

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 535.33: 621.373.8 (043.3)

Фадаиян
Ахмадреза Голамали

ПРОЦЕССЫ ОБРАЗОВАНИЯ НИТРИДА АЛЮМИНИЯ В ПЛАЗМЕ
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА АЛЮМИНИЙ СЕРИЯМИ
СДВОЕННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ
В АТМОСФЕРЕ ВОЗДУХА

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.21 - лазерная физика

Минск, 2019

Работа выполнена в **Белорусском государственном университете**.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ -

Зажогин Анатолий Павлович,
доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры лазерной физики
и спектроскопии
Белорусского государственного университета.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Чумаков Александр Никитич,
доктор физико-математических наук, доцент,
главный научный сотрудник
Центра физики плазмы ГНУ «Институт физики
им. Б.И. Степанова НАН Беларуси»;

Пузырев Михаил Валентинович,
кандидат физико-математических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник лаборатории
лазерной плазмодинамики
НИУ «Институт прикладных физических
проблем им. А.Н. Севченко»
Белорусского государственного университета.

ОППОНИРУЮЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ –

**Белорусский национальный технический
университет.**

Защита состоится 26 апреля 2019 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.01.17 при Белорусском государственном университете по адресу: г. Минск, ул. Ленинградская 8 (корпус юридического факультета), ауд. 407. Телефон учёного секретаря: 209-57-09.

Почтовый адрес: пр-т Независимости 4, Минск, 220030.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке Белорусского государственного университета.

Автореферат разослан «___» марта 2019 года.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций
кандидат физ.-мат. наук доцент

О.Г. Романов

ВВЕДЕНИЕ

Уникальные свойства нитридов металлов третьей группы делают их очень перспективными для создания на их основе электронных, оптоэлектронных и акустоэлектронных приборов. Уникальный комплекс физико-химических свойств этих материалов позволяет существенно улучшить технические характеристики современных приборов: повысить эффективность светодиодов и лазеров и расширить спектр их излучения в фиолетово-голубую и ближнюю УФ область спектра, многократно повысить допустимую мощность полевых транзисторов и интегральных схем (ИС).

Одним из нитридов металлов перспективных и применяемых в микроэлектронике и оптоэлектронике является нитрид алюминия (AlN) и керамические материалы на его основе. AlN имеет высокую теплопроводность (до $260 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$), высокое значение электрического сопротивления (до $10^{14} \text{ Ом}\cdot\text{см}$) и ширину запрещенной зоны $\approx 6,2 \text{ эВ}$ и т.д. Следует отметить, что одна из кристаллических фаз нитрида алюминия (вюрцит) имеет прямозонную характеристику, что позволяет использовать ее для приборов, излучающих в области глубокого ультрафиолета. Основным препятствием для широкого применения AlN является то, что он не образует жидкой фазы и практически не спекается.

В настоящее время для получения AlN в виде порошков или в составе тонких пленок и покрытий начинают применять методы лазерного воздействия на Al в атмосфере активированного азота под давлением. Наиболее изучены такие методы активации молекулы азота, как нагревание, ионизирующее излучение, действие катализаторов, электроразряд или сочетание этих методов. При тепловой активации молекулярного азота (нагрев до 3000°C) степень диссоциации очень мала (0,1 %). При использовании других методов активации КПД процесса не превышает 2 %. Это обуславливает поиск специальных условий реакции азота N_2 или активированного азотного комплекса с металлами для повышения эффективности процесса, что представляет большой практический интерес. В то же время это существенно усложняет применение этих методов на практике.

Вместе с тем имеется довольно много работ, в которых показано, что анализ и целенаправленное изменение компонентного, зарядового и энергетического распределения состава лазерного факела возможно на основе дополнительного лазерного воздействия на первичную плазму.

В связи с вышесказанным актуальность диссертационной работы обусловлена необходимостью как совершенствования существующих методик, так и изучения возможностей применения сдвоенных лазерных импульсов для получения AlN при воздействии только лазерного излучения на алюминий в воздушной атмосфере, что представляет как научный, так и большой практический интерес.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами, темами

Диссертационная работа выполнялась в соответствии с заданиями, входящими в следующие программы и проекты:

ГПНИ «Кристаллические и молекулярные структуры»; тема 727/03 «Разработка атомно-эмиссионных спектроскопических методов экспресс-анализа природных и технологических материалов на основе спектрометров с позиционно-чувствительными фотоприемниками»; 01.01.06-31.12.10 гг.; номер гос. регистрации №20063173.

ГПНИ «Электроника и фотоника»; тема 508/03 «Разработка лазерных атомно-эмиссионных спектроскопических методов экспресс-анализа биологических материалов на основе многоканальных спектрометров» 01.01.11-31.12.13 гг.; номер госрегистрации №20114355.

ГПНИ «Конвергенция» 3.3.02.2. Тема 529/03. «Разработка лазерных атомно-эмиссионных спектроскопических методов экспресс-анализа макро- и микроэлементов в различных биологических материалах у пациентов с ишемией головного мозга». 01.01.11-31.12.15 гг.; номер госрегистрации №20114362.

Цель и задачи исследования

Цель диссертационной работы состоит в том, чтобы показать возможность и определить условия получения AlN методом абляции сериями сдвоенных лазерных импульсов алюминиевых мишеней в воздушной атмосфере для использования их в технологиях получения нанокристаллов и напыления тонких пленок AlN .

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие основные задачи:

– Исследовать влияние параметров сдвоенных возбуждающих лазерных импульсов (интервала между импульсами и их энергий) на процессы образования AlN и AlO по интенсивность их полос при регистрации спектров методом лазерной атомно-эмиссионной многоканальной спектроскопии.

– Изучить влияния длительности серий последовательных импульсов на процессы формирования микроканалов и AlN и AlO при пробивке мишеней из алюминия.

– Исследовать влияние параметров возбуждающих импульсов (плотности мощности) от расфокусировки и угла падения излучения на мишень на процессы формирования нитридов и субоксидов алюминия.

– Оценить возможности повышения выхода продуктов путем

предварительного оксидирования поверхности алюминиевой мишени в различных средах.

