались более пористыми и имели склонность к деформации (потеря формы). Поскольку на длине волны ЛИ 1.07 мкм, полимер (ПEEK) поглощает ЛИ гораздо хуже, то и режим ЛВ был более жестким.

26.2 Характеризация образцов системы поликарбонат – диоксид титана после СЛС (геометрические, микроструктурные исследования, качественный РФА и СЭМ)

Морфология спеченных структур изучалась нами методами оптической микроскопии (ОМ). Так рисунки 26.2 и 26.3 показывают вид спеченной поверхности сверху и сбоку в системе ПК + nano TiO₂ при СЛС без подогрева и с подогревом для режимов ЛВ, указанных ранее.



Верхний ряд СЛС без подогрева, нижний ряд – подогрев 100°C. Режим СЛС указан на рис. 26.1. а, д) вид сверху (× 12.5); б, е) вид сбоку (увел. 12.5); в, ж) вид сверху (× 50); г, з) вид сбоку (× 50)

Рисунок 26.2 – Оптическая микроскопия поверхности ПК + nano TiO₂ (5:1) после СЛС/П

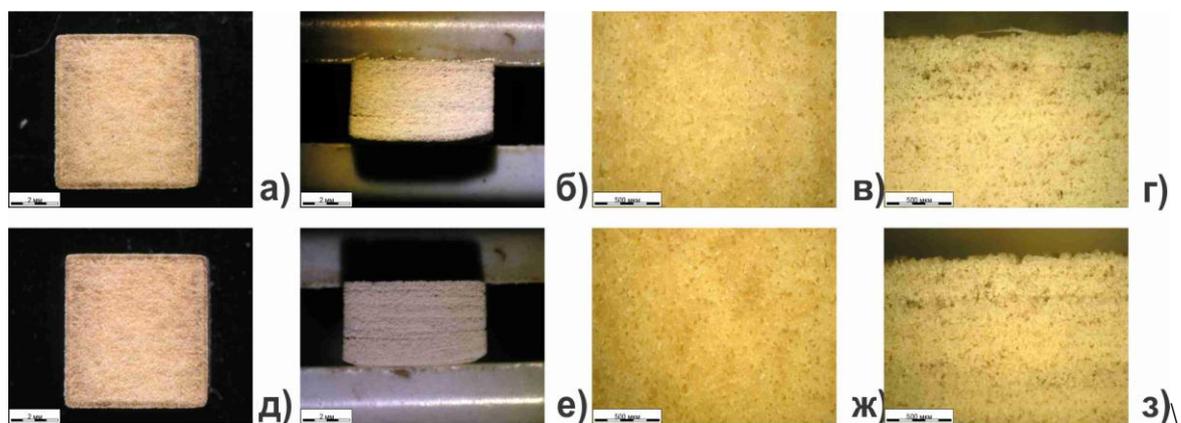


Рисунок 26.3 – Оптическая микроскопия поверхности ПК + nano TiO₂ (10:1) после СЛС/П.

Все комментарии см. в подписи к рисунку 26.2

ОМ спеченных слоев, представленная на рисунках 26.2 и 26.3, показывает, что наночастицы инкапсулированы в полимерной матрице практически незаметны; отсутствует потеря формы 3D изделия (сравни рисунки 26.2 (а, д) и 26.3 (а, д)) как вследствие незначительного дополнительного нагрева, так и при уменьшении концентрации диоксида титана. Однако на боковой поверхности отчетливо видно незначительное расслоение при составе 10:1 и более заметное расслоение при составе 5:1. Т.е. увеличение диоксида титана приводит к ухудшению качества спекаемых изделий. Поверхностная структура (вид сверху) почти однородна.

Более точные сведения об элементном и фазовом составе и об отсутствии изменений дает РСА и качественный РФА (рис. 26.4).

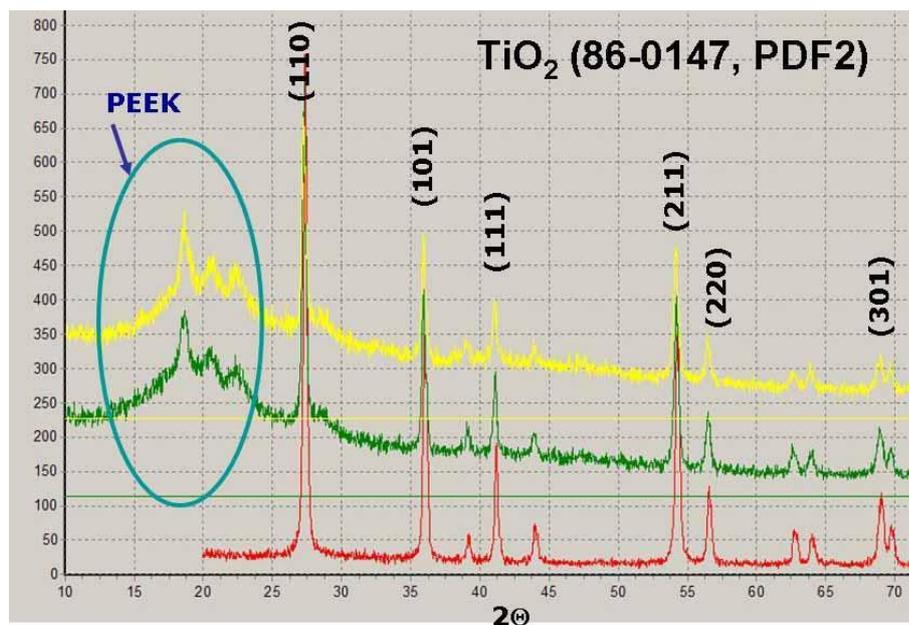


Рисунок 26.4 – Сравнение дифрактограмм чистого nano порошка TiO_2 до лазерной обработки (нижняя линия, красный цвет) и после СЛС в составе КПМ: ПEEK+ $\text{TiO}_2 = 2:1$ (зеленый) при $P = 2,2 \text{ Вт}$, $v = 7 \text{ см/с}$; ПEEK+ $\text{TiO}_2 = 10:1$ (желтый) при $P = 3,4 \text{ Вт}$, $v = 11,5 \text{ см/с}$

На рисунке 26.4 рентгенограммы исходных порошков КПМ из ПEEK и оксидной nano керамики (TiO_2) показаны внизу (т.е. без ЛВ - красный цвет). Овалом выделены несколько ярких пиков при $2\theta \sim 19-23$ градусов, которые характеризуют частичную кристалличность ПEEK. Сравнивая исходные данные (красная линия) с результатами после СЛС/П видно, что основные пики интенсивностей nano порошка (TiO_2) остались на месте и четко видны на фоне линий ПEEK. Таким образом, режимы ЛВ обеспечили сохранение физико-химических свойств КПМ и изделий на ее основе.

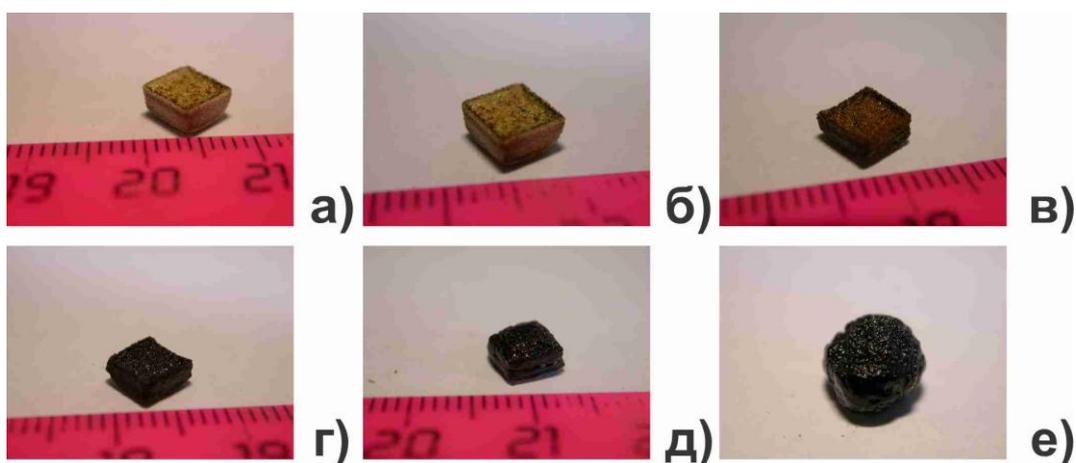
Очевидно, что слабоинтенсивное ЛВ обеспечило сплавление ПEEK в матрицу и не повлияло на фазовый состав добавки из TiO_2 , что полезно для обсуждаемых в проекте приложений фотоники.

26.3 Поиск режимов пост обработки для удаления связующего и сравнительная характеристика 3D образов на основе керамополимерных матриц и диоксида титана после этой операции

Проводилось исследование влияния не только пред-, но и пост- термической обработки на результаты послойного СЛС/П в системах (ПК + nano TiO_2). Если пред- подогрев проводился не-

посредственно в камере 3D печати (в процессе СЛС), то пост – обработка (т.е. термический отжиг) 3D образцов в муфельной печи для готовых изделий. Температурный диапазон пост - обработки выбирался уже в более широких пределах. Следовало понять, можно ли ожидать значительного (или полного) удаления полимерной матрицы с целью увеличения объёмного содержание диоксида титана. Ведь именно концентрация TiO_2 определяет КПД покрытий солнечных элементов.

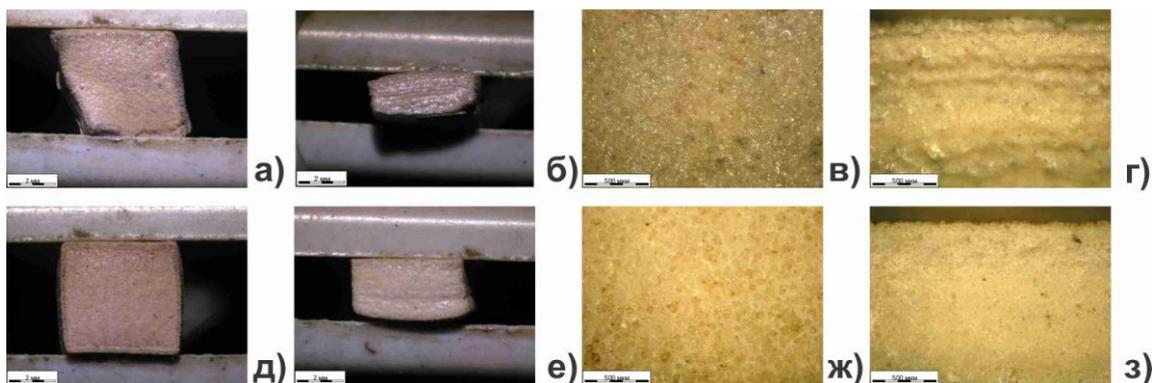
На рисунке 26.1 б показан внешний вид образцов, которые затем были подвергнуты дополнительному термическому нагреву на воздухе. Результаты такой операции в диапазоне температур от 150 до 400°C показаны на рисунке 26.5.



Температура нагрева: а – 150°C; б – 200°C; в – 250°C; г – 300°C; д – 350°C; е – 400°C

Рисунок 26.5 – Внешний вид 3D изделий из КПМ ПК + нано TiO_2 (10:1) после термического нагрева

Как видно, термический отжиг 3D образцов оказывает существенное влияние на форму и внешний вид изделий. Уже при 150°C образец теряет форму (сравни рис. 26.1 д – нагрев в камере до 100°C). При 250°C образцы начинают значительно чернеть, что свидетельствует о начале деструкции полимерной матрицы. Наконец, при температуре 400°C наступает полная потеря формы и явное разрушение 3D изделия. Однако утверждать, что на рисунке 26.5 е представлен образец из диоксида титана вряд ли проходит. Следовательно, требуются дополнительные исследования для решения задачи контролируемого снижения полимерного наполнителя без потери формы.



Режим СЛС указан на рисунке 26.1

а, д) вид сверху ($\times 12.5$); б, е) вид сбоку ($\times 12.5$); в, ж) вид сверху ($\times 50$); г, з) вид сбоку ($\times 50$)

Рисунок 26.6 – Оптическая микроскопия поверхности для (а-г) ПК + нано TiO_2 (5:1) и (д-з) ПК + нано TiO_2 (10:1) после СЛС/П + термический отжиг при 250°C

Более подробно рассмотреть процесс начала деструкции при 250°C для образцов из КПМ на основе ПК + нано TiO₂ (5:1) и ПК + нано TiO₂ (10:1) можно по рисунку 26.6. Внешний вид 3D изделия из ПК + нано TiO₂ (10:1) показан на рисунке 26.5 в. Сравнение рисунков 26.6 и 26.3 свидетельствует, что термический отжиг существенно изменяет структурную морфологию как боковой, так и верхней поверхности 3D изделия. Можно говорить о практически полном закрытии пор при температурном отжиге.

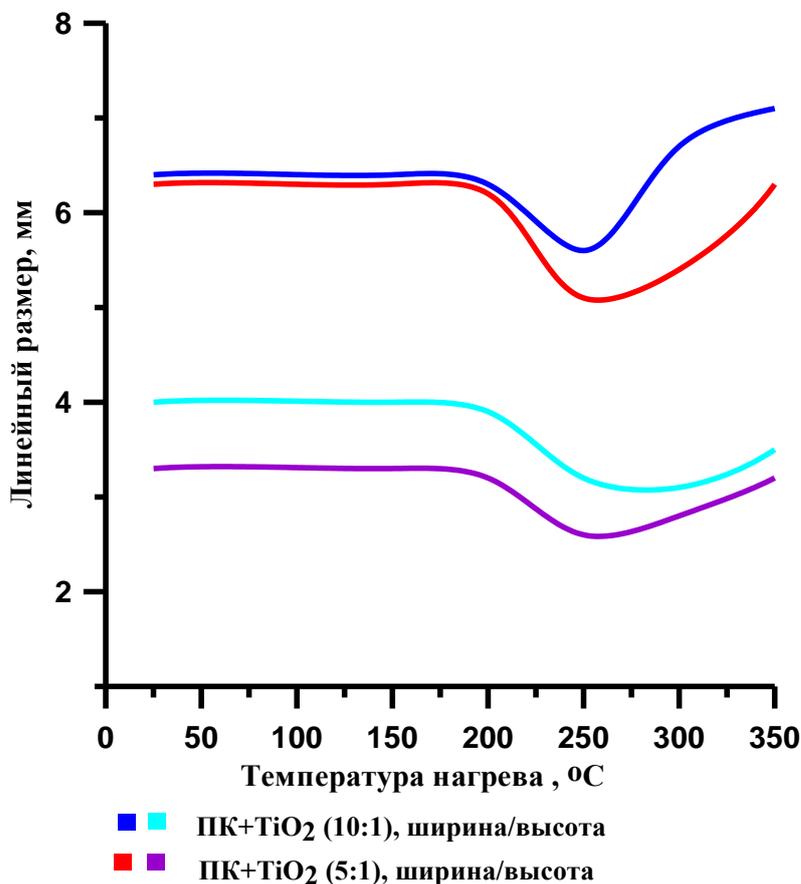


Рисунок 26.7 – Изменение линейных размеров 3D образцов после термического отжига

Все результаты по изменению геометрических характеристик 3D образцов (ширина и высота) сведены на графике (рис. 26.7). Видно, что до температур порядка 200°C, линейные размеры практически не меняются. При 250°C изменение носит наиболее существенный характер. Но и далее, по мере повышения температуры отжига до 300-400°C, ситуация не улучшается. Некоторый «возврат» к исходным размерам является только кажущимся. Реально (см. рис. 26.5) образцы начинают распухать из-за выхода газов в процессе деструкции ПК.

26.4 Анализ лазерной ударной обработки алюминиевых деформируемых нетермоупрочняемых сплавов импульсами наносекундной длительности с длиной волны 0,532 мкм

В качестве исследуемого материала использовался промышленный деформируемый нетермоупрочняемый сплав АМг6 как характерный представитель этого класса материалов.

Источником импульсов служил твердотельный YAG: Nd-лазер LSP 2500 (длина волны излучения 0,532 мкм; длительность импульса 10 нс; энергия в импульсе 0,3-0,4 Дж). Обработка образцов без поглощающего покрытия осуществлялась под слоем воды толщиной 60 мм при пошаговом смещении с перекрытием зон воздействия в 50 % диаметра лазерного пучка.

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

При обработке без поглощающего покрытия на поверхности материала образуется пленка из соединений алюминия с кислородом (рис. 26.8). Рентгенофазовый анализ не выявил структурно упорядоченных оксидных фаз, что говорит о низкой степени кристалличности образующихся соединений.

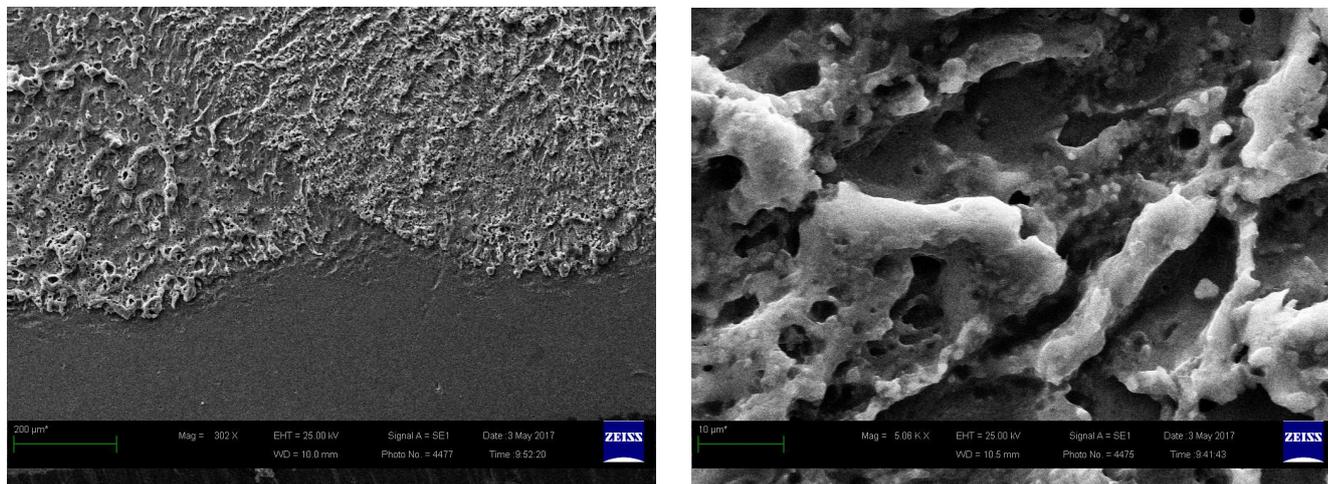
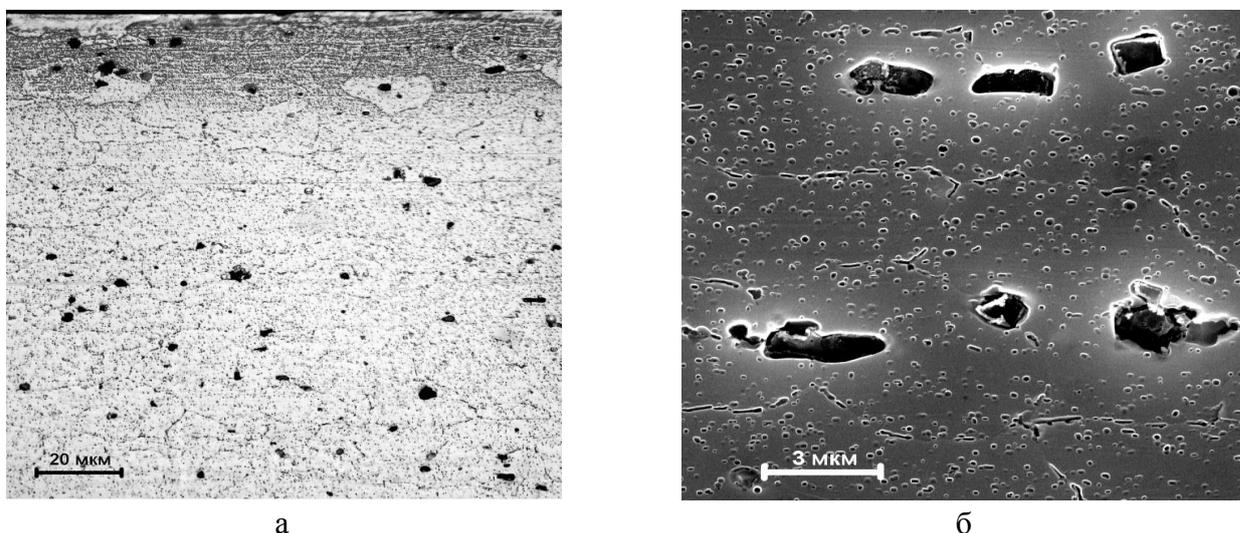


Рисунок 26.8 – Структура поверхности АМг6 после лазерной ударной обработки без покрытия

Оптическая металлография и СЭМ не выявили и заметных микроструктурных изменений по глубине зоны обработки (рис. 26.9), кроме узкого поверхностного слоя толщиной до 40 мкм.



а – оптическая микроскопия; б – растровая электронная микроскопия

Рисунок 26.9 – Микроструктура сплава АМг6 после обработки, $q = 3,6 \text{ ГВт/см}^2$

В поверхностном слое как обработанных, так и необработанных образцов наблюдаются характерные линии, являющиеся совокупностью ямок травления треугольной и прямоугольной формы, которые можно идентифицировать как выходы дислокаций на плоскость шлифа, параллельную кристаллографическим плоскостям (111) либо (100) соответственно. После лазерного ударного воздействия плотность дислокаций существенно возрастает, что проявляется в

увеличении количества ямок травления на шлифе и к их слиянию (рис. 26.10).

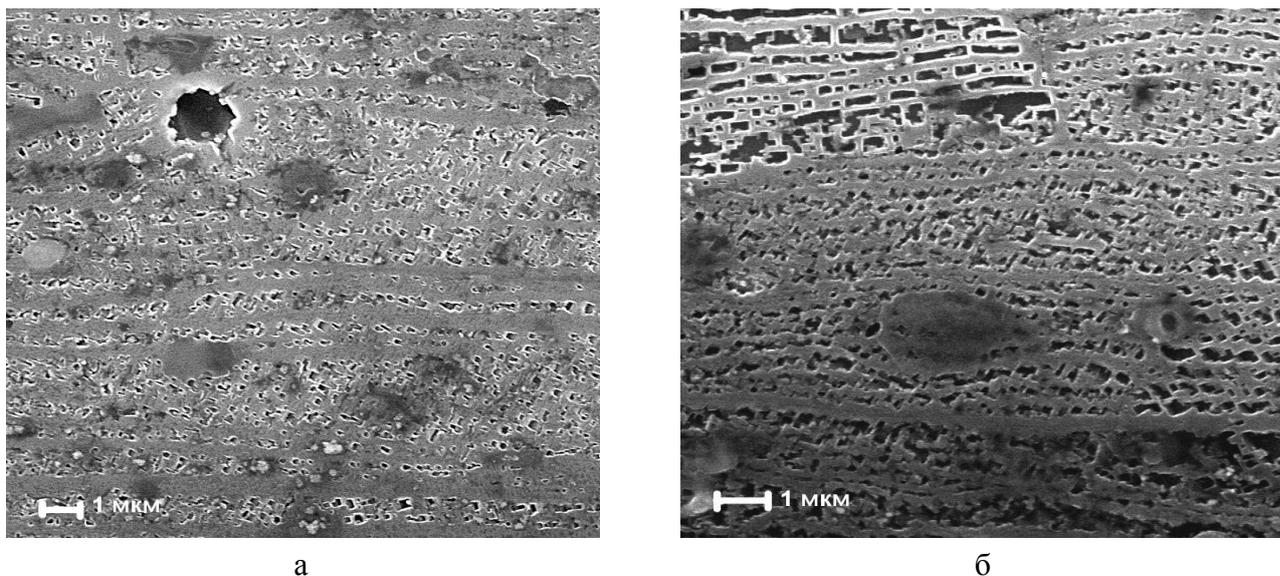


Рисунок 26.10 – Выходы дислокаций на поверхность сплава АМг6 до (а) и после (б) обработки

Значительный разброс значений микротвердости, которая на поверхности материала на 10-15 % выше микротвердости исходного сплава, не позволяет провести однозначную корреляцию между микротвердостью, плотностью мощности и глубиной зоны лазерной обработки.

Таким образом, видимые изменения структуры и значений микротвердости не дают возможности достоверно оценивать эффективность обработки и увязывать ее с параметрами лазерного воздействия. Для получения более полной информации о структуре обработанного сплава был использован метод анализа профиля рентгеновской дифракционной линии. Чтобы определить структурные характеристики, профили дифракционных линий аппроксимировали асимметричными функциями псевдо-Фойгта, затем проводили процедуру деконволюции по итерационному алгоритму Ричардсона-Люци с целью выделения физического профиля. Процедуры аппроксимации и деконволюции, как и расчеты структурных характеристик, осуществляли с помощью специально созданных программ. Результаты расчетов представлены в таблице 26.1.

Таблица 26.1 – Зависимость структурных характеристик от режима лазерного воздействия

q, ГВт/см ²	D, нм	$\langle \varepsilon^2 \rangle$	ρ , см/см ³	α	β
---	194	0,00078	$4,8 \times 10^8$	0	0,0003
5,8	89	0,0015	$2,6 \times 10^9$	0,0066	0,0004
3,6	99	0,0016	$2,3 \times 10^9$	0,0043	0,0006
2,3	122	0,0015	$1,5 \times 10^9$	0,0056	0,0006
1,3	153	0,0014	$8,8 \times 10^8$	0,0023	0,0001

В таблице D – истинный размер ОКР, после выполнения поправок на дефекты упаковки; $\langle \varepsilon^2 \rangle$ – среднеквадратичные микродеформации; ρ – плотность дислокаций; α – вероятность образования дефектов упаковки; β – вероятность двойникования.

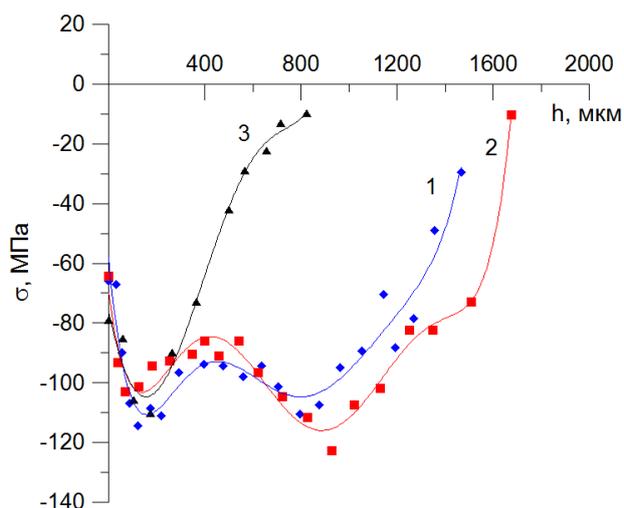


Рисунок 26.11 – Распределение измеренных остаточных напряжений в обработанных образцах АМгб: 1 – 1 ГВт/см², 2 – 2,2 ГВт/см², 3 – 4 ГВт/см²

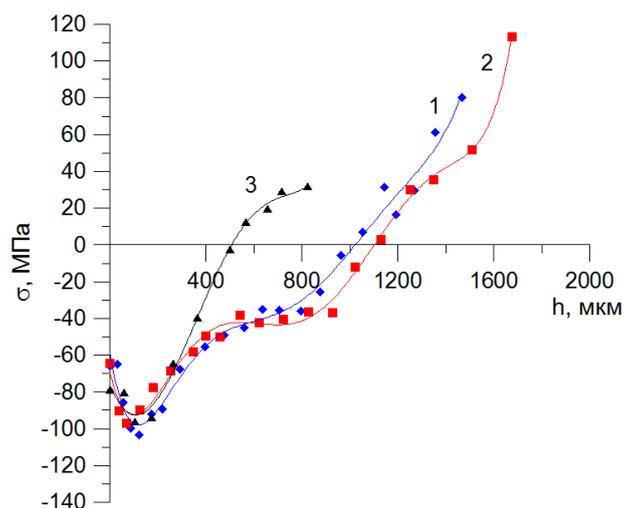


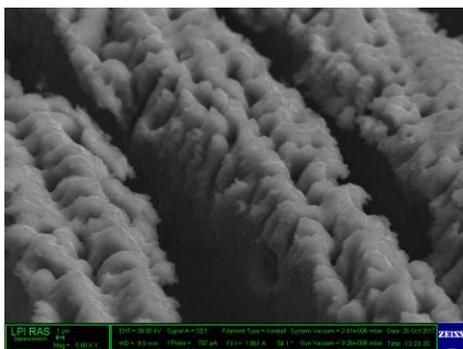
Рисунок 26.12 – Распределение истинных остаточных напряжений в обработанных образцах АМгб: 1 – 1 ГВт/см², 2 – 2,2 ГВт/см², 3 – 4 ГВт/см²

Основной задачей лазерной ударной обработки с точки зрения технологического применения является создание необходимого уровня остаточных сжимающих напряжений в материале на достаточную глубину. На рисунках 26.11 и 26.12 показаны усредненные значения измеренных и истинных (в материале с учетом разгрузки при снятии слоя) напряжений в АМгб при обработке излучением с различной плотностью мощности. Как видно из рисунка 26.11 глубина области измеренных отрицательных напряжений находилась в пределах 0,8-1,7 мм, при этом глубина истинных отрицательных напряжений находится в пределах 0,5-1,1 мм соответственно; максимальное значение остаточных напряжений достигает -110 МПа.

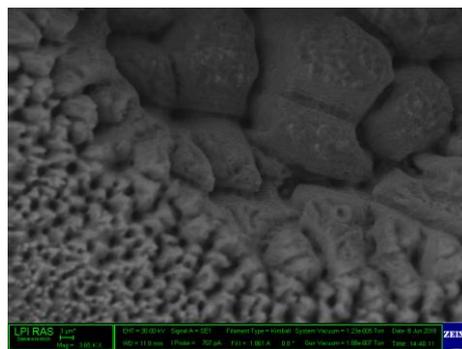
26.5 Лазерный синтез в жидкости металлических структур на мишенях, поперечные размеры которых меньше размеров пятна фокусировки лазерного излучения

Работа по созданию микроструктур на пространственно ограниченных подложках при многоимпульсном лазерном воздействии ранее осуществлялась в воздушной среде [1]. Производилось многоимпульсное облучение никелевых фольг и нихромовых проволок на воздухе с помощью лазера на парах меди (длина волны 510 нм, длительность импульса 20 нс, частота следования импульсов 7.5 кГц).

В представленной работе в результате стационарного воздействия 20000 лазерных импульсов на полированный торец плотной упаковки титановой 12 мкм фольги в среде 96 % этилового спирта были получены конусообразные структуры, изображенные на рисунке 26.13 а. На толщине одного слоя фольги формировались два явно выраженных ряда конусообразных структур. Диаметр основания конусов составлял величину 6 микрон, а высота конусов – порядка 5 микрометров. Использование жидкой среды, большей длины волны и меньшего пространственного размера образца позволило реализовать окисленные поверхностные структуры в 3 раза меньшие по диаметру у основания и в 6 раз меньшие по высоте в сравнении со структурами, полученными в работе [1].



– а –



– б –

Рисунок 26.13 – СЭМ-изображение (а) поверхности титановой фольги, облучённой в среде C_2H_5OH (96 %) + H_2O (4 %) 20000 лазерными импульсами при плотности энергии 0.25 Дж/см^2 ; (б) структур, полученных методом лазерной абляции в среде этилового спирта на поверхности нитиноловой проволоки. 20000 импульсов. Плотность энергии 0.75 Дж/см^2

В результате ЛВ в стационарном режиме 20000 лазерных импульсов на торец пучка нитиноловой проволоки диаметром 165 мкм в среде 96 % этилового спирта в интервале плотностей энергий от 0.25 Дж/см^2 до 0.75 Дж/см^2 на поверхности мишени наблюдалось формирование микро-/наноструктур (рис. 26.13 б). Облучение при плотности энергии 1.69 Дж/см^2 приводило к формированию кратера диаметром 150 мкм. В границах одного образца наблюдалось формирование структур различной размерности. Однако формирования единичных структур с пиком по центру, как в работе [1], ни в одной из серий экспериментов не наблюдалось. Поскольку использование жидкой среды приводило не к переносу материала мишени, а к его эффективному удалению.