Объектом исследования являются продукты, получаемые при взаимодействии мощных лазерных импульсов с металлами в воздухе.

Предметом исследования являются процессы, влияющие на выход нитридов и субоксидов алюминия и проведение спектрального контроля их при использовании методов лазерной абляции мишеней из сплавов алюминия в атмосфере воздуха сериями сдвоенных лазерных импульсов.

Научная новизна

Научная новизна результатов диссертационной работы состоит в следующем:

- впервые показана возможность образования AlN в лазерной плазме при воздействии сдвоенных лазерных импульсов на поверхность алюминиевого образца в атмосфере воздуха;
- определены параметры импульсов и условия возбуждения, обеспечивающие максимальное количество AlN в плазме;
- определены параметры импульсов и условия воздействия на мишень, обеспечивающие максимальное количество AlN в лазерном факеле, направляемом на подложку при напылении;
- разработаны методики по использованию предварительного анодного оксидирования поверхности алюминия для обеспечения более высокого выхода нитрида алюминия.

Положения, выносимые на защиту

1. Воздействие последовательности серий сдвоенных лазерных импульсов, сдвинутых относительно друг друга на 5–12 мкс, на поверхность алюминиевой мишени, обеспечивает увеличение количества ионов алюминия и азота в лазерной плазме в сотни раз по сравнению с нулевым интервалом и позволяет создавать условия для образования и одновременного спектрального определения нитридов и субоксидов алюминия в атмосфере воздуха.

2. Увеличение количества импульсов в серии до 40, обеспечивает рост концентрации нанокластеров AlN , образующихся за счет сверхзвукового расширения и турбулентного перемешивания газа, содержащего ионы алюминия и азота на выходе из импульсного сопла длиной ≈ 200 – 300 мкм и диаметром ≈ 100 мкм, формирующегося в результате воздействия серии сдвоенных лазерных импульсов на микроканал при пробивке мишени.

3. Результаты по установлению оптимальных параметров возбуждающих импульсов (интервала между импульсами, плотности мощности, числа импульсов в серии) от расфокусировки и угла падения излучения на мишень,

обеспечивающих увеличение количества наноконплексов нитрида алюминия в лазерном факеле на 10–15% по сравнению с воздействием сфокусированными импульсами.

4. Использование предварительно подготовленных плотных оксидных пленок на поверхности алюминия повышает на 10–20 % образование нитрида алюминия в лазерном факеле по сравнению с использованием более тонких или пористых пленок.

Личный вклад соискателя

Содержание диссертационной работы отражает личный вклад соискателя в проведение экспериментальных и теоретических исследований, анализ и интерпретацию полученных результатов. Основные результаты, приведенные в диссертационной работе, получены автором самостоятельно. Вклад научного руководителя диссертационной работы д.ф.-м.н. профессора *А.П. Зажогина* состоял в формулировании темы диссертационной работы, определении основных целей и задач исследований, обосновании выбора объектов изучения, обсуждении полученных результатов. Соавтор ряда работ д.ф.-м.н. профессор *Вороний Е.С.* участвовал в обсуждении результатов анализа эмиссионных спектров молекул и радикалов. Ряд работ опубликован совместно с аспирантами *Чинь Н.Х.* (объекты исследований - жидкие биосубстраты человека), *Патапович М.П.* (объекты исследований - твердые биосубстраты человека, методы осаждения элементов) и *Ермалицкой К.Ф.*, результаты которых не вошли в диссертацию. Ряд работ опубликован со студентами *Рахмани С.*, *Альдигуи Х.А.Р.*, *Арсеновым А.В.*, *Проценко С. В.*, *Баззалом Х.* которым соискатель оказывал практическую помощь в проведении экспериментов.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты диссертационной работы были представлены на следующих научных конференциях: Конгресс физиков Беларуси (Минск, Беларусь – 2008, 2013), III Международная научно-практическая конференция «Проблемы инженерно-педагогического образования в Республике Беларусь» (Минск, Беларусь – 2008), Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом» (Минск, Беларусь – 2009, 2011, 2017), Международная научная конференция «Актуальные проблемы физики твердого тела» (Минск, Беларусь – 2009, 2011), Международная научная конференция «Лазерная физика и оптические технологии» (Минск, Беларусь – 2008, 2010; Гродно, Беларусь – 2012), Международная научно-практическая конференция «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния» (Минск, Беларусь – 2015, 2017), Международная научно-техническая

конференция «Квантовая электроника» (Минск, Беларусь – 2013, 2015, 2017), международная научно-техническая конференция «Микро- и нанотехнологии в электронике» (Нальчик, Россия– 2015, 2016), Всероссийская конференция по фотонике и информационной оптике (Москва, Россия– 2013, 2014, 2017).

Опубликованность результатов диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 37 научных работах, в том числе 14 статьях в научных изданиях в соответствии с п. 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь (общим объемом 6,17 авторского листа), 23 статьях в сборниках материалов научных конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из перечня условных обозначений, введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка. Полный объем диссертационной работы составляет 146 страниц; включая 54 рисунка на 46 страницах; 14 таблиц на 10 страницах. Библиографический список содержит 217 наименования на 20 страницах, включая собственные публикации автора.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

В **главе 1** представлен обзор литературных данных о процессах получения нитридов металлов. Было отмечено, что импульсное лазерное напыление может быть использовано для формирования тонкопленочных структур и покрытий из самых различных металлов (*Ti*, *Ga*, *B* и др.) в различных средах содержащих азот, в виде азотсодержащих соединений (*NH₄* и др.). Для получения *AlN* в виде порошков или в составе тонких пленок и покрытий необходимо применять методы лазерного воздействия на *Al* в атмосфере активированного азота или распыляя непосредственно нитрид алюминия в виде керамик. В то же время показано, что сжигая нанопорошки алюминия определенной массы в атмосфере воздуха можно получить нитрид алюминия с высоким выходом продукта.