26.5.1 Лазерная модификация никелевой плёнки микронной толщины

Для получения перфорированных микроструктурированных металлических плёнок была создана следующая экспериментальная методика:

1 этап. Электрохимическое нанесение никелевого слоя толщиной 6 мкм на полированную металлическую подложку. Состав электролита: $NiSO_4 + 7H_2O$ (140-200 г/л), $NiCl_2 + 6H_2O$ (30-40 г/л), H_3BO_3 (25-40 г/л), Na_2SO_4 (60-80 г/л); ток электролиза: $0,5 - 2 \text{ А/дм}^2$; интервал температур электролита: $20-55^\circ\text{C}$; время электролиза 30 минут.

2 этап. Перенос сформированной никелевой плёнки на предметное стекло с помощью ацетонорастворимого клеящего состава; перенос на стекло осуществляется для исключения спекания никелевой плёнки с металлической при последующей лазерной обработке.

3 этап. Лазерная обработка никелевой плёнки, находящейся на предметном стекле. Осуществлялась в динамическом режиме в среде C_2H_5OH (95 % и 55 %). Скорость перемещения образца относительно пятна фокусировки лазерного излучения – 30 мкм/с , шаг смещения по другой координате – 1.6 мкм , использовалось излучение Nd:YAG лазера: $\lambda=1064 \text{ нм}$, длительность импульса 250 пс, частота следования импульсов 20 Гц, энергия в импульсе 0.3 мДж , плотность энергии 0.4 Дж/см^2 . Толщина слоя жидкости над образцом – 5 мм .

4 этап. Отслоение структурированной никелевой плёнки от стеклянной подложки путём помещения образца в ванну с ацетоном.

На рисунке 26.14 представлено СЭМ – изображение типичного образца никелевой плёнки, полученной и структурированной согласно методике, описанной выше. Облучённая поверхность плёнки покрыта развитой системой гантелевидных структур, характерных для метода лазерной

абляции, диаметр которых составляет от 0.5 до 1 мкм, а высота – 5 мкм. Обзор обратной стороны плёнки выявил наличие перфораций плотностью 1 перфорация на 20 мкм². Диаметр отверстий составлял величину от 0.5 до 1 мкм ($\lambda/2$, λ).

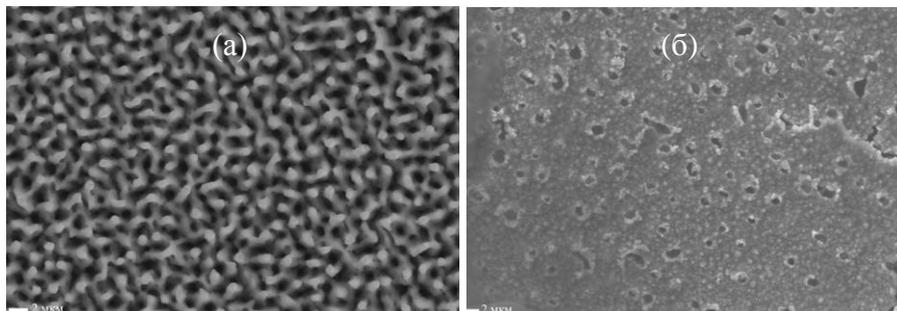


Рисунок 26.14 – СЭМ-изображение поверхности перфорированной никелевой плёнки (а) облучённая поверхность; (б) обратная сторона

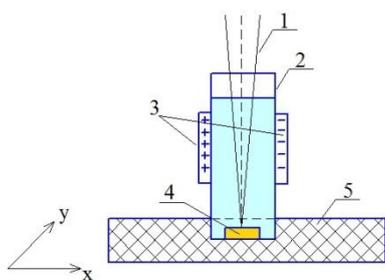
26.6 Лазерная абляция в жидкости с приложенным внешним электрическим полем

Известно, что под воздействием мощного лазерного излучения на поверхности металлических мишеней происходит формирование плазмы [2]. Если воздействие осуществляется импульсным излучением с длительностью импульса $\tau \leq 10^{-6}$ с в жидкой среде, то возникновение гидродинамических неустойчивостей в образовавшейся плазме приводит к формированию отрицательно заряженных металлических наночастиц в объеме жидкости [3]. Наличие заряда у формирующихся наночастиц позволяет управлять их свойствами посредством приложения внешних электрических или магнитных полей. Так, в работе [4] методом импульсной лазерной абляции в дистиллированной воде в присутствии внешних электрического и магнитного полей были получены серебряные наночастицы. При этом с приложением внешних полей наблюдалось изменение размеров частиц и смещения в спектрах оптического поглощения коллоидов наночастиц. Однако напряженности прикладываемых внешних полей были незначительными. Использование полей более высокой напряженности может привести к качественно новым результатам. Поэтому целью данной части работы было рассмотрение влияния внешнего электрического поля, создаваемого разностью потенциалов в диапазоне значений от 1000 до 7000 В, на процессы лазерной абляции металлов в средах дистиллированной воды и этилового спирта.

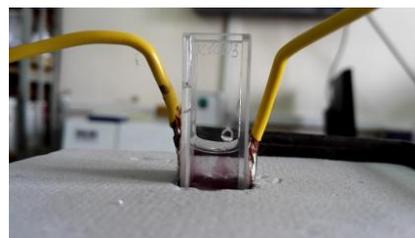
Для синтеза наночастиц был использован Nd:YAG лазер с длиной волны 1064 нм, длительностью импульса 250 пс, частотой следования импульсов 20 Гц, энергией в импульсе 0.3 Дж/см². Плотность энергии на поверхности мишени составляла 2 Дж/см². В качестве жидких сред, в которых происходила наработка наночастиц, использовались дистиллированная вода и 96% этиловый спирт. Образцом служила золотая (99.99 %) пластинка толщиной 0.5 мм.

Для рассмотрения влияния внешнего электрического поля, на процессы лазерной абляции металлов в средах дистиллированной воды и этилового спирта, медные обкладки площадью 1 см² крепились на вертикальных стенках кварцевой кюветы на расстоянии 1 см друг от друга (рис. 26.15 а).

В процессе облучения золотой мишени с приложенным внешним полем впервые обнаружено формирование вертикального окрашенного "канала" в жидкости (рисунок 26.15 б). Причем канал формируется, только в объеме жидкости, через которую проходит фокусируемое лазерное излучение.



(a)

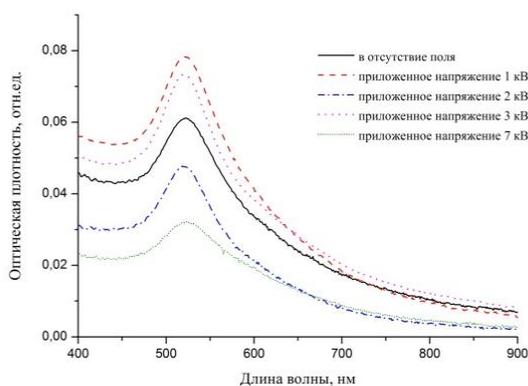


(б)

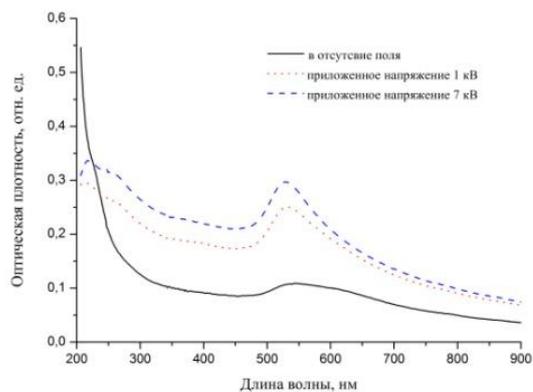
Рисунок 26.15 – Схема эксперимента (а): 1 – лазерное излучение, 2 – кварцевая кювета, 3 – медные обкладки, 4 – мишень, 5 – подставка под кювету; вертикальный окрашенный "канал" (б) в жидкости, сформированный в процессе облучения золотой мишени с приложенным внешним полем

В результате воздействия лазерного излучения на золотую мишень в дистиллированной воде без приложения внешнего электрического поля и в его присутствии были получены коллоиды золотых наночастиц в воде, имеющие фиолетовый окрас различной интенсивности в зависимости от условий синтеза. Оптические спектры поглощения коллоидов золота в воде представлены на рисунке 26.16 а. Наблюдается характерная для золотых наночастиц полоса поглощения с максимумом, приходящимся на 530 нм.

Наночастицы, синтезированные в среде этилового спирта, также имеют характерную для золота полосу поглощения, однако с приложением внешнего электрического поля происходит уменьшение её ширины (рисунок 26.16 б). Данный эффект возникает в результате фрагментации наночастиц, повторно попавших в перетяжку лазерного пучка. С приложением внешнего электрического поля к заряженным металлическим наночастицам вероятность их повторного облучения повышается, что визуально регистрируется формированием вертикального фиолетового "канала".



(a)



(б)

Рисунок 26.16 – Спектры поглощения золотых наночастиц, синтезированных методом лазерной абляции с приложением внешнего электрического поля (а) в воде; (б) в этиловом спирте

26.7 Трибомеханические свойства инструментальных сталей после лазерной модификации

Упрочняющую ЛО на воздухе можно рассматривать как один из способов, который в состоянии обеспечить состояние поверхности, способствующее снижению интенсивности изнашивания контактирующих поверхностей. Наличие упрочненного слоя и окисной пленки в области

контакта деталей снижает адгезионные связи контактирующих поверхностей, предотвращая их схватывание, уменьшает износ, увеличивает долговечность деталей машин.

В настоящей работе была проведена экспериментальная оценка адгезионной составляющей коэффициента трения при контакте инструментальной и конструкционной сталей после упрочняющей ЛО поверхности контакта при высоких значениях нормальных контактных напряжений.

Для оценки фрикционных характеристик подвижного контакта в работе использовалась

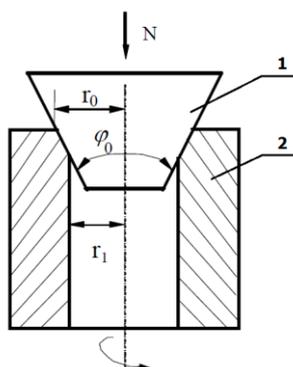


Рисунок 26.17 – Схема определения тангенциальной прочности адгезионных связей при трении

физическая модель, в первом приближении отражающая реальные условия трения и изнашивания в зоне резания. Согласно этой модели образец-индентор (сделанный из инструментальной стали) в виде усеченного конуса вставляется в цилиндрический образец, после чего на конус подается нормальная нагрузка (N), и цилиндр вращают вокруг собственной оси, при этом конусообразный образец остается неподвижным (рис. 26.17). Силы, расходуемые на вращение индентора, связаны главным образом с прочностью на срез адгезионных связей, поскольку при этом деформационная составляющая касательных сил пренебрежимо мала.

На основании этой физической модели был разработан диагностический комплекс для исследования адгезионного взаимодействия контактной пары втулка-конус, аналогичный описанному в [5]. Принцип работы и конструкция диагностического комплекса для исследования адгезионного взаимодействия, основанного на описанной выше модели, подробно описаны в [6].

Схема определения тангенциальной прочности адгезионных связей при трении представлена на рисунке 26.17. В данной схеме φ_0 – угол раствора конуса 1, r_1 , r_0 – радиусы внутреннего отверстия цилиндрического образца 2 до и после нагружения соответственно. Сила, расходуемая на вращение цилиндрического образца (F_{exp}), связана, главным образом, с прочностью на срез адгезионных связей, поскольку при этом деформационная составляющая касательных сил пренебрежимо мала. Адгезионная составляющая коэффициента трения (f_M) определяется как отношение среднего напряжения на срез (τ_n) к величине нормальных контактных напряжений (p_n) по формуле:

$$f_M = \frac{3}{2\pi} \cdot \frac{F_{exp} \cdot R \cdot \sin(\varphi_0/2)}{(r_0^3 - r_1^3)} \cdot \frac{\pi \cdot (r_0^2 - r_1^2)}{N \cdot \sin^2(\varphi_0/2)} = \frac{3}{2} \cdot \frac{R \cdot (r_0^2 - r_1^2)}{(r_0^3 - r_1^3) \cdot \sin(\varphi_0/2)} \cdot \frac{F_{exp}}{N},$$

где F_{exp} – сила сдвига, регистрируемая в процессе эксперимента; R – радиус держателя цилиндрического образца 2 (рис. 26.17), $R = 30$ мм. Здесь $r_1 = 6$ мм, $\varphi_0 = 45^\circ$, а величина r_0 и значения сил F_{exp} и N определяются из эксперимента.

В экспериментах в условиях сухого трения моделировалось контактное взаимодействие между цилиндрическим образцом из конструкционной стали (ст. 20), и конусом, изготовленным из инструментальных сталей P18, 9ХС, X12М и У7 при наличии и в отсутствии предварительной ЛО образующей поверхности конуса. ЛО проводилась в импульсном режиме на воздухе с плотностью энергии 2,2-2,4 Дж/мм², обеспечивающей образование устойчивой окисной пленки на поверхности ЗЛВ. При таком режиме обработки глубина ЗЛВ для быстрорежущих сталей составляла 65-70 мкм, а микротвердость возрастала до 9 ГПа, против 6,5-7,0 ГПа у материала основы [7]. Сформированная на поверхности ЗЛВ многослойная окисная пленка в основном состоит из Fe₃O₄, и ее толщина не

превышает 0,2 мкм [8].

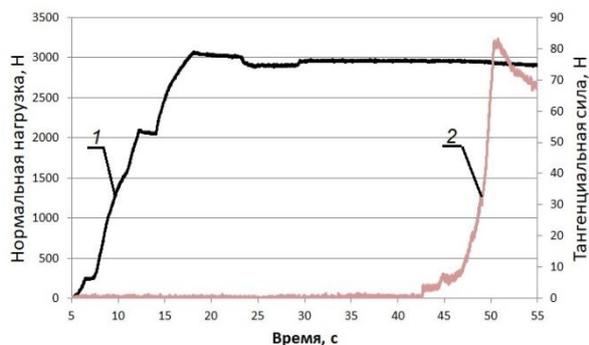
Нагрузка N в экспериментах подбиралась таким образом, чтобы в зоне касания обеспечивалось среднее напряжение на контакте соизмеримое с напряжениями при резании металлов. С учетом геометрии использованных модельных образцов фактическое значение нормальной нагрузки составило около 3000 Н и потенциально может быть увеличено до 5000 Н. Расчетное значение нормальных напряжений на контакте находилось в диапазоне 120-180 МПа (таблица 26.2). В эксперименте также измерялась ширина контактной площадки Δl на поверхности отверстия цилиндра после нагружения.

Результаты экспериментов представлены в таблице 26.2, здесь же приведены данные о величине нормальных контактных напряжений p_n , рассчитанные по формуле (2) и средние значения ширины Δl контактных площадок на поверхности цилиндра после нагружения по результатам 10 измерений в произвольно выбранных направлениях. На рисунке 26.18 изображены типичные зависимости нормальной нагрузки N и силы страгивания F_{exp} в течение времени проведения эксперимента на примере контакта ст.20-9ХС после ЛО (рис. 26.18 а) и без ЛО поверхности конуса (рис. 26.18 б).

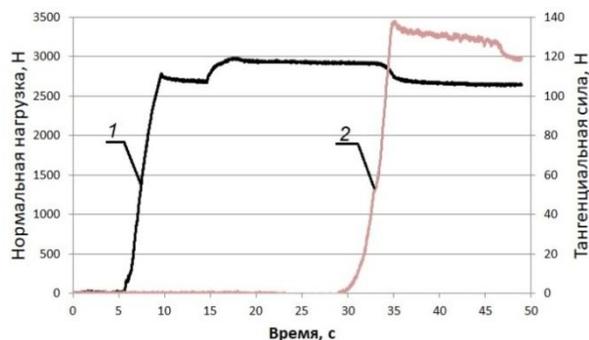
Анализ результатов экспериментов показывает, что упрочняющая ЛО независимо от материалов контактной пары приводит к уменьшению коэффициента трения, а точнее его адгезионной составляющей, на 20-50 %.

Таблица 26.2 – Результаты экспериментальных исследований

Контактная пара	N , Н	F_{exp} , Н	p_n , МПа	Δl , мкм	f_m
Ст.20-9ХС без ЛО	2934.07±10.66	138.22	122.73	226.5±28.3	0.658
Ст.20-9ХС с ЛО	2959.13±6.69	82.69	136.02	218.2±32.4	0.365
Ст.20-Х12М без ЛО	2901.09±7.89	113.42	131.78	215.5±17.4	0.519
Ст.20-Х12М с ЛО	2913.29±8.87	57.66	119.69	244.6±46,5	0.259
Ст.20-У7 без ЛО	2947.65±10.16	90.40	181.81	217.3±17.8	0.823
Ст.20-У7 с ЛО	2951.25±6.90	97.22	125.64	236.2±36.7	0.436
Ст.20-Р18 без ЛО	2886.0±92.0	132.90	135.56	215.0±21.0	0.596
Ст.20-Р18 с ЛО	3125.0±72.0	115.31	135.68	232.5±20.6	0.478



– а –



– б –

Рисунок 26.18 – Изменение нормальной нагрузки N (кривая 1) и тангенциальной силы страгивания F_{exp} (кривая 2) во время проведения эксперимента

26.8 Выводы

1. Экспериментально определены оптимальные режимы СЛС/П для создания 3D изделий и получены эти изделия в виде прямоугольных параллелепипедов из систем ПК + TiO₂ (поликарбонат - диоксид титана) в составах 10:1 и 5:1 (объем. доли).
2. Установлено, что на некоторых режимах СЛС наблюдается расслоение спеченных образцов системы поликарбонат – диоксид титана. Оптическая микроскопия свидетельствует о гетерогенном распределении диоксида титана по полимерной матрице. РСА показывает наличие исходной фазы (TiO₂) без существенных изменений, что полезно для приложений в фотонике.
3. Установлено, что дополнительный термический нагрев в течение 30 мин 3D образцов в печи при температурах: 150, 200, 250, 300, 350 и 400 градусов не позволяет выявить оптимальные условия удаления полимерного связующего и фиксации каркаса из диоксида титана. Поликарбонат практически полностью деструктурирует при 400°C, однако сохранить каркас из TiO₂ не удается.
4. Оптическая и растровая электронная микроскопия не выявили заметных изменений микроструктуры сплава АМг6 после лазерной ударной обработки, кроме поверхностного слоя глубиной до 40 мкм, в котором наблюдается существенное увеличение плотности дислокаций. Микротвердость поверхностного слоя H_ц обработанных образцов на 10-15% выше микротвердости необработанного сплава и снижается до значения микротвердости исходного материала на глубине 0,5-1 мм в зависимости от режимов обработки. Значительный разброс значений микротвердости и отсутствие видимых изменений структуры не позволяют достоверно оценивать эффективность обработки и увязывать ее с параметрами лазерного воздействия.
5. Средняя плотность дислокаций после ЛО увеличивается, как минимум, на порядок. Вероятность образования двойников практически равна нулю; основными дефектами упаковки являются дефекты вычитания.
6. Глубина ЗЛВ при обработке сплава АМг6 без покрытия достигает 1,7 мм, при этом глубина истинных отрицательных напряжений – не менее 1,1 мм. В отличие от обработки с покрытием не наблюдается корреляции между плотностью мощности и максимальным значением остаточных напряжений. Более чем в два раза снижается плотность мощности, необходимая для достижения высокого (не менее 100 МПа) уровня сжимающих остаточных напряжений.
7. В ходе исследований выявлена возможность формирования функциональных оксидных пленок и упрочненного поверхностного слоя методом лазерной паротермической обработки металлов и их сплавов, что открывает возможность разработки новых методов лазерного упрочнения.
8. Методом импульсной лазерной абляции в среде 96 % этилового спирта на торцах титановой фольги синтезированы два ряда микронных конусов, диаметр основания которых составлял величину 6 микрон, а высота – порядка 5 микрометров.
9. На титаноловой проволоке диаметром 165 микрон методом импульсной лазерной абляции в среде 96 % этанола были получены массивы микро-/наноструктур.
10. Разработана оригинальная методика получения тонких перфорированных металлических плёнок (толщиной 6 мкм) путём сочетания методик электрохимического осаждения и лазерной абляции в жидкости. Плотность перфораций составила величину 1 перфорация на 20 мкм², а диаметр отверстий – от 0.5 до 1 мкм ($\lambda/2$, λ).
11. Впервые зафиксировано формирование плотного столба наночастиц по направлению распространения лазерного излучения в случае лазерного синтеза Au наночастиц в этиловом спирте в присутствии внешнего электрического поля.
12. В результате лазерной абляции золота в условиях внешнего электрического поля наблюдалось изменение оптических характеристик коллоида в случае генерации наночастиц в среде этилового

спирта. При синтезе наночастиц в дистиллированной воде приложение внешнего электрического поля не внесло изменений в спектры поглощения.

13. Установлено, что импульсная упрочняющая ЛО инструментальных сталей оказывает существенное влияние на адгезионную составляющую коэффициента трения при подвижном контакте с конструкционной сталью. На примере фрикционного контакта в системе втулка-конус показано, что лазерное упрочнение приводит к снижению коэффициента трения на ~ 20-50 % при величине контактных нормальных напряжений ~ 120-180 МПа.

Список использованных источников

1. Долгаев, С.И. Микроструктуры на пространственно ограниченных подложках при многоимпульсном лазерном воздействии / С.И. Долгаев, Н.А. Кириченко, А.В. Симакин, Г.А. Шафеев // Квантовая электроника. – 2007. - Том 37, №7. – С. 645 – 650.
2. Zijie, Y. Pulsed laser ablation in liquid for micro-/nanostructure generation / Y. Zijie, B. Chrisey // Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews 13, 2012 – 204– 223 p.
3. Sylvestre, J.-P. Surface Chemistry of Gold Nanoparticles Produced by Laser Ablation in Aqueous Media / J.-P. Sylvestre, S. Poulin, A. V. Kabashin, E. Sacher, M. Meunier, and J. H. T. Luong // J. Phys. Chem. B, 2004, 108. – 16864-16869 p.
4. Abbas, K. The Effect of Electric and Magnetic Field on Silver Nanoparticles Prepared by Pulse Laser Ablation / K. Abbas, M. Ibrahim, K. Naser // International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 7, Issue 6, 2016. – Pp. 976-980.
5. Шустер Л.Ш. Адгезионное взаимодействие режущего инструмента с обрабатываемым материалом. – М.: Машиностроение, 1988. – 96с.
6. Ярьско С.И., Мордовин Г.А., Ибатуллин И.Д. Диагностический комплекс для измерения адгезионной составляющей коэффициента трения // Изв. СамНЦ РАН. – 2012. – Т.14, №4. – С.59-63.
7. Козаков А.Т., Ярьско С.И., Сидашов А.В. Модификация и анализ поверхности сталей и сплавов. – Ростов н/Д: Изд-во ФГБОУ ВПО РГУПС, 2015. – 378с.
8. Kozakov A.T., Yaresko S.I., Kolesnikov V.I., Sidashev A.V. Surface compositions of 9XC and R6M5 tool steels after laser pulse irradiation according to X-ray photoelectron spectroscopy data // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2011. – V.5, №3. – P.431–439. <https://doi.org/10.1134/S1027451011050089>

Образовательная значимость проекта

В работе по теме принимали участие студенты 3 и 6 курсов физического и химического факультетов Самарского университета и аспирант первого года обучения кафедры оптики и спектроскопии ФГАОУ «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» и аспирант 2-го года обучения Самарского государственного технического университета. По теме работы защищена магистерская выпускная работа.

Список публикаций по проекту

1. Shishkovsky I., Kakovkina N., Scherbakov V. Fabrication of heat-resisting nickel composite gradient structures with TiC nano additive during powder bed fusion process. // 10th CIRP Conference on Photonic Technologies [LANE 2018], 3-6 Sep. Furth, Germany. // Procedia CIRP, 2018, 74: 68-71. Doi: 10.1016/j.procir.2018.08.032
2. Shishkovsky I., Scherbakov V., Ibatullin I., Volchkov V., Volova L. Nano- size ceramic reinforced 3D biopolymer scaffolds: tribomechanical testing and stem cell activity // Composite Structures, 2018, 202: 651-659. doi: 10.1016/j.compstruct.2018.03.062

3. Nazarov A., Skoryakov I., Shishkovsky I. The Setup Design for Selective Laser Sintering of High-Temperature Polymer Materials with the Alignment Control System of Layer Deposition // *Machines*, 2018, 6(1), 11.
4. Shishkovsky I., Scherbakov V. 4D manufacturing of intermetallic SMA fabricated by SLM process. (oral) // SPIE Photonics West, LASE 2018, San Francisco, California, USA, 27 January - 1 February 2018, p. 233. // SPIE LASE Photonics West Proceedings, Vol. 10523, Laser 3D Manufacturing V; 1052311 (2018); doi: 10.1117/12.2288176
5. Shishkovsky I., Kakovkina N., Scherbakov V. Rapid TMC laser prototyping: Compositional and phase-structural sustainability via combinatorial design of titanium based gradient alloy reinforced by nano sized TiC or TiB₂ ceramics. (oral) // *Ibidem*, LASE 2018, p. 233 // *Ibidem*. 1052315 (2018); doi: 10.1117/12.2288260
6. Shishkovsky I., Scherbakov V., Volchkov S., Volova L. Laser assisted nanoceramics reinforced polymer scaffolds for tissue engineering: additional heating and stem cells behavior. (poster) // *Ibidem*, BIOS 2018, p. 127. // SPIE BiOS Photonics West Proceedings, Vol. 10493, Dynamics and Fluctuations in Biomedical Photonics XV; 104931T (2018); doi: 10.1117/12.2290583
7. Morozov I.G., Sathasivam S., Belousova O.V., Shishkovsky I.V., Kuznetsov M.V. Room-temperature ferromagnetism in mixed-phase titania nanoparticles produced by the levitation-jet generator // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2018; 29 (4), 3304-3316. doi: 10.1007/s10854-017-8266-7
8. Shishkovsky I., Volchkov S., Scherbakov V., Volova L. Biocompatible features of magnetic nano-oxide core/ PCL shell 3D composites fabricated via SLS/M process // *Advanced Materials Letters*, 2018; 9(1); 31-35. doi: 10.5185/amlett.2018.1676
9. Shishkovsky I., Scherbakov V. Selective laser fusion of titanium based gradient alloy reinforced by nano sized TiC ceramic // *Materials Science Forum*, Vol. 916, p 85-90 (2018). doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.916.85
10. Shishkovsky I., Missemer F., Smurov I. Metal matrix composites with ternary intermetallic inclusions fabricated by laser direct energy deposition // *Composite Structures*, 2018, 183: 663-670. doi: 10.1016/j.compstruct.2017.09.004
11. Бакулин И.А., Кузнецов С.И., Панин А.С., Тарасова Е.Ю. Способ лазерного паротермического оксидирования металлических поверхностей и устройство для его осуществления. RU 2652327, Бюллетень №12 от 25.04.2018.
12. Журавлева И.И., Кузнецов С.И., Тарасова Е.Ю., Кравченко Т.П., Пиминова К.С. Влияние наполнителя и режима обработки на процесс лазерного спекания керамополимерных композитов на основе поливинилиденфторида-2М // *Пластические массы*, № 3-4, с. 30-34, 2018.
13. Песков А.В., Тарасова Е.Ю. Измерение показателей тонкой кристаллической структуры минералов // *Вестник Самарского государственного технического университета Сер. Технические науки*, №1 (57), с.142-148, 2018.
14. Тарасова Е.Ю., Кузнецов С.И., Панин А.С., Бакулин И.А. Особенности структурно-фазовых превращений при лазерной обработке гидроксидов алюминия // *Краткие сообщения по физике*, №1, с. 3-9, 2018. Перевод: E. Yu. Tarasova, S. I. Kuznetsov, A. S. Panin, I. A. Bakulin Features of Structural Phase Transitions of Aluminum Hydroxides under Laser Processing // *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, V. 45, N.1, P. 10-13, 2018. DOI 10.3103/S1068335618010037.
15. Ибрагимова А.И., Журавлева И.И., Тарасова Е.Ю., Аристов В.М., Николаева Н.Ю. Влияние способов обработки на качество спекания поливинилиденфторида-2М // *Успехи в химии и химической технологии. Сборник научных трудов. М: РХТУ им. Д.И.Менделеева.*, Т. XXXII, № 6 (202), с.47-49, 2018.
16. Бакулин И.А., Кузнецов С.И., Панин А.С., Тарасова Е.Ю., Журавлева И.И. Способ изготовле-

ния композиционной керамополимерной плёнки и композиционная керамополимерная плёнка Патент РФ RU 2 670 224.

17. Казакевич В.С., Казакевич П.В., Камынина Д.А., Яреско П.С. Лазерная абляция титана в криогенных жидкостях и в жидкостях, находящихся при комнатной температуре // Краткие сообщения по физике - 2018. – №3. – С.15-20. Перевод: Kazakevich V.S., Kazakevich P.V., Yaresko P.S.; Kamynina D.A. Laser Ablation of Titanium in Cryogenic and Room-Temperature Liquids // Bulletin of the Lebedev Physics Institute Volume: 45 Issue: 3 Pages: 75-78.

18. Kamynina D.A, Kazakevich V.S, Kazakevich P.V, Yaresko P.S. Laser structuring of submillimeter metal targets in an ethanol-aqueous solution of various concentrations // MPLP 2018 Technical Digest. – 2018 P. 135-136.

19. Казакевич В.С., Казакевич П.В., Яреско П.С., Камынина Д.А. Синтез металлических наночастиц методом лазерной абляции в тяжёлой воде // Сборник трудов ИТНТ-2018. – 2018. С. 312-316.

20. Kazakevich V.S., Kazakevich D.A., Kazakevich P.V., Yaresko P.S. Laser ablation of gold and titanium targets in heavy water // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series, 2018, Vol. 1096, P. 012123

21. Vavilin S.A., Yaresko S.I. Tribomechanical properties of the surface of instrumental steel after laser modification // 6th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE 2018) (Eds. N. Ratakhin, N. Koval, A. Yakovlev, A. Markov): Abstracts, Sept. 16-20, 2018, Tomsk, Russia. – Tomsk: Publishing House of IAO SB RAS, 2018. – 675 pp. (P. 336.)

22. Vavilin S, Yaresko S. Tribomechanical properties of the tool steels surface after laser modification / IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1115 (2018) 032062, doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1115/3/032062>

23. Вавилин, С.А. Влияние лазерной обработки на поведение трибоконтакта в системе втулка-конус / Вавилин С.А., Яреско С.И. // Трибология - машиностроению: тр. XII Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 80-летию ИМАШ РАН, М., 19-21 ноября 2018. – М. – Ижевск: ин-т компьютерных исследований, 2018. – С.105-108.

27 Результаты Лаборатории химических и электроразрядных лазеров СФ ФИАН

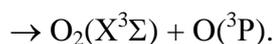
В данном разделе представлены результаты изучения кинетики восстановления озона в присутствии молекул СО и N₂O; результаты измерений столкновительно-индуцированного излучения O₂(a¹Δ); результаты измерений спектральных характеристик линий метастабильных атомов инертных газов и их концентраций в плазме барьерного разряда; результаты моделирования плазмы тлеющего разряда.

27.1 Анализ скорости восстановления озона в присутствии оксидов углерода и азота

В процессе рекомбинации O + O₂ + M образуется молекула колебательно-возбужденного озона O₃(v), которая стабилизируется в энергообменных процессах, либо вступает в химическую реакцию. Соотношение между реакционным и релаксационным каналами продуктов зависит от столкновительного партнера. Процессы с участием O₃(v) влияют на инициацию горения топливно-воздушных смесей и баланс озона в атмосфере. Ранее они не были включены в соответствующие кинетические базы данных.

Атомы кислорода O(³P) и молекулы O₂(a) нарабатывались фотолизом озона лазерными импульсами на длине волны 266 нм в процессе:





Наработка озона из газообразного кислорода производилась с помощью озонатора.