Рассмотрены вопросы взаимодействия лазерного излучения с поверхностью твердых тел, сопровождающиеся нагреванием, плавлением, испарением и взрывным вскипанием вещества. Рассмотрена зависимость процессов формирования абляционной плазмы и ее последующей эволюции от параметров лазерных импульсов. Отдельное внимание уделено методическим основам лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии (ЛАЭС).

В **главе 2** приведено описание экспериментальной установки - лазерного двухимпульсного атомно-эмиссионного многоканального спектрометра LSS-1 (пр-во СП "LOTIS ТП").

Подробно описана экспериментальная установка на базе лазерного спектрометра LSS-1, которая позволяет использовать для абляции вещества и возбуждения спектров как одиночные (ОЛИ), так и сдвоенные (СЛИ) лазерные импульсы, сдвинутые во времени друг относительно друга, что существенно расширяет аналитические возможности прибора.

Проведен краткий обзор методик определения температуры приповерхностной лазерной плазмы, концентрации электронов.

Рассмотрены вопросы взаимодействия лазерного излучения с поверхностью твердых тел. Оценена зависимость процессов формирования приповерхностной лазерной плазмы и ее последующей эволюции от параметров лазерных импульсов. Детально рассмотрены методические основы лазерного атомно-эмиссионного анализа. Рассмотрены вопросы изменения плотности мощности при расфокусировке и изменении угла падения лазерного излучения на поверхность мишени. Для возможности одновременного определения компонентов, входящих в состав лазерной плазмы, подобраны аналитические линии для $Al\ I$, $Al\ II$, $Al\ III$, $N\ II$, AlN и AlO .

В главе 3 содержит результаты исследования механизмов и условий образования нитридов и субоксидов алюминия в лазерной плазме при воздействии серии сдвоенных лазерных импульсов на алюминиевую мишень в атмосфере воздуха. Обсуждены особенности импульсно-периодического воздействия наносекундного лазерного излучения на мишень и формирования микроканалов и кластеров, содержащих AlN и AlO . Показано, что основным механизмом образования AlN являются процессы в турбулентно расширяющейся из микроканала лазерной плазме, образующейся при воздействии второго импульса на продукты конденсации, получаемые при испарении вещества первым импульсом в глубине канала.

Динамика изменения атомного и ионного состава приповерхностной плазмы и образования нанокластеров AlN и AlO в лазерной плазме исследована методом лазерной атомно-эмиссионной многоканальной спектроскопии (ЛАЭМС). Для проведения исследований использовался лазерный двухимпульсный спектрометр LSS-1.

Изучено воздействие сдвоенных лазерных импульсов на пластинку алюминиевого сплава Д16Т толщиной 1 мм в зависимости от энергии (10–80 мДж) и временного интервала между ними (0–110 мкс). Длина волны излучения 1,064 мкм. Длительность импульса 15 нс. Лазерное излучение фокусировалось на образец с помощью ахроматического конденсора с фокусным расстоянием 104 мм. Размер пятна фокусировки примерно 50 мкм, плотность мощности на мишени меняется от 10^9 до $2 \cdot 10^{11}$ Вт.см⁻².

Количественные данные по образованию нитрида и субоксида алюминия AlO оценивали по интенсивностям полос AlN (507,8 нм) и AlO (484,21 нм),

ионов алюминия и азота (прекурсоры для образования нитрида алюминия) по интенсивностям линий алюминия $Al II$ (466,3 нм), $Al III$ (452,92 нм), азота $N II$ (399,5 нм) в эмиссионных спектрах.

На рисунке 1 приведены интенсивности полос оксида и нитрида алюминия, линий ионов алюминия и азота при изменении интервала времени от 0 до 110 мкс между первым и вторым импульсом. Энергия первого импульса 49 мДж, а второго – 46 мДж. Использовали 40 последовательных сдвоенных импульсов в серии.

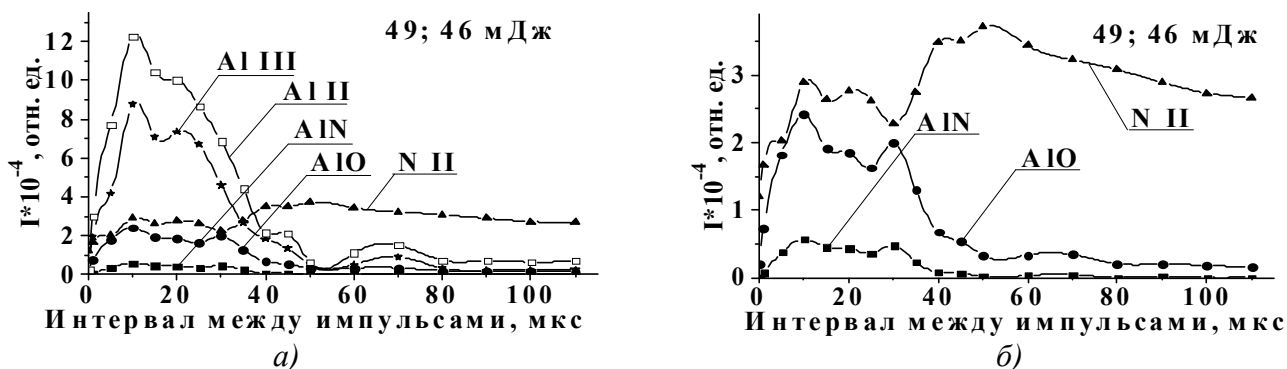


Рисунок 1. – Интенсивность линий ионов алюминия и азота, полос AlN и AlO (а), и интенсивность линии $N II$, полос AlN и AlO (б), в зависимости от межимпульсного интервала

Образование комплексов AlN , AlO и ионов алюминия более существенно при задержке воздействия второго импульса в интервале 1–40 мкс. При большей временной задержке интенсивность линий в плазме уменьшается примерно в 5–6 раз, что и проявляется в скорости образования продуктов.

В то же время интенсивность линии иона азота $N II$ продолжает постепенно повышаться, то есть эти два процесса идут антибатно. Эта закономерность свидетельствует об образовании AlN из ионов Al и N . При падении числа ионов Al в плазме, несмотря на сохранение количества образующих ионов N , вероятность образования AlN резко уменьшается.