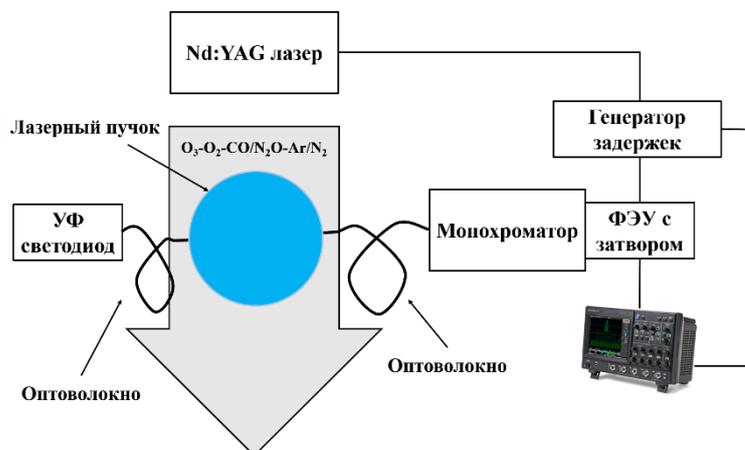


Рисунок 27.1 – Схема экспериментальной установки для изучения кинетики колебательно-возбужденного озона в присутствии окислов углерода и азота

Концентрация озона измерялась по поглощению света в УФ диапазоне (рис. 27.1). Излучение от светодиода UVTOP255 с длиной волны ~ 255 нм, доставлялось в зону фотолиза оптоволоконном. Излучение, попавшее на отводящее оптоволоконно, доставлялось на вход монохроматора и регистрировалось ФЭУ.

27.2 Восстановление озона в присутствии CO и N₂O

Реакция колебательно-возбужденного озона с CO при умеренных температурах может протекать по двум возможным каналам:



Кинетические данные по реакциям (27.1) и (27.2) в литературе отсутствуют.

Реакция $\text{O}_3(\nu)$ с NO



формирующимся в результате вторичных процессов, протекает с большей скоростью нежели аналогичная с невозбужденным озоном (константа скорости 1.8×10^{-14} см³/с). Реакция (27.3) конкурирует с релаксационным процессом



для которого также отсутствуют кинетические данные.

На рисунке 27.2 а показаны типичные временные зависимости концентрации озона после лазерного фотолиза смеси O₃-O₂-CO-Ar для общего давления газа 720 Торр, давления кислорода 180 Торр. На рисунке 27.2 б показаны аналогичные зависимости после лазерного фотолиза смеси O₃-O₂-N₂O-N₂ для общего давления газа 807 Торр, давления кислорода 600 Торр.

Добавление CO приводит к увеличению, а добавление N₂O к уменьшению степени восстановления озона (рис. 27.2). Следовательно, скорость протекания реакционного канала реакции ко-

лебательно-возбужденного озона с CO (27.1) существенно меньше релаксационного процесса (27.2). В ходе реакций N₂O с продуктами фотолиза нарабатывается NO, что не позволяет разделить процессы (27.3) и (27.4). Наилучшее согласие результатов моделирования для CO, с экспериментом было достигнуто для константы скорости процесса (27.2) $(1.5 \pm 0.2) \times 10^{-13} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$. В экспериментах с N₂O оказалось возможным определить лишь порядки величин констант скорости для (27.3) и (27.4), которые составили $\sim 10^{-11} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$ и $\sim 10^{-13} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$ соответственно.

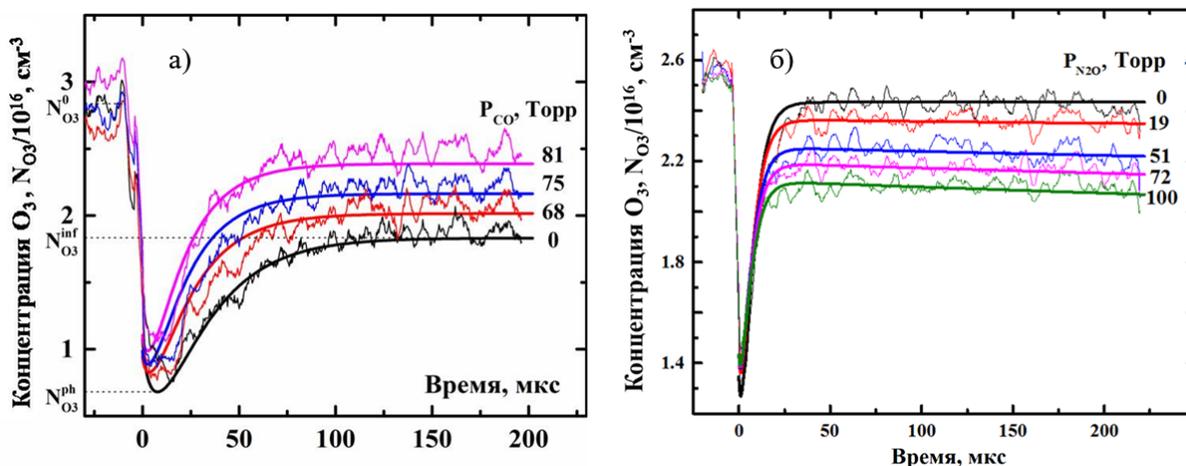


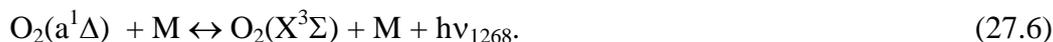
Рисунок 27.2 – Концентрации O₃: а) – при разных давлениях CO, б) – при разных давлениях N₂O. Гладкие кривые – расчёт. Плотность энергии лазерного импульса $E=70 \text{ мДж/см}^2$, $T=300 \text{ К}$, $P_{O_3}=0.85 \text{ Торр}$

27.3 Столкновительно-индуцированное излучение O₂(a¹Δ)

Излучение электронно-возбужденного молекулярного кислорода O₂(a¹Δ) вблизи 1268 нм обусловлено спонтанным



и столкновительно-индуцированным излучением:



Излучение O₂ в полосе a¹Δ_g-X³Σ_g часто используется для определения концентрации O₂(a¹Δ), поэтому необходимо знание констант скорости процесса (27.6) для различных M.

Методом время-разрешенной эмиссионной спектроскопии измерены константы скорости для столкновительно-индуцированного процесса (27.6) для 7-ми газов. На рисунке 27.3 представлены типичные временные профили интенсивности излучения O₂(a¹Δ_g) при разных давлениях CO₂. Добавление в смесь CO₂ приводит к увеличению интенсивности излучения O₂(a¹Δ_g) за счёт столкновительно-индуцированного процесса. Константы скорости процесса (27.6) для разных M: CO₂ – 10 ± 2 ; N₂ – 3.2 ± 0.6 ; SF₆ – 7 ± 1 ; He – 1.1 ± 0.3 ; Ne – 1.3 ± 0.3 ; Ar – 2.8 ± 0.6 ; Kr – 6 ± 1 в единицах $10^{-24} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$.

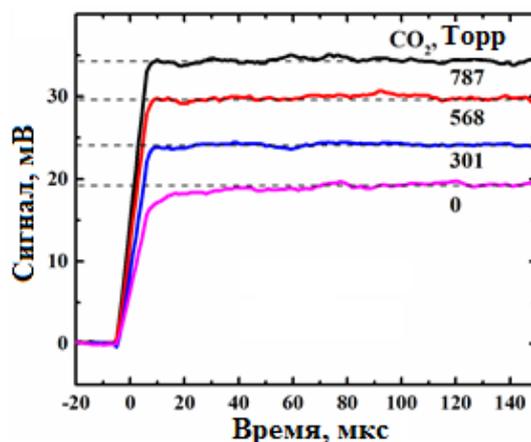


Рисунок 27.3 – Интенсивность излучения $O_2(a^1\Delta_g-X^3\Sigma_g)$ для четырех давлений CO_2 при $E=76$ мДж/см², $P_{tot}=0\dots790$ Торр, $P_{O_2}=3,3$ Торр, $P_{N_2}=103$ Торр, $T=300$ К, $[O_3]=4,4\times 10^{15}$ см⁻³

27.4 Эффективность лазера с оптической накачкой на метастабильных атомах Хе*

Для оценки полной эффективности ЛОНИГ η_{tot} в различных смесях инертных газов с гелием численно решалось уравнение Больцмана в двухчленном приближении. Оценки с учётом требований к разряду для наработки Хе* показали (рис. 27.4), что η_{tot} превышает 60%.

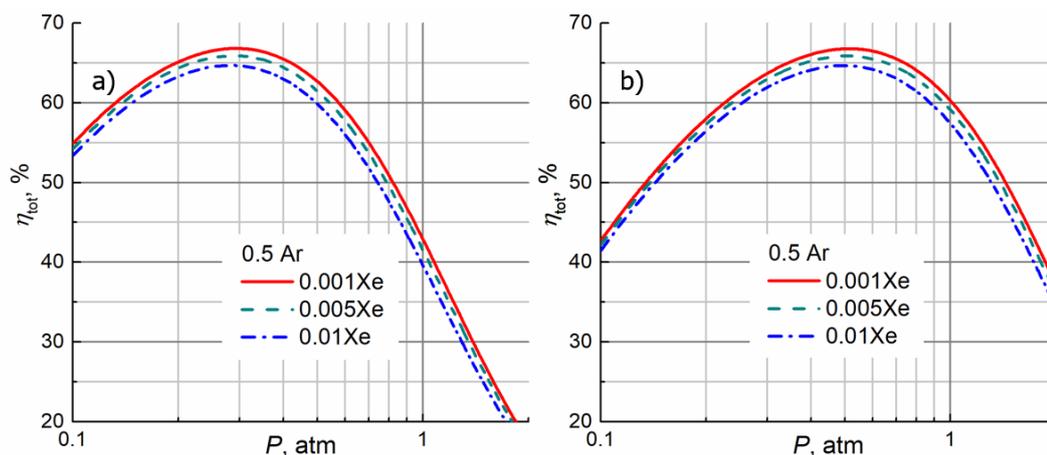


Рисунок 27.4 – Полная эффективность лазера на Хе* для смесей Хе:0.5Ar:0.5Не от давления. Накачка уровней p_9 – а) и p_8 – б)

27.5 Спектроскопия метастабильных атомов криптона в низкотемпературной плазме

Для реализации ЛОНИГ необходимо знание коэффициентов столкновительного уширения и сдвига линий инертных газов для разных газовых смесей.

Измерения проводились методом диодно-лазерной спектроскопии поглощения. В ВЧ разряде нарабатывались метастабильные атомы Kr^* в диапазоне давлений, где столкновительное и доплеровское уширения сравнимы для учёта температуры за счет гауссовой компоненты профиля Фойгта. В качестве репера оптической частоты использовалась отпаянная ячейка низкого давления с криптоном, в которой зажигался ВЧ разряд. Измеренные значения коэффициентов столкновительного сдвига, нормированные на 300 К, приведены в таблице 27.1.

Диффузный барьерный разряд атмосферного давления формировался в смесях инертных газов между электродами из анодированного алюминиевого сплава, размером 20×6 мм. Межэлектродное расстояние – 2 мм. Использовалось напряжение в форме меандра с частотой 20 кГц. На-

пряжение разряда ~400 В, ток – до 70 мА, мощность, вкладываемая в разряд ~10 Вт. Концентрации метастабильных атомов, определялись по площади под кривыми поглощения линии 811.3 нм.

Таблица 27.1 – Значения коэффициентов столкновительного сдвига (β) для криптона в единицах $10^{-10} \text{ c}^{-1} \text{ cm}^3$

	Столкновительные партнёры			
	He	Ne	Ar	Kr
Kr, 811.3 нм	0.51 ± 0.04	-0.65 ± 0.01	-2.07 ± 0.08	-1.4 ± 0.1

При прочих равных условиях (рис. 27.5) концентрации $[\text{Kr}^*]$ оказались на ~20% больше чем $[\text{Ar}^*]$.

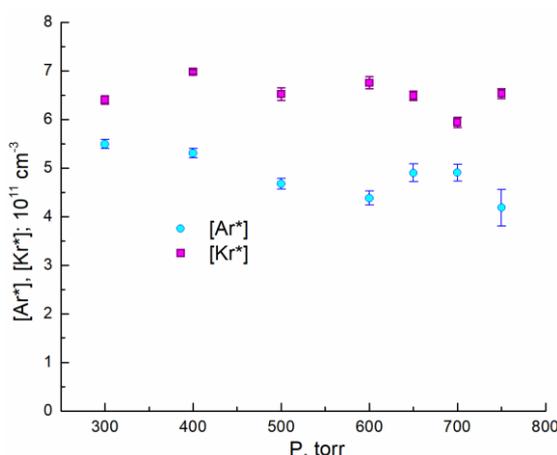


Рисунок 27.5 – Концентрации $\text{Ar}(1s_5)$, $\text{Kr}(1s_5)$ в плазме барьерного разряда в смесях с He при давлении до атмосферного, 3% Ar, Kr в He, мощность разряда ~6 Вт

27.6 Моделирование плазмы тлеющего разряда

В численных экспериментах установлена особенность уравнений модели плазмы положительного столба тлеющего разряда в электроотрицательном газе. Она возникает при больших значениях приведенных частот прилипания и отлипания электронов. Предложен общий способ получения формулы, связывающей два собственных числа задачи. Предложена формула для приближения "медленных ионов". Оно является достаточным, что показало сравнение результатов с расчетами по полной системе и с результатами экспериментов в плазме кислорода.

Разработана программа, обеспечивающая решение системы уравнений модели, описывающей характеристики плазмы положительного столба тлеющего разряда в кислороде. Учитывается один тип отрицательных ионов O^- . Программа обеспечивает решение для разряда с цилиндрической или плоской конфигурацией в 5-х различных приближениях – полная, без членов 2-го порядка малости, "медленных ионов", "холодных ионов", без отрицательных ионов.

27.7 Выводы

1. Впервые получена константа скорости процесса $\text{O}_3(\nu) + \text{CO} \rightarrow \text{O}_3 + \text{CO}$ и определены порядки величин констант скоростей для процессов $\text{O}_3(\nu) + \text{NO} \rightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2$ и $\text{O}_3(\nu) + \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_3 + \text{N}_2\text{O}$.
2. Впервые измерены константы скоростей столкновительно-индуцированного излучения моле-

кул $O_2(a^1\Delta)$ для He, Ne и SF_6 в качестве столкновительных партнёров.

3. Впервые показано, что полная эффективность лазера на метастабильных атомах Xe с учётом требований к электрическому разряду составляет более 60%.

Список публикаций по проекту

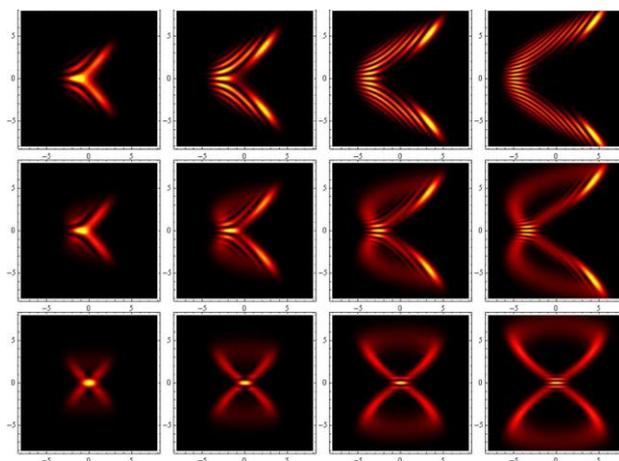
1. Torbin, A. P., Pershin, A. A., Mebel, A. M., & Azyazov, V. N. Vibrationally Excited Ozone Relaxation by CO // Bulletin of the Lebedev Physics Institute, **45**(3), pp. 67-70, 2018. DOI:10.3103/S1068335618030016
2. Torbin, A., Pershin, A., Zagidullin, M., Heaven, M., Mebel, A., & Azyazov, V. (2018). Ozone recovery in the presence of CO and N_2O // MATEC Web of Conferences (Vol. 209, p. 00016). EDP Sciences. DOI:10.1051/mateconf/201820900016
3. Demyanov, A. V., Kochetov, I. V., Mikheyev, P. A., Azyazov, V. N., & Heaven, M. C. (2018). Kinetic analysis of rare gas metastable production and optically pumped Xe lasers // Journal of Physics D: Applied Physics, **51**(4), 045201 2018. DOI: 10.1088/1361-6463/aa9e40
4. Pershin, A. A., Torbin, A. P., Zagidullin, M. V., Mebel, A. M., Mikheyev, P. A., & Azyazov, V. N. Rate constants for collision-induced emission of $O_2(a^1\Delta_g)$ with He, Ne, Ar, Kr, N_2 , CO_2 and SF_6 as collisional partners // Physical Chemistry Chemical Physics, **20**(47), pp. 29677-29683, 2018. DOI: 10.1039/C8CP06231E
5. Chernyshov, A. K., & Mikheyev, P. A. Thermometry in a Gas Discharge Cell of an Optical Wavelength Calibrator // Bulletin of the Lebedev Physics Institute, **45**(10), 295-298, 2018. DOI: 10.3103/S1068335618100020
6. Chernyshov, A. K., Mikheyev, P. A., & Lunev, N. N. Diode Laser with External Double Reflector for Gas Analysis // Bulletin of the Lebedev Physics Institute, **45**(3), 83-86, 2018. DOI: 10.3103/S1068335618030053
7. Шепеленко А.А. Приведенная напряженность электрического поля в плазме разряда в кислороде по различным экспериментам // Москва: ЕНО. 2018. Т. 1. № 5 (39). С. 22-24.

28 Результаты Лаборатории моделирования и автоматизации лазерных систем СФ ФИАН

В данном разделе описаны исследования по формированию спиральных пучков света, управлению их характеристиками, их преобразованию в линейных оптических системах, использованию в задачах высокоразрешающей наноскопии и контурного анализа.

28.1 Преобразование спиральных пучков в линейных оптических системах

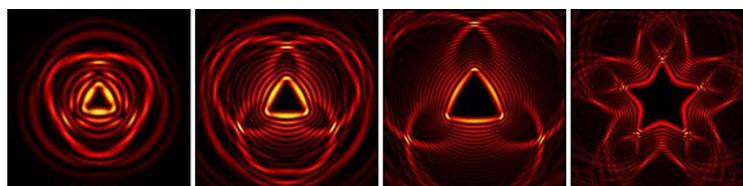
Теоретически исследовано преобразование спиральных пучков с целочисленным параметром вращения θ (т.е. световые поля, распределение интенсивности которых при распространении поля в свободном пространстве сохраняет свою форму с точностью до масштаба и вращения, а угол поворота от начальной плоскости до зоны Фурье равен $\theta \cdot 90^\circ$) в модовом конвертере. Получены аналитические выражения, описывающие астигматическое преобразование распределения интенсивности таких пучков. Разработан алгоритм и проведено численное моделирование для некоторых спиральных пучков. В частности, для смещённых псевдогауссовых пучков, используемых как базисные для построения более сложных полей, показано, что форма распределения интенсивности преобразованного пучка выглядит как проекция трехмерной кривой Вивиани (см. рис. 28.1).



Параметр поворота $\theta = -3$. Величина параметра смещения (слева направо) $c = \{1.0, 1.5, 2.0, 2.5\}$,
 аргумент параметра смещения (сверху вниз) $\{0, \pi/4, \pi/2\}$

Рисунок 28.1 – Распределение интенсивности пучков, полученных в результате астигматического преобразования смещённых псевдогауссовых пучков

Кроме того, на основе смещенных псевдогауссовых пучков с помощью теории аналитических функций, асимптотических разложений быстро осциллирующих интегралов и численных экспериментов разработан алгоритм построения спиральных пучков с целочисленными значениями параметра вращения, распределение интенсивности которых имеет форму априорно заданной плоской кривой. Примеры распределений интенсивности таких полей приведены на рисунке 28.2.



Параметр поворота $\theta = -3$

Рисунок 28.2 – Распределение интенсивности спиральных пучков, имеющих форму границы треугольника и пятиконечной звезды

В ходе исследований сформулированы принципы, соблюдение которых позволяет управлять однородностью распределения интенсивности вдоль порождающей кривой.

28.2 Формирование аксиально-симметричных световых полей с орбитальным угловым моментом с помощью ЖК модулятора модального типа

Продемонстрирована возможность использования ЖК модуляторов модального типа, и, в частности, разработанного в СФ ФИАН ЖК фокусатора, для формирования световых полей с орбитальным угловым моментом. В конструкцию модуляторов входит высокоомный слой, играющий роль управляющего электрода. Профиль фазовой задержки формируется за счет изменения распределения напряжения, приложенного к электродам и переориентации молекул ЖК слоя, заключенного между стеклянными подложками с нанесенными высокоомными и низкоомными покрытиями. Были предложены два варианта изменения конфигурации контактных электродов, обеспечивающих скачок в профиле фазовой задержки и соответственно возникновение углового орби-

тального момента в проходящем через ЖК модулятор или отраженном от него свете.

Предлагаемая конфигурация модального ЖК фокусатора с дополнительными узкими электродами может использоваться в качестве спиральной пластинки, что наглядно иллюстрируется примерами распределений интенсивности и фазы сформированных световых полей в дальней зоне дифракции, приведенными на рисунке 28.3. Поле рассчитывалось в фокальной плоскости линзы с фокусным расстоянием 1 м для устройства с апертурой 2×2 мм, ограниченной диафрагмой диаметром 1 мм.

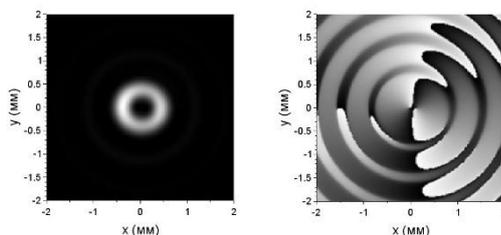
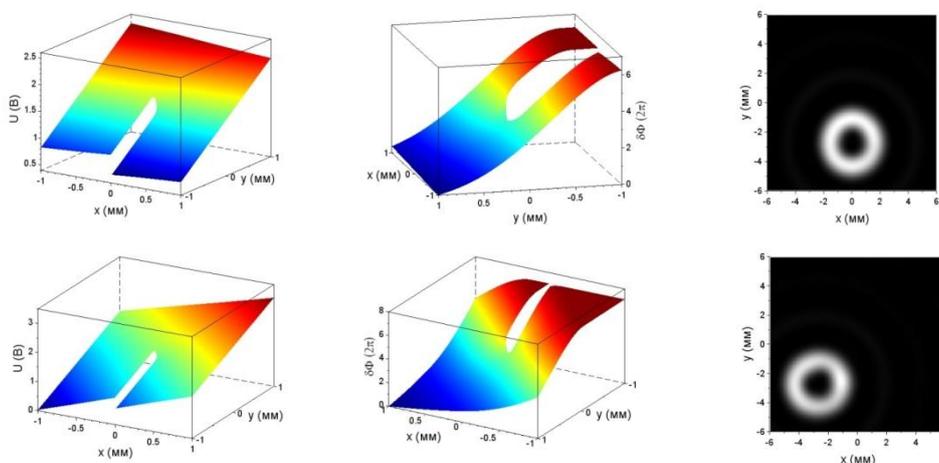


Рисунок 28.3 - Примеры распределений интенсивности световых полей, формируемых ЖК фокусатором с дополнительными узкими электродами

Величиной топологического заряда и соответственно диаметром сформированного кольца можно управлять за счет прикладываемых к контактам напряжений. Особый интерес представляет возможность перемещения сформированных колец по апертуре ЖК модулятора, что наглядно иллюстрируется рисунком 28.4.



Столбцы слева направо: распределение напряжения, распределение фазовой задержки, распределение интенсивности

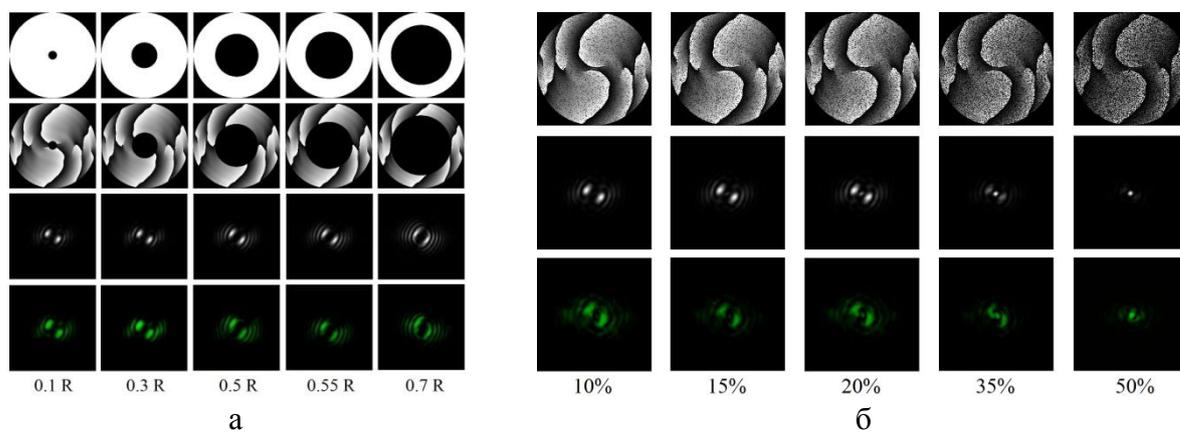
Рисунок 28.4 - Перемещение сформированного кольца по апертуре ЖК модулятора

Также были предложены другие конфигурации ЖК спиральных пластинок, в которых управляющий электрод в виде незамкнутого кольца (либо в виде квадрата с вырезанной узкой полосой) формируется за счет нанесения прозрачного высокоомного покрытия на одну из подложек. На линейные границы кольца наносятся контактные электроды. На другую подложку с одной стороны наносят низкоомное однородное проводящее покрытие, а на другую сторону - непрозрачное покрытие. Было показано, что, определенным образом выбирая напряжения на контактах, можно формировать профиль фазовой задержки в виде спиральной поверхности и, соответственно,

можно формировать аксиальные вихревые световые поля.

28.3 Влияние искажений на формирование двухлепестковых световых полей с вращением распределения интенсивности

Для 3D наноскопии представляют интерес фазовые маски, позволяющие преобразовать функцию размытия точки микроскопа в двухлепестковую, имеющую в распределении интенсивности два максимума, вращающиеся при дефокусировке. Ранее с использованием оптики спиральных пучков нами был найден ряд фазовых распределений, с помощью которых можно получить двухлепестковые световые поля с вращением распределения интенсивности при распространении. На данном этапе работы промоделировано и экспериментально проверено влияние амплитудных и фазовых искажений, характерных для оптической системы микроскопа, на генерацию двухлепестковых световых полей.



а – верхний ряд – распределения интенсивности освещающего пучка; второй ряд – фазовые распределения; третий и четвертый ряды – расчетные и экспериментальные распределения интенсивности сформированного поля в плоскости фокусировки, соответственно.
 б – расчетные (средний ряд) и экспериментально полученные (нижний ряд) распределения интенсивности при различной степени деградации фазового элемента (верхний ряд). Степень деградации указана в процентах от площади фазового элемента

Рисунок 28.5 - Влияние амплитудных (а) и фазовых (б) искажений на двухлепестковое вихревое поле

Амплитудные искажения представлены различными распределениями интенсивности поля, освещающего фазовый дифракционный оптический элемент. Были рассмотрены следующие случаи: несовпадение диаметров фазового элемента и освещающего Гауссова пучка, относительное смещение центров освещающего Гауссова пучка и элемента, хаотическая модуляция интенсивности освещающего поля, регулярная кольцеобразная модуляция интенсивности освещающего поля. На рисунке 28.5 а показаны результаты при освещении фазовой маски световым полем с распределением интенсивности в виде кольца с внешним радиусом равным радиусу фазового элемента (R) и переменным внутренним радиусом R_{cent} . Также исследовалось влияние хаотических фазовых искажений (рисунок 28.5 б) формирующего двухлепестковое поле элемента (часть пикселей элемента не работает), и случай неточного задания фазового распределения элемента.

Установлено, что полуширина освещающего фазовый элемент Гауссова пучка должна быть $\geq 0,8$ радиуса фазового элемента, допустимая величина смещения центра пучка относительно

маски составляет 20% от полуширины пучка. Регулярные и хаотичные неоднородности в распределении интенсивности освещающего пучка с плоским волновым фронтом слабо влияют на качество формирования поля при условии, что пространственные спектры фазовой маски и шумов не перекрываются. Определяющую роль в формировании поля имеют периферийные области фазового элемента. Допустимые отклонения глубины модуляции фазы формирующей маски составляют до 10% в сторону уменьшения и до 20% в сторону увеличения от величины 2π . Число «не работающих» пикселей не должно превышать 10%.

28.4 Обобщённые квантованные спиральные пучки

Рассмотрено обобщение известных ранее так называемых квантованных спиральных пучков в форме замкнутых плоских кривых без самопересечений. Получено аналитическое выражение для распределений их комплексных амплитуд. Показано, что величина интенсивности таких световых полей может достигать нулевой величины на порождающей кривой. Обобщенный квантованный спиральный пучок зависит от параметра A , который определяет количество нулей внутри порождающей кривой. На рисунке 28.6 показаны результаты численного моделирования распределений интенсивности и фазы спиральных пучков для различных значений параметра A . Видно, что количество нулей внутри кривой различно при разных значениях параметра A . Это означает, что пропадает жёсткая связь между количеством нулей внутри порождающей кривой и параметром квантования.

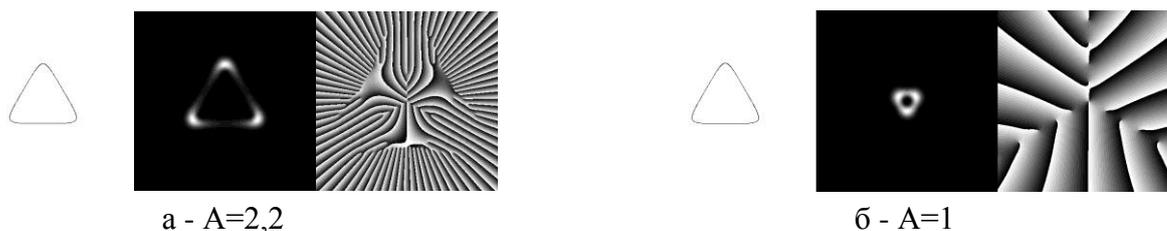


Рисунок 28.6 – Распределения интенсивности и фазы спиральных пучков при различных значениях параметра пучка для одного контура

Исследован вопрос об экстремальных свойствах орбитального углового момента обобщённых квантованных спиральных пучков.

Таким образом, найден новый способ построения квантованных спиральных пучков с различным количеством нулей внутри порождающей кривой и различной величиной орбитального углового момента. Изменение параметра A является альтернативным способом изменять количество нулей внутри замкнутой кривой, что важно при решении задачи распознавания контурных изображений средствами оптики спиральных пучков. С точки зрения быстродействия изменение параметра квантования и введение параметра A являются эквивалентными. Сравнительный анализ обоих подходов требует дополнительного исследования.

28.5 Анализ контурных изображений с помощью оптики спиральных пучков

Произведен структурированный анализ ранее предложенного подхода к распознаванию контурных изображений, включающий в себя когерентную оптику, математическую физику, теорию функций комплексного переменного, функциональный анализ. Показано, что спиральные пучки могут быть использованы в задаче классификации и распознавания контуров на графических изображениях. В основе предложенного метода лежит процедура сравнения не входного контура с

контурами из базы данных, а сравнение соответствующих спиральных пучков. Фундаментальным свойством этих пучков является то, что их Фурье-спектр с точностью до фазового множителя совпадает с их исходным образом. Это делает весьма эффективным саму процедуру сравнения.

Приведены результаты, позволяющие утверждать, что математический аппарат оптики спиральных пучков позволяет успешно преодолевать классические сложности контурного анализа (проблему начальной точки на контуре и поворот). Представлены результаты численного моделирования, свидетельствующие о том, что разработанный подход к распознаванию применим для решения модельных задач.

28.6 Выводы

В ходе выполнения проекта:

1. Теоретически и численно исследовано астигматическое преобразование спиральных пучков с параметрами вращения больше единицы
2. Разработан алгоритм построения спиральных пучков с параметрами вращения больше единицы в форме плоской кривой
3. Предложены новые конфигурации перестраиваемых модальных ЖК спиральных фазовых пластинок: с высокоомным управляющим электродом в виде незамкнутого кольца, в виде квадрата с вырезанной узкой полосой, а также спиральная пластинка на основе ЖК фокусатора с добавленными линейными контактными электродами и ограничивающей круглой диафрагмой.
4. Предложены простые соотношения для потенциалов, подаваемых на контактные электроды ЖК спиральных пластинок, для реализации аксиально-симметричных световых полей с угловым моментом, а также управления их характеристиками и юстировки их положения.
5. Получены количественные характеристики допустимых амплитудных и фазовых искажений при формировании двухлепестковых световых полей, поворачивающихся при распространении в пространстве.
6. Найден новый способ построения квантованных спиральных пучков с различным количеством нулей внутри порождающей кривой и различной величиной орбитального углового момента.
7. Показано, что предложенный метод анализа контурных изображений позволяет идентифицировать контуры с различной топологией.