Нами найдено, что положение максимума интенсивности линий оксида и нитрида алюминия, ионов алюминия и азота зависит от энергии накачки и имеет тенденцию к неравномерному увеличению с ее ростом в интервале 5→10–12 мкс. Наличие влияния временного интервала между импульсами на образование AlN и AlO при абляции мишени указывает на особенности взаимодействия излучения с продуктами конденсации паров металла внутри образующегося достаточно глубокого канала. Процесс конденсации паров, образовавшихся после воздействия первого импульса, будет наступать тем быстрее, чем меньше температура приповерхностной лазерной плазмы (рисунок 2 а). Скорость образования центров конденсации чрезвычайно резко зависит от величины переохлаждения пара. Зависимость интенсивности полос

оксида и нитрида алюминия, линий ионов алюминия и азота от энергии для времен задержки между первым и вторым импульсом 10 мкс приведена на рисунке 2 б.

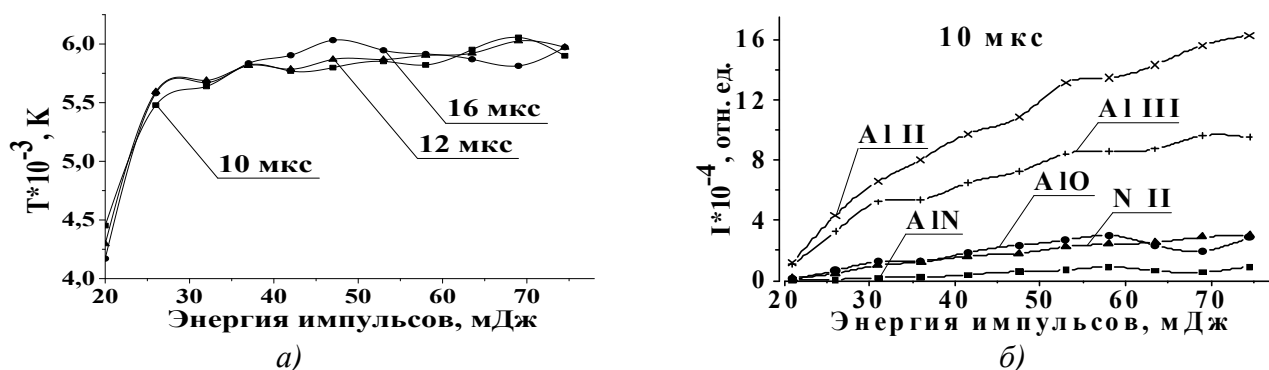


Рисунок 2. – Зависимость температуры приповерхностной лазерной плазмы (а), и интенсивности линий оксида и нитрида алюминия, ионов алюминия и азота (б), от энергии

Из приведенного рисунка видно, что при увеличении энергии импульса от 20 до 60 мДж интенсивность линии каждого компонента линейно увеличивается в 5 – 7 раз. Дальнейшее увеличение энергии импульсов приводит к замедлению скорости роста, интенсивность линий молекул нитрида и субоксида алюминия даже несколько уменьшается, что, по-видимому, свидетельствует об изменении процесса их образования.

Картина плазмообразования в воздушной среде существенно усложняется из-за явления последействия, практически неизбежного при формировании глубоких отверстий последовательностью сдвоенных импульсов. Оно вызывается накоплением аблированных микро - и наночастиц и кластеров в атмосфере образующихся полостей. При воздействии лазерного излучения происходит низкопороговый оптический пробой воздуха, насыщенного наночастицами металла. Появляется одновременно два разнесенных в пространстве плазменных образования. Одно из них – обычный факел лазерной плазмы на аблируемой поверхности, другое – плазменно-пылевое облако также на оси лазерного пучка, но отстоящее от поверхности на определенное расстояние. Это приводит, с одной стороны, к дополнительной экранировке, а, с другой, по-видимому, более важной, к созданию высокотемпературного плазменного облака высокого давления в глубине микроканала, разлетающегося преимущественно по направлению отверстия.

В работе изучена динамика формирования нанокластеров в плазме при воздействии СЛИ на алюминиевый сплав Д16Т в атмосфере воздуха в зависимости от числа сдвоенных лазерных импульсов (изменения глубины микроканала). На рисунке 3 а, в качестве примера, приведены результаты полученные при энергии импульсов 49 мДж и временном интервале между

импульсами 10 мкс, а рисунке 3 б для AlN суммы по 20 импульсов для 3 энергий.

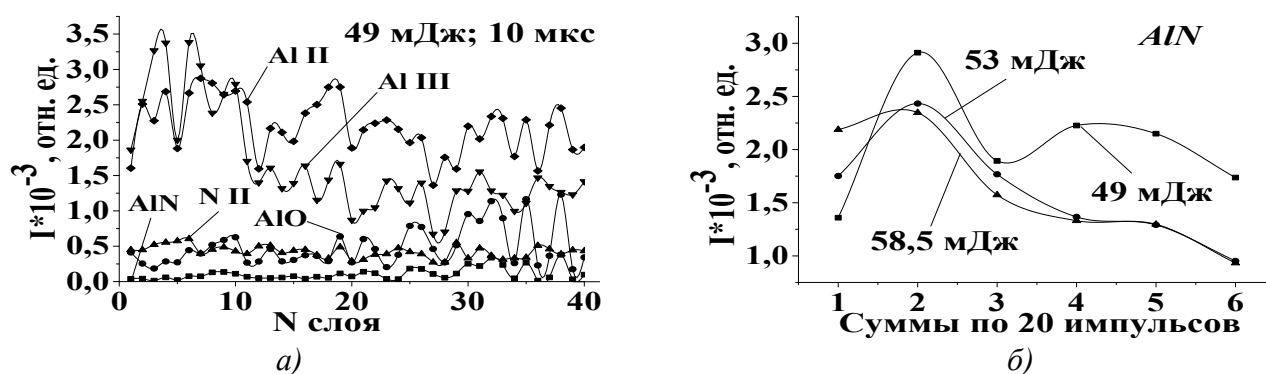


Рисунок 3. – Зависимость интенсивности линий от числа двойных лазерных импульсов (а); и от суммы для AlN по 20 импульсов (б)

Наибольшее количество нитрида алюминия образуется в интервале от 20 до 40 последовательных импульсов. Следует отметить корреляционную связь между изменениями интенсивностей линии $Al III$ и полос AlO и AlN . При падении интенсивности линии алюминия $Al III$ примерно с 10 импульса в 2–4 раза практически одновременно также растет интенсивность полос AlO и AlN . Интенсивность ионной линии $Al II$ во всем диапазоне падает только на 20–30 %. Это еще раз подтверждает более активное участие двукратно ионизованных ионов алюминия $Al III$ в процессе термохимического образования AlO и AlN .