Образовательная значимость проекта

В работе над проектом активное участие приняли аспирант и студенты 4-го - 6-го курсов Самарского университета (5 студентов). За это время они приобрели необходимый опыт работы с современной экспериментальной техникой и численному моделированию физических процессов, приняли непосредственное участие в проведении экспериментов по формированию и анализу спиральных пучков света и световых полей с орбитальным угловым моментом. По результатам работы защищены 2 дипломные работы на соискание степени бакалавра.

Список публикаций по проекту

1. Abramochkin E.G. Higher Derivatives of Airy Functions and of their Products [Text]/ Abramochkin E.G., Razueva E.V. //SIGMA. Symmetry, Integrability and Geometry: Methods and Applications. – 2018. – Vol. 14. – P. 042.
2. В. Г. Волостников Обобщённые квантованные спиральные пучки // Квантовая электроника, 48:6 (2018), 527–531.
Перевод: V G Volostnikov Generalised quantised spiral beams// Quantum Electron., 48:6 (2018), 527–531
DOI: <https://doi.org/10.1070/QEL16571>.

3. В.Г. Волостников, С.А. Кишкин, С.П. Котова Анализ контурных изображений с помощью оптики спиральных пучков // Квант. электроника, 2018, 48 (3), 268-274
Перевод: V G Volostnikov, S A Kishkin, S P Kotova, "Analysis of contour images using optics of spiral beams"// Quantum Electron, 2018, 48 (3), 268-274. DOI: <https://doi.org/10.1070/QEL16553>
4. S.P. Kotova, A.M. Mayorova, and S. A. Samagin Formation of ring-shaped light fields with orbital angular momentum using a modal type liquid crystal spatial modulator // Journal of Optics, V. 20. № 5. p. 055604. <https://doi.org/10.1088/2040-8986/aab8bb>
5. Е.Н. Воронцов, С.П. Котова, Н.Н. Лосевский, Д.В. Прокопова, С.А. Самагин, Влияние амплитудных и фазовых искажений на формирование световых полей с вращением распределения интенсивности // Краткие сообщения по физике, т. 45, № 3, С. 9-14, 2018.
Перевод: E. N. Vorontsov, S. P. Kotova, N. N. Losevsky, D. V. Prokopova, S. A. Samagin. Effect of Amplitude and Phase Distortions on the Formation of Light Fields with Rotating Intensity Distribution, Bull. Lebedev Phys. Inst., V. 45, p.71-74, 2018. DOI: 10.3103/S1068335618030028.
6. V.G. Volostnikov, E.N. Vorontsov, N.N. Losevsky, S.P. Kotova, D.V. Prokopova, S.A. Samagin, (2018), Phase Filters for 3D Localization of Point Light Sources, in VII International Conference on Photonics and Information Optics, KnE Energy & Physics, p. 469–481, 2018. DOI: 10.18502/ken.v3i3.2061
7. Kotova, S.P., Mayorova, A.M., Efimova, K.V., Samagin, S.A. Tunable modal liquid crystal spiral phase plate // Proceedings - International Conference Laser Optics 2018, ICLO 2018, p. 196, DOI: [10.1109/LO.2018.8435893](https://doi.org/10.1109/LO.2018.8435893)
8. K. Efimova, S. Kotova, N. Losevsky, S. Samagin Experimental generating of spiral beams of light // Proceedings - International Conference Laser Optics 2018, ICLO 2018, p.52, DOI: 10.1109/LO.2018.8435507
9. Kotova S.P., Mayorova A.M., Samagin S.A., New schemes of compact modal LC modulators for control of light spatial structure// EPJ Web of Conferences 190, 03006 (2018) <https://doi.org/10.1051/epjconf/201819003006>
10. D.A. Turaykhanov, A.V. Shkalikov, A.A. Kalachev, I.R. Imangulova, N.N. Losevsky, E.V. Razova, S.A. Samagin and S.P. Kotova, Producing single-photon wave packets of the infrared spectrum range with an orbital angular momentum using “vortex” phase plates // EPJ Web of Conferences 190, 04025 (2018) doi.org/10.1051/epjconf/201819004025
11. А.М. Майорова Актуальные проблемы оптики и лазерной физики // Фотоника. 2018. - № 1 (69). -С. 134-142. DOI: 10.22184/1993-7296.2018.69.1.134.142
12. Котова С.П., Майорова А.М., Пожидаев Е.П., Самагин С.А. Моделирование фазовых пространственных модуляторов света на основе жидкокристаллических сегнетоэлектриках// В сборнике: Информационные технологии и нанотехнологии. Сборник трудов ИТНТ-2018. Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева. 2018. С. 453-457.
13. Kotova, S., Mayorova, A., Pozhidaev, E., Samagin, S. Simulation of spatial phase light modulators based on the ferroelectric liquid-crystals // Journal of Physics: conference series 2018 1096 012017 DOI: 10.1088/1742-6596/1096/1/012017
14. Волостников В.Г., Воронцов Е.Н., Котова С.П., Лосевский Н.Н., Прокопова Д.В., Самагин С.А. Разработка фазовых фильтров для 3D локализации точечных излучателей// VII Международная конференция по фотонике и информационной оптике // Сборник научных трудов. 2018. С. 248-249.
15. A. Gorshelev, I. Eremchev, S. Kulik, A. Naumov, E. Vorontsov, V. Volostnikov and S. Kotova The study of a new family of phase masks for three-dimensional fluorescence nanoscopy // EPJ Web of Conferences 190, 04007 (2018), <https://doi.org/10.1051/epjconf/201819004007>
16. Д.В. Прокопова, Е.Н. Воронцов, Н.Н. Лосевский Световые поля с повышенной энергетической

эффективностью для задач наноскопии // XVI Всероссийский молодежный Самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике: сборник трудов конференции, (Самара, 13–17 ноября 2018 г.). – М.: ФГБУН Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, 2018. – 439 с. ISBN 978-5-902622-39-0, с.181-188.

17. К.В. Ефимова, Н.Н. Лосевский, Д.В. Прокопова, С.А. Самагин Формирование спиральных пучков методом частотного кодирования амплитуды // XVI Всероссийский молодежный Самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике: сборник трудов конференции, (Самара, 13-17 ноября 2018 г.). – М.: ФГБУН Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, 2018. – 439 с. ISBN 978-5-902622-39-0, с.300-307.

18. Gorshlev A., Eremchev I., Kulik S., Naumov A., Vorontsov E., Volostnikov V., Kotova S. The study of a new family of phase masks for three-dimensional fluorescence nanoscopy // В книге: XIII International Conference on Hole Burning, Single Molecule, and Related Spectroscopies: Science and Applications Book of abstracts. 2018. С. 139-140.

19. Turaykhanov D.A., Shkalikov A.V., Kalachev A.A., Imangulova I.R., Losevsky N.N., Razueva E.V., Samagin S.A., Kotova S.P. Preparation of single-photon wave packets of the infrared spectrum range with an orbital angular momentum using “vortex” phase plates // В книге: XIII International Conference on Hole Burning, Single Molecule, and Related Spectroscopies: Science and Applications Book of abstracts. 2018. С. 198-199.

20. Kotova S.P., Mayorova A.M., Samagin S.A., New schemes of compact modal LC modulators for control of light spatial structure // В книге: XIII International Conference on Hole Burning, Single Molecule, and Related Spectroscopies: Science and Applications Book of abstracts. 2018. С. 77-78.

21. А.В. Шкаликов, Д.А. Турайханов, А.А. Калачев, Н.Н. Лосевский, Е.В. Разуева, С.А. Самагин, С.П. Котова. К вопросу о разработке управляемых источников однофотонных состояний с орбитальным угловым моментом на основе спонтанного параметрического рассеяния света // Краткие сообщения по физике – 2018. – Т. 45, № 3, С 21-27

Перевод: A.V. Shkalikov, D.A. Turaykhanov; A.A. Kalachev, N.N. Losevsky, E.V. Razueva, S.A. Samagin and S.P. Kotova. On the Development of Controllable Sources of Single-Photon States with an Orbital Angular Momentum on the Basis of Spontaneous Parametric Down-Conversion of Light Bull. Lebedev Phys. Inst. (2018) 45, p.79-82.

29 Результаты Теоретического сектора СФ ФИАН

В данном разделе описаны результаты теоретического исследования влияния модуляции параметра накачки на стабилизацию излучения широкоапертурных лазеров динамического класса В, а также результаты численного моделирования формирования двумерных пространственно-временных газодинамических и магнитогазодинамических структур в тепловыделяющей изотропически неустойчивой среде.

29.1 Численное исследование подавления неустойчивостей в широкоапертурном лазере динамического класса В при модуляции параметра накачки

Известно, что поперечные неустойчивости в широкоапертурных лазерах, в первую очередь полупроводниковых вертикально излучающих лазерах и твердотельных микрочиповых лазерах, приводят к генерации пространственно-временного хаоса, что нежелательно для большинства практических приложений. Проведено исследование влияния модуляции параметра накачки на неустойчивости в лазерах динамического класса В.

Пространственно-временная динамика лазера описывается системой уравнений Максвелл-

ла-Блоха. Численное моделирование проводилось для параметров, соответствующих полупроводниковым лазерам. Для моделирования был использован псевдоспектральный метод расщепления по физическим факторам. Показано, что стабилизирующий эффект (рисунок 29.1 а, б) модуляции накачки возможен при частоте модуляции близкой к частоте релаксационных колебаний лазера (рисунок 29.2 слева, красная область). Кроме того, амплитуда модуляции должна быть достаточно большой для того, чтобы произошёл захват частоты. Однако слишком большая амплитуда модуляции (рисунок 29.2 слева, синяя область) приводит к параметрической неустойчивости и формированию как регулярных (рисунок 2 справа), так и нерегулярных поперечных структур поля.

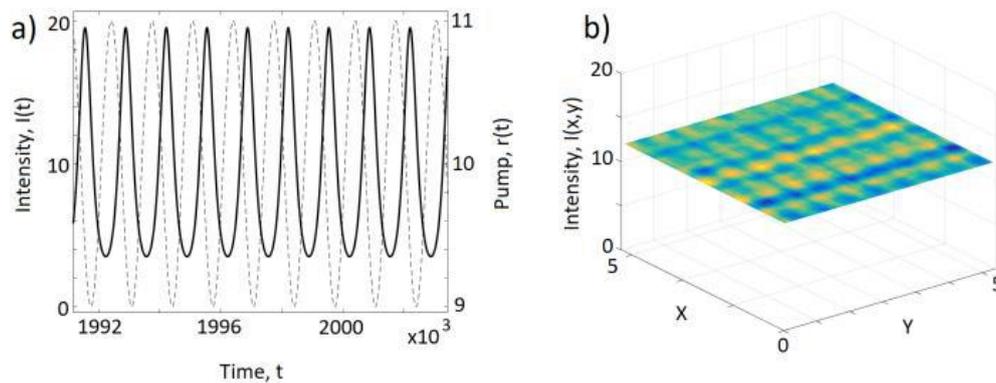


Рисунок 29.1 – а) Временные зависимости интенсивности излучения (сплошная линия) и параметра накачки (пунктирная линия); б) Мгновенное пространственное распределение интенсивности

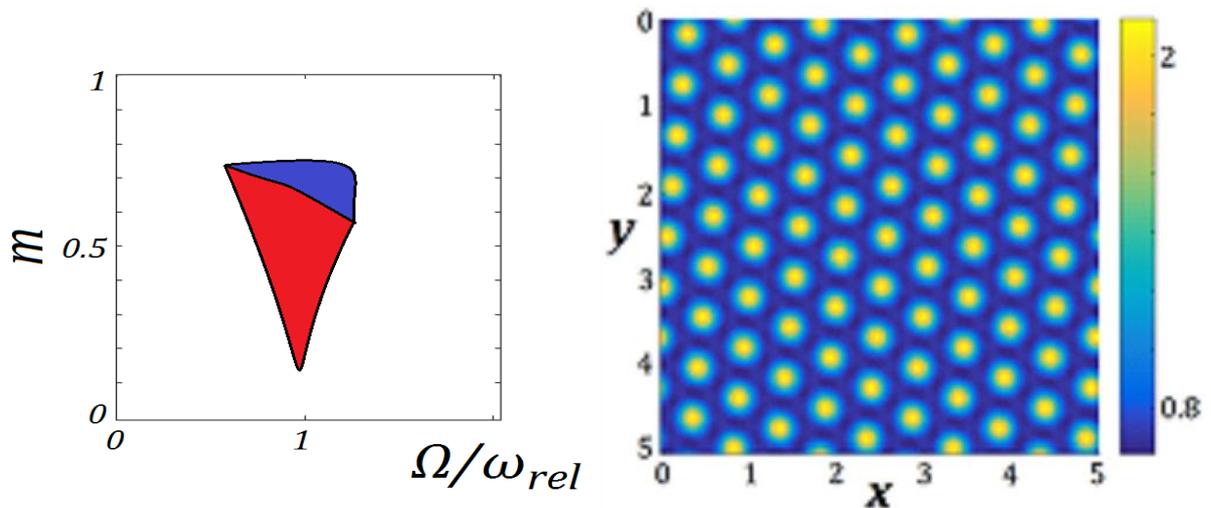


Рисунок 29.2 – Бифуркационная диаграмма (слева) на плоскости параметров m (амплитуда модуляции), Ω (частота модуляции) и гексагональная структура (справа). ω_{rel} – релаксационная частота

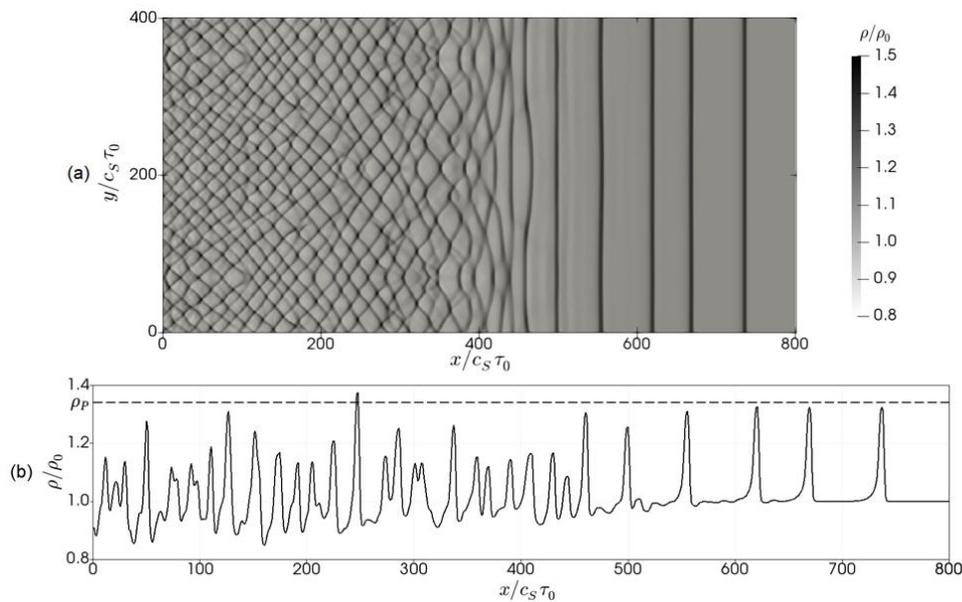
Таким образом, модуляция накачки может стабилизировать излучение лазера, если частота модуляции оказывается близкой к частоте релаксационных колебаний, а амплитуда модуляции находится в некотором заданном диапазоне (рисунок 29.2 слева, красная область).

Важность полученных результатов состоит в том, что они показывают возможный механизм эффективной стабилизации излучения мощных широкоапертурных лазерных систем.