Для понимания происходящих процессов нами дополнительно изучена динамика пробоя мишени. Количество импульсов, соответствующих пробоем отверстия, позволяет определить среднюю линейную скорость абляции. Глубина пробоя при изменении энергии импульса от 15 до 74 мДж при задержке импульса в интервале 0–15 мкс представлены на рисунке 4.

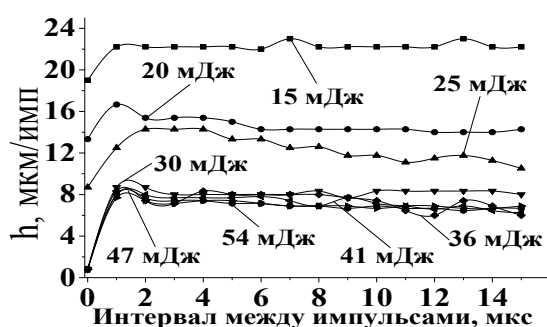


Рисунок 4. – Средняя линейная скорость абляции мишени в зависимости от энергии и интервала между импульсами

Характерное значение пороговой энергии потока излучения, соответствующее формированию слоя плазмы, экранирующего мишень от лазерного излучения, может быть установлено по измерению средней скорости абляции. Из рисунка видно, что увеличение энергии выше 30 мДж и временного интервала 1 мкс средняя скорость абляции уже практически не зависит ни от первого, ни от второго параметра. При высоких плотностях мощности наносекундного лазерного излучения ($q \sim 10^8 - 10^{11}$ Вт/см²) в результате процесса лазерной абляции в мишени формируются кратеры, вид которых зависит от многих параметров (энергия и частота повторения импульсов, наличие газовой среды перед мишенью, материал мишени и др.). При импульсно-периодическом

воздействии лазерных импульсов в одну точку мишени, образуются глубокие микроканалы, в которых наблюдается существенное возрастание температуры лазерной плазмы, увеличение количества сгенерированных нанокластеров. Это подтверждается, как правило, конусообразной формой микроканалов, которые проявляют свойства волновода (рисунок 5).

Концентрация кластеров и их распределение за срезом сопла определяются геометрией сопла. При воздействии на мишень сходящимся световым пучком характерна коническая форма лунки, в расходящемся – цилиндрическая. Форма среза сопла, представленная на рисунке 5, дополнительно корректируется определением диаметра канала на поверхности мишени в зависимости от энергии и количества импульсов (рисунок 6).

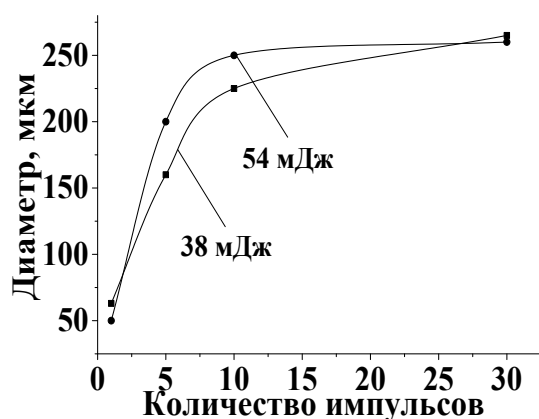


Рисунок 6. – Диаметр канала на поверхности мишени в зависимости от энергии и количества импульсов

кластеров за его срезом является наиболее однородным.

В главе 4 приводятся результаты исследований процессов формирования нанокластеров AlN в зависимости от изменения плотности мощности лазерного излучения путем расфокусировки и изменения угла его падения на мишень с целью повышения количества нитрида алюминия в факеле, направляемом на подложку, при получении пленок AlN . Изучено влияние плотности оксидированных пленок на поверхности алюминиевой мишени на процессы образования нитрида и субоксида алюминия.

Условия фокусировки оказывают значительное влияние на профиль лунки. С увеличением расстояния между плоскостью фокусировки и поверхностью материала увеличивается радиус лунки и уменьшается ее глубина. В результате

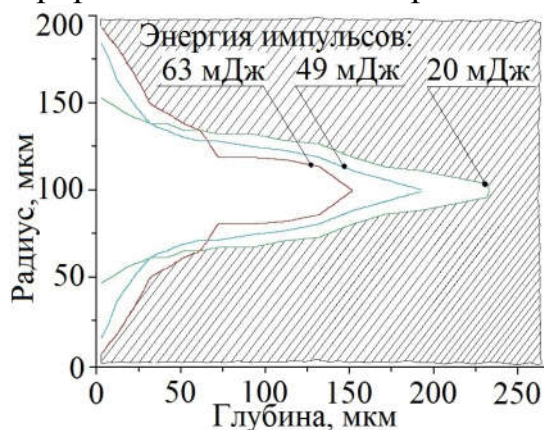


Рисунок 5. – Формы микроканалов от энергии и количества импульсов при воздействии 30 последовательных сдвоенных импульсов

Влияние энергии импульса на форму микроканала практически нивелируется после 15–20 импульсов. Примерно с такого же количества импульсов наблюдается увеличение количества нитрида и оксида алюминия, образующегося в расширяющейся плазме (см. рисунок 3). При расширении газа сквозь сопло, кластеризации подвергается не все атомы или молекулы газа, а только определенный их процент. Как правило, сопло с коническим профилем имеет преимущество, поскольку распределение плотности

исследований определены временные интервалы между импульсами (5–15 мкс), энергии и параметры расфокусировки излучения, обеспечивающие возможность получения необходимых концентраций одно- или двукратно ионизированных атомов алюминия и ионов азота для формирования молекулярных нанокластеров AlN . Показано, что последовательное воздействие на мишень серии расфокусированных на $-0,5$ – 1 мм сдвоенных лазерных импульсов с временным интервалом между ними 10 мкс приводит к существенному увеличению поступления AlN и радикалов AlO в плазму. На рисунке 7 приведены результаты исследования процесса образования нанокластеров AlN в зависимости от энергии импульсов и их расфокусировки при временном интервале 10 мкс.

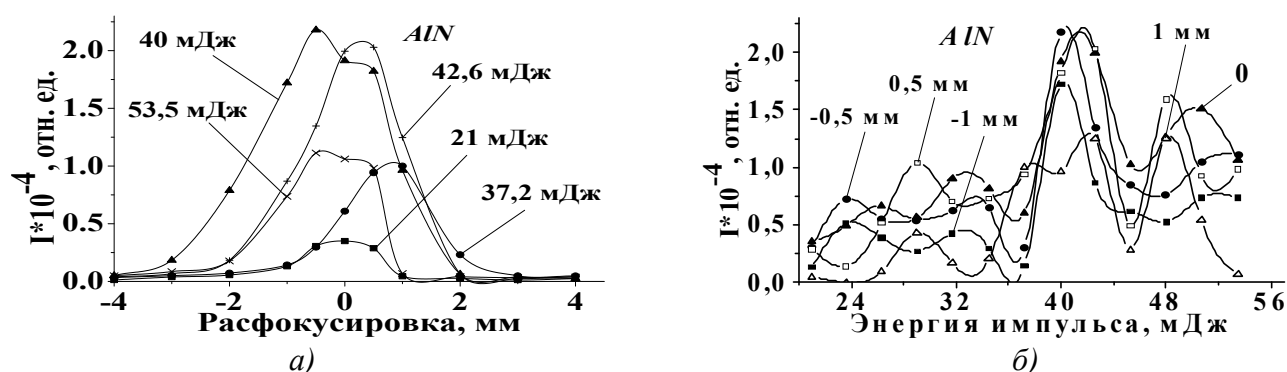


Рисунок 7. – Зависимость интенсивности полос AlN в спектрах от расфокусировки (а), и от энергии импульсов (б)

Видно, что процесс образования нанокластеров AlN сначала увеличивается с увеличением энергии до 40 мДж, а затем несколько уменьшается. Зависимость интенсивности линий в спектрах от расфокусировки (плотность мощности) неоднозначна, что представлено на рисунке 8 для энергии импульсов 40 мДж.



Рисунок 8. – Зависимость интенсивности линий $Al II$ (466,3 нм), $Al III$ (452,92 нм), $N II$ и полос AlN и AlO в спектрах от расфокусировки

Получена хорошая корреляция между возрастанием интенсивности полос AlN и AlO при малой расфокусировке и существенным уменьшением интенсивности линии $Al III$ (452,92 нм), что свидетельствует об активном участии ионов $Al III$ в процессах образования нанокластеров AlN и AlO .

Особый интерес представляет собой практически симметричное снижение интенсивности спектральных линий всех компонентов факела как при отрицательной, так и при положительной расфокусировке. Это указывает на наличие дополнительных механизмов возбуждения атомов и ионов при расфокусировке. Так, при $\Delta f < 0$ и межимпульсном интервале 10 мкс практически весь объем абляционной плазмы расширяется внутри конуса лазерного излучения и

взаимодействует со вторым импульсом. В случае положительной расфокусировки большая доля испаренного вещества в процессе разлета оказывается за пределами зоны действия лазерного луча. При $\Delta f < 2$ мм однако часть атомов алюминия еще эффективно возбуждается излучением с высокой плотностью потока излучения в точке фокуса.

Нами также выяснено, что скорость образования нитрида алюминия в лазерном факеле значительно зависит от количества последовательных сдвоенных импульсов. Для лучшего понимания скрытых механизмов такой зависимости изучены процессы при пробое мишени сериями расфокусированных сдвоенных

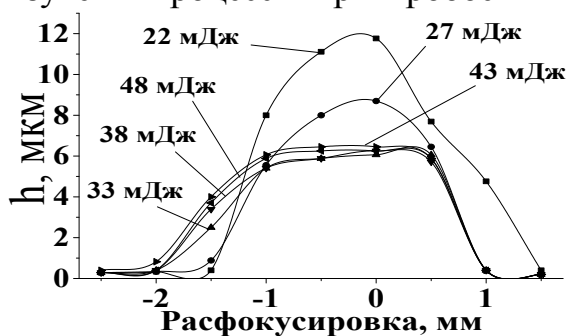


Рисунок 9. – Усредненные значения толщины снимаемого слоя в зависимости от расфокусировки и энергии импульсов

лазерных импульсов. Усредненные значения толщины снимаемого слоя представлены на рисунке 9.

Особый интерес вызывает практически симметричное снижение толщины снимаемого слоя от величины расфокусировки для импульсов малых энергий. Это указывает на преимущественный вклад теплового механизма абляции и, значит, меньшей

величиной плотности факела. В этом случае при $\Delta f = 0$ большая часть поступающей энергии второго импульса идет на плавление и испарение материала, обеспечивая большую скорость сверления отверстия.

Из полученных результатов видно, что положительная расфокусировка пучка более резко влияет на скорость пробивки. При расфокусировке в 1–1,5 мм, практически независимо от энергии импульса, средняя толщина снимаемого слоя стремится к нулю. При отрицательной расфокусировке влияние ее величины в несколько раз менее значимо.

Найдено, что при энергии импульсов более 33 мДж число импульсов для пробоя N_n практически не зависит от расфокусировки в пределах -1,5–0,5 мм, а толщина испаряемого слоя покрытия также одинакова. При снижении плотности потока излучения уменьшается и доля энергии, распространяющейся вглубь образца в каждой точке лазерного пятна. Это является важным достоинством данного метода управления плотностью потока q , что дает возможность плавного изменения количества молекулярных нанокластеров в широком диапазоне значений энергии импульсов.