29.2 Численное моделирование эволюции магнитогазодинамических возмущений в области изоэнтропической неустойчивости

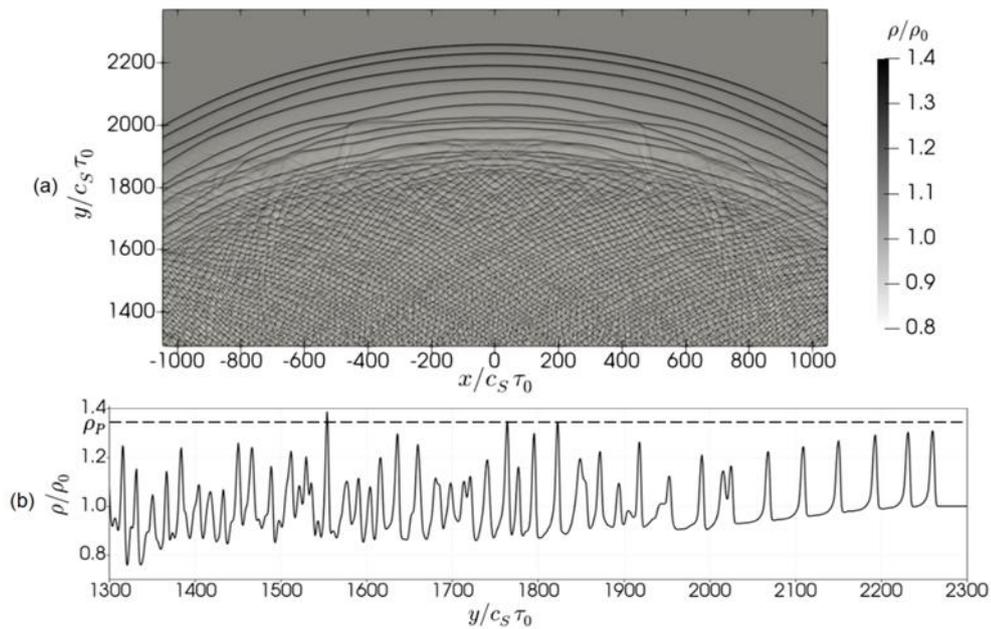
В двухжидкостной магнитогазодинамической модели проведено исследование изобарической (конденсационной) неустойчивости в тепловыделяющей плазме с произвольной степенью ионизации, находящейся в магнитном поле, вектор индукции которого перпендикулярен направлению, вдоль которого происходят возмущения. Были получены линейные уравнения и найдено дисперсионное соотношение для конденсационных мод. С использованием данного соотношения проведены расчеты зависимостей временных инкрементов конденсационных мод от волнового числа при различных значениях степени ионизации плазмы и величины магнитного поля.

В двумерной геометрии исследована эволюция газодинамических возмущений в тепловыделяющей среде в условиях изоэнтропической неустойчивости. Показан распад начального возмущения типа «ступенька», обладающего поперечной модуляцией (рябью) фронта, на последовательность плоских автоволновых фронтов (рисунок 29.3), предсказываемых обобщенным нелинейным акустическим уравнением. В результате эволюции локализованного возмущения происходит распад на последовательность концентрических автоволн (рисунок 29.4). Фронт двумерных автоволновых структур является устойчивым к поперечной модуляции. Позади фронтов образуется квазирегулярная ячеистая структура.



а – фрагмент двумерной области моделирования, б – одномерный срез распределения плотности
Пунктиром отмечена амплитуда импульсных автоволн, рассчитанная аналитически при помощи обобщенного нелинейного акустического уравнения

Рисунок 29.3 – Численное моделирование эволюции возмущения типа «ступеньки» в изоэнтропически неустойчивом тепловыделяющем газе



а – фрагмент двумерной области моделирования, б – одномерный срез распределения плотности. Пунктиром отмечена амплитуда импульсных автоволн, рассчитанная аналитически при помощи обобщенного нелинейного акустического уравнения.

Рисунок 29.4 – Численное моделирование эволюции локализованного возмущения в изоэнтропически неустойчивом тепловыделяющем газе

В ходе исследования образования двумерных пространственно-временных магнитогазодинамических структур в тепловыделяющей плазме в постоянном магнитном поле было показано, что в области тепловой неустойчивости изоэнтропического типа быстрая и медленная магнитоакустические волны усиливаются, образуя быстрые и медленные магнитоакустические структуры, соответственно. Результаты численного моделирования позволяют сделать вывод о том, что данные структуры проявляют автоволновые свойства: амплитуда и скорость структур не зависят от амплитуды и ширины начального гауссова возмущения. Кроме того, период следования структур не зависит от амплитуды начального возмущения. Численное моделирование показало, что вышеупомянутые структуры обладают следующими свойствами. Амплитуда быстрых структур много больше амплитуды медленных структур в областях с доминирующим газодинамическим давлением (β – параметр плазмы больше единицы). В среде с доминирующим магнитным давлением ($\beta < 1$) наблюдается обратная ситуация. Быстрые структуры распространяются во всех направлениях, а медленные структуры только вдоль линий магнитного поля. Кроме того, фронт быстрых структур является устойчивым, а на фронте медленных структур образуются клинообразные структуры. Также было показано, что анизотропная теплопроводность не подавляет процесс образования магнитоакустических структур в изоэнтропически неустойчивой среде, но значительно уменьшает амплитуду волн, распространяющихся вдоль линий магнитного поля (рис. 29.5).

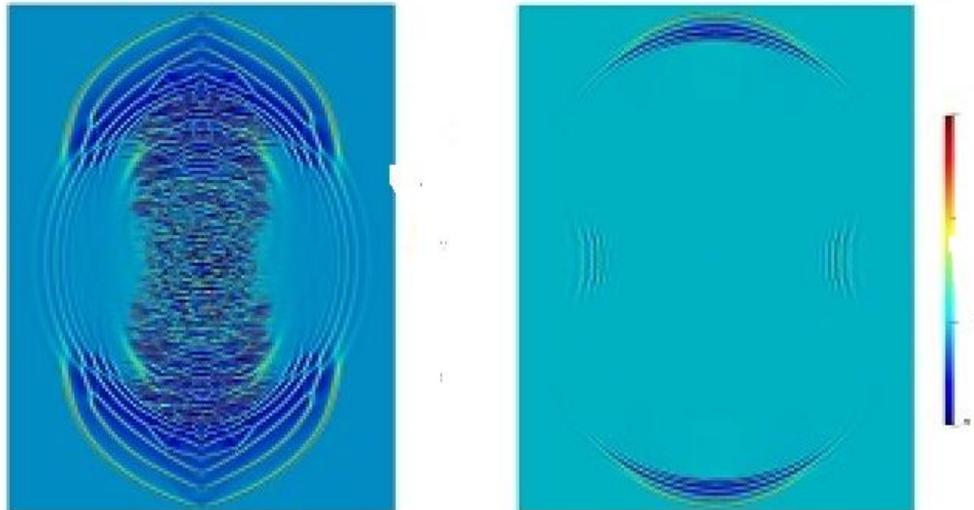


Рисунок 29.5 – Распространение магнитогазодинамических структур, генерируемых локализованным возмущением плотности, в изоэнтропически неустойчивой плазме с учетом анизотропной теплопроводности при $\beta = 8$ (слева) и $\beta = 0.5$ (справа). Направление невозмущенного магнитного поля – по оси абсцисс

29.3 Выводы

Показано, что модуляция накачки может стабилизировать излучение широкоапертурного лазера, если частота модуляции оказывается близкой к частоте релаксационных колебаний, а амплитуда модуляции находится в некотором заданном диапазоне.

Проведены расчеты зависимостей временных инкрементов конденсационных мод от волнового числа при различных значениях степени ионизации плазмы и величины магнитного поля.

Показано, что в результате эволюции локализованного возмущения происходит распад на последовательность concentрических автоволн. Фронт двумерных автоволновых структур является устойчивым к поперечной модуляции. Позади фронтов образуется квазирегулярная ячеистая структура.

Проведено исследование формирования магнитоакустических структур в тепловыделяющей изоэнтропически неустойчивой плазме с учетом анизотропной теплопроводности. Показано, что анизотропная теплопроводность не подавляет процесс образования автоволновых магнитоакустических структур в изоэнтропически неустойчивой среде, но значительно уменьшает амплитуду волн, распространяющихся вдоль линий магнитного поля.

Образовательная значимость проекта

В работе над проектом на этапе 2018 года активное участие приняли студенты 5-го - 6-го курсов и два аспиранта кафедры Физики Самарского национально-исследовательского университета. По результатам работы защищена 1 квалификационная работа магистра: Белов Сергей Александрович (м.н.с. СФ ФИАН) «Теоретическое исследование нелинейного распространения альфвеновских волн в изоэнтропически неустойчивых тепловыделяющих средах».

Список публикаций по проекту

1. Zavershinskii D., Molevich N., Ryashchikov D. etc. Influence of non-adiabatic processes on dispersion properties of waves in partially ionized plasma // 25th International Congress on Sound and Vibration 2018, ICSV 2018: Hiroshima Calling. – 2018. – V. 3. – P. 1663-1668.

2. Kazanskii P.N., Klimov A.I., Molevich N.E. etc. Numerical simulation of an argon swirling flow in the presence of a DC discharge // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – V. 980. Iss. 1.
3. Yarunova E.A., Krents A.A., Molevich N.E. Dynamics of the optical field in the ring cavity with nonlinear metamaterial and time-delayed feedback // *Progress in Biomedical Optics and Imaging - Proceedings of SPIE*. – 2018. – V. 10717.
4. Belov N.K., Zavershinskii I.P., Klimov A.I. etc. High effective heterogeneous plasma vortex reactor for production of heat energy and hydrogen // *J. of Physics: Conference Series*. – 2018. – V. 980. Iss. 1.
5. Belov S.A., Molevich N.E., Zavershinskii D.I. Amplification of Alfvén Waves due to Nonlinear Interaction with a Fast Magnetoacoustic Wave in Acoustically Active Conductive Media // *Technical Physics Letters* 2018. – V. 44. Iss. 3. – P. 199-202.
6. Zavershinskii I.P., Klimov A.I., Molevich N.E. etc. Acoustically Induced Formation of Helical Structures in a Swirling Argon Flow in the Presence of Pulse Repetitive Capacity HF Discharge // *High Temperature* 2018. — Vol. 56. Issue 3. — P. 454-457.
7. Krents A.A., Molevich N.E., Krestin S.V. Dynamics of VCSEL subjected to external optical injection under triangular current modulation // *Proceedings - International Conference Laser Optics 2018, ICLO 2018*. – 2018. – P. 172.
8. Yarunova E.A., Krents A.A., Molevich N.E. Dynamics of the optical field in the ring cavity with the nonlinear metamaterial and time-delayed feedback // *Proceedings - International Conference Laser Optics 2018, ICLO 2018*. – 2018. – P. 351.
9. Klimov A.I., Kurushina S.E., Molevich N.E. etc. Numerical simulation of argon flow structure in plasma vortex reactor // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2018. — Vol. 1112. Issue 1.
10. Molevich N.E., Pichugin S.Y., Ryashchikov D.S. etc. Condensation Instability in Partially Ionized Plasma in a Magnetic Field // *Bulletin of the Lebedev Physics Institute* 2018. – Vol. 45. Issue 9. – P. 267-271.
11. Krents A.A., Molevich N.E. Stabilization of broad-area class-B lasers by temporal pump modulation // *Proceedings - International Conference Laser Optics 2018, ICLO 2018*. – 2018. – P. 152
12. Klimov A., Kurushina S., Molevich N. etc. Plasma vortex reactor for production of heat energy and hydrogen // *MATEC Web of Conferences*. – 2018. – Vol. 209.
13. Krents A.A., Molevich N.E. Transverse patterns in broad-area lasers with anisotropy // *J. of Physics: Conference Series*. – 2018. – V. 1096. Iss. 1.
14. Belov S.A., Molevich N.E., Zavershinskii D.I. Orthogonal interaction of alfvén waves with fast magnetoacoustic wave in heat-releasing finite conductive medium // *25th International Congress on Sound and Vibration 2018, ICSV 2018: Hiroshima Calling*. – 2018. – V. 4. – P. 1928-1932.
15. Riashchikov D., Molevich N., Zavershinskii D. Two-dimensional magnetoacoustic waves induced by an initial localized density perturbation in hot plasma with strongly anisotropic thermal conductivity // *25th International Congress on Sound and Vibration 2018, ICSV 2018: Hiroshima Calling*. – 2018. – V. 3. – P.1655-1662.
16. Yarunova E.A., Krents A.A., Molevich N.E. Impact of time-delayed feedback on optical field dynamics in cavity with nonlinear metamaterial // *J. of Physics: Conference Series*. – 2018. – V. 1096. Iss. 1.
17. Zagidullin M.V., Kaiser R.I., Porfiriev D.P. etc. Functional Relationships between Kinetic, Flow, and Geometrical Parameters in a High-Temperature Chemical Microreactor // *Journal of Physical Chemistry A* 2018. – V. 122. Iss. 45. – P. 8819-8827.
18. Рящиков Д.С, Молевич Н.Е, Завершинский Д.И. Двумерные автоволновые газодинамические структуры в изэнтропически неустойчивом тепловыделяющем газе // *Письма в журнал технической физики* 2018. - Т.44. №24. - С. 94-102.

Заключение

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

1. Проведены комплексные численные исследования в области магнитной газовой динамики плазмы и пространственно-временной динамики оптических структур в поле излучения широкоапертурных лазеров.
2. Впервые теоретически исследован способ подавления пространственно-временных поперечных неустойчивостей в лазерах динамического класса В с помощью модуляции параметра накачки и построена бифуркационная диаграмма.
3. В рамках существующей двухжидкостной магнитогазодинамической модели проведено исследование изобарической (конденсационной) неустойчивости в тепловыделяющей плазме с произвольной степенью ионизации, находящейся в магнитном поле и численное моделирование эволюции двумерных пространственно-временных магнитогазодинамических структур в тепловыделяющей плазме в условиях изоэнтропической неустойчивости.
4. Созданные экспериментальные установки позволили провести комплексные исследования в области физической кинетики, спектроскопии и физики газового разряда.
5. Проведены комплексные исследования по получению методом СЛС 3D изделий из системы ПК + TiO₂ (поликарбонат - диоксид титана). Отмечены факты сохранения геометрической формы 3D изделий при незначительном дополнительном нагреве, при этом установлено гетерогенное распределение диоксида титана по полимерной матрице и не зафиксировано изменений исходной фазы (TiO₂), что полезно для приложений в фотонике. При высоких температурах (400°C) зафиксировано серьезное разрушение исходных 3D структур.
6. Проведены комплексные исследования в области лазерной ударной обработки отечественных демпфируемых нетермоупрочняемых алюминиевых сплавов без поглощающего покрытия. Проведено сравнение лазерного ударного воздействия на алюминиевый сплав с применением поглощающего покрытия и без него. Отработаны методики рентгеновского анализа дефектной и дислокационной структуры сплавов с ГЦК решеткой.
7. Выявлена возможность формирования функциональных оксидных пленок методом лазерной паротермической обработки металлов и их сплавов и лазерной закалки под слоем жидкости, что открывает возможность разработки новых методов лазерного упрочнения для повышения износостойкости, коррозионной стойкости, диэлектрических, теплозащитных и декоративных характеристик изделий машиностроительной, приборостроительной, аэрокосмической, электронной, химической, нефтегазовой, автомобильной, инструментальной, медицинской и других отраслей промышленности.
8. Проведены комплексные исследования по генерации, преобразованию и управлению характеристиками световых полей со сложной пространственной структурой, обладающих орбитальным угловым моментом, для задач наноскопии и контурного анализа.
9. Предложены новые типы ЖК модальных спиральных пластинок для формирования оптических вихрей. Исследованы особенности управления их характеристиками.
10. Методом численного и натурального моделирования определены допустимые величины амплитудных и фазовых искажений при генерации двухлепестковых световых полей с помощью фазовых распределений, полученных на основе спиральных пучков света.
11. Параметризация спирального пучка является альтернативным способом изменять количество нулей внутри замкнутой кривой, что важно при решении задачи распознавания контурных изображений средствами оптики спиральных пучков.
12. Показано, что математический аппарат оптики спиральных пучков позволяет успешно пре-

одолевать классические сложности контурного анализа (проблема начальной точки на контуре и поворот).

13. Показано, что ЛО поверхности контакта приводит к снижению коэффициента трения на контакте «инструментальный – обрабатываемый материал» на 20-50 % при величине нормальных контактных напряжений $\sim 120-180$ МПа. Установленное снижение величины коэффициента трения является существенным фактором, обеспечивающим высокие эксплуатационные характеристики упрочненных деталей машин и металлообрабатывающего инструмента, работающих в условиях повышенных давлений на контакте.

14. Разработана новая методика получения перфорированных (диаметр отверстий $\lambda/2, \lambda$) тонких пленок с увеличенной удельной площадью одной из поверхностей. Плотность перфорации – 50000 отв./мм².

15. Впервые зафиксировано формирование плотного столба наночастиц по направлению распространения лазерного излучения в случае лазерного синтеза Au наночастиц в этиловом спирте в присутствии внешнего электрического поля.

К работам по проекту были привлечены студенты старших курсов физического и химического факультетов Самарского национально-исследовательского университета, а также аспиранты Самарского университета и СамГТУ. За это время они приобрели необходимый опыт использования современных теоретических и численных методов расчета, 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 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.