Нами также исследовано влияние качества оксидированного покрытия поверхности образцов на процессы формирования нитридов и оксидов алюминия. Определены условия и оценены возможности использования метода абляции сериями сдвоенных лазерных импульсов предварительно оксидированных алюминиевых мишеней для увеличения количества

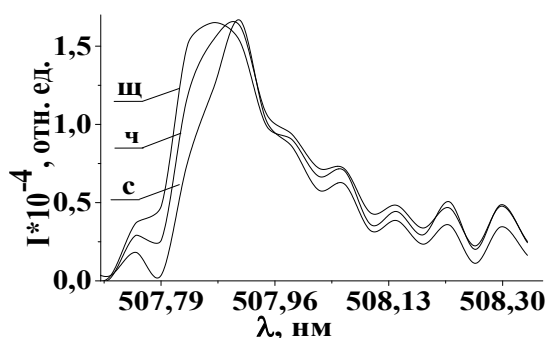


Рисунок 10. – Суммарные интенсивности полос $AlN+AlO$ в образцах, нормированных по интенсивности

получаемых нанокластеров нитрида алюминия AlN при разработке технологии напыления тонких пленок (рисунок 10).

Очевидно, что в образце, окисленном в щавелевой кислоте (*ш*) (плотная оксидная пленка), вклад полосы AlN в суммарный контур значительно больше, чем AlO . Эта величина меньше в термически окисленном образце (*ч*) (токая оксидная пленка), наименее активен образец с пористой поверхностью, окисленный в серной кислоте (*с*).

Для разработки технологии получения нанокристаллов и напыления тонких пленок нами проведены исследования процессов, происходящих как на поверхности, так и в лазерной плазме внутри образующегося канала при пробое мишени сериями сдвоенных лазерных импульсов, направленных под различными углами к поверхности мишени. Изучена динамика процесса формирования нанокластеров AlN и AlO в лазерной плазме в глубине кратера при облучении мишени из сплава Д16Т толщиной 1 мм в зависимости от энергии импульса (20÷60 мДж), временного интервала между ними (0÷20 мкс) и угла падения лазерного излучения на мишень от 90° до 30° (см. рисунок 11).

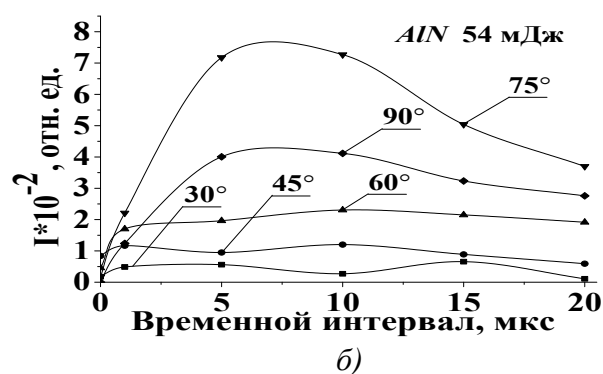
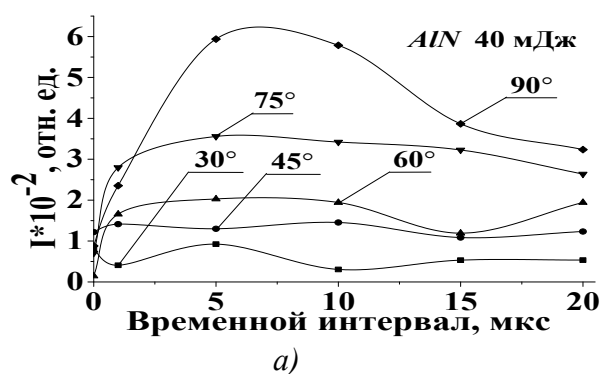


Рисунок 11. – Зависимость интенсивности полосы AlN в спектрах от интервала между импульсами и угла падения излучения для энергий: а) 40 мДж и б) 54 мДж

Показано, что последовательное воздействие на мишень сериями сдвоенных лазерных импульсов с временным интервалом между ними 5–15 мкс под углом 60° – 75° и энергией 54 мДж приводит к увеличению образования AlN в лазерной плазме, направляемой на подложку, в 5–7 раз, по сравнению с часто используемой схемой под углом 45° . Выполненные спектроскопические исследования лазерной плазмы показали возможность контроля и управления ее характеристиками при напылении.

Для демонстрации возможности напыления на поверхность стекла нитрида алюминия нами использованы результаты приведенные выше. На рисунке 12 приведены изображения поверхности стекла с напыленной пленкой нитрида

алюминия и для сравнения оксидов свинца (300 импульсов). Используются оптимальные параметры установки полученные выше.

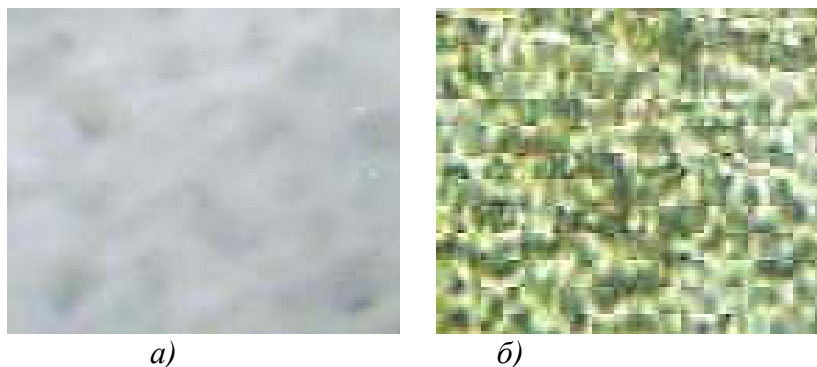


Рисунок 12. – Изображения поверхности стекла после напыления пленок серией сдвоенных лазерных импульсов: а) нитрида алюминия; б) оксидов свинца

При напылении пленки нитрида алюминия поверхность пленки существенно отличается от металлических и металлоксидных покрытий. Нет видимых капель, нитевидных фракталов, изредка встречаются несколько размытые фрагменты, незначительно отличающиеся по цвету.

Таким образом, нами на примере синтеза тонкопленочных нитридных и оксидных покрытий оценены возможности использования высокоинтенсивных сдвоенных лазерных импульсов для технологии лазерного напыления тонких пленок на стекло непосредственно в воздухе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Экспериментально установлено, что переход от одноимпульсного к двухимпульсному воздействию на мишень из алюминиевых сплавов при неизменной энергии и плотности мощности лазерного излучения приводит к более чем стократному увеличению интенсивности спектральных линий ионов Al и азота, полос AlN и AlO . При увеличении плотности мощности оптимальный интервал между импульсами увеличивается от 5 мкс до 10–12 мкс. Выявленная зависимость оптимального временного интервала между импульсами на образование AlN при абляции мишени указывает на особенности взаимодействия излучения второго импульса с продуктами конденсации паров металла, оставшихся от первого импульса, внутри образующегося достаточно глубокого канала. При увеличении температуры паров скорость образования центров конденсации, определяемая величиной переохлаждения пара, уменьшается. Измерения температуры приповерхностной плазмы показали, что она увеличивается от ≈ 4200 до 6000 K при увеличении энергии импульсов от 20 до 60 мДж [1–7, 9, 12, 13, 15, 16, 20, 22–24, 26, 30, 32, 33, 35–37].

2. Установлено, что при лазерном воздействии одиночных лазерных импульсов на мишень процесс образования AlN в приповерхностной лазерной

плазме практически не идет, даже при наличии большого количества атомов алюминия и активированного азота в виде ионов. Показано, что только при лазерном воздействии второго импульса на металлическую мишень поток испарившихся атомов смешивается с активизированной воздушной плазмой, получающейся в результате взаимодействия излучения с продуктами абляции, оставшимися от первого импульса. Последующее расширение этой смеси ведет к снижению ее температуры и пересыщению пара [1–3, 9, 18, 20–23, 26, 35–37].

3. Показано, что образование факела, содержащего субмикронные частицы AlN , определяется сочетанием ряда параметров: количеством сдвоенных лазерных импульсов, их плотностью энергии, давлением окружающего газа и параметрами (аспектным соотношением) образованного канала. При увеличении номера последовательного импульса в серии в интервале от ≈ 20 до 40 импульса рост количества AlN и AlO обеспечивается за счет сверхзвукового расширения и турбулентного перемешивания газа, содержащего ионы алюминия и азота на выходе из импульсного сопла длиной ≈ 200 – 300 мкм и диаметром до сотни микрометров, образующегося в результате воздействия сдвоенных лазерных импульсов на микроканал при пробивке мишени. При дальнейшем увеличении номера импульса и соответствующего увеличению длины сопла выход нанокластеров AlN падает [1–3, 5–7, 9, 12, 13, 21, 23, 24, 26, 36, 37].

4. Установлено, что при увеличении энергии импульсов выше 50–60 мДж скорость процессов образования AlN и AlO замедляется и даже в ряде случаев понижается на 10–15 %. Показано, что это обусловлено экранированием мишени за счет более раннего образования оптически плотной приповерхностной лазерной плазмы и изменением формы канала. Подтверждением этому предположению служит тот факт, что количество ионов алюминия продолжает закономерно увеличиваться с увеличением энергии импульсов [1–3, 5, 7, 12, 14, 21–24, 26, 36, 37].

5. Определены временные интервалы между импульсами (5–15 мкс), энергии импульсов (40–60 мДж) и параметры расфокусировки излучения на ± 1 мм, обеспечивающие возможность получения необходимых концентраций одно и двухкратно ионизированных атомов алюминия и ионов азота, способствующих существенному увеличению поступления нанокластеров AlN и радикалов AlO в лазерную плазму. Экспериментально установлено, что при энергии импульсов более 33 мДж толщина испаряемого слоя мишени одинакова и практически не зависит от расфокусировки в пределах от $-1,5$ до $+ 0,5$ мм. Важным преимуществом данного метода управления плотностью потока q является возможность плавного изменения количества молекулярных нанокластеров в широком диапазоне значений [6, 10, 27, 28, 30, 33, 37].

6. Оценены возможности использования и определены условия для получения методом абляции сериями сдвоенных лазерных импульсов,

предварительно оксидированных алюминиевых мишеней, различающихся плотностью и толщиной слоя, нанокластеров AlN для использования в технологиях напыления тонких пленок. Установлено, что при использовании образцов оксидированных в щавелевой кислоте (плотное покрытие) относительное количество образующегося AlN по отношению к AlO значительно больше, чем для образцов, термически окисленных и с пористой поверхностью, полученной при оксидировании в серной кислоте [8, 10, 11, 24, 27, 28].

7. Показано, что последовательное воздействие на мишень сериями сдвоенных лазерных импульсов с временным интервалом между ними 5–15 мкс под углом 60–75° и энергией 50–60 мДж приводит к увеличению образования AlN в лазерной плазме, направляемой на подложку, в 5–7 раз, по сравнению с часто используемой на практике схемой под углом 45° [4, 14–16, 18, 34].

8. На примере синтеза тонкопленочных покрытий из нитрида алюминия и оксидов свинца показано, что использование высокоинтенсивных сдвоенных лазерных импульсов позволяет проводить лазерное напыление тонких пленок на стекло непосредственно в воздухе, снижая до приемлемого уровня негативное воздействие окружающей атмосферы на процессы осаждения (торможение осаждаемых частиц, внедрение атмосферных газов в объем пленки) [4, 5, 8, 14–19, 25, 26, 29, 31, 32].

Рекомендации по практическому использованию результатов

В ходе проведения исследований в рамках диссертационной работы был получен ряд новых научных результатов, которые могут быть рекомендованы для практического использования:

- Показанные возможности и преимущества использования сдвоенных лазерных импульсов при получении наноконплексов и пленок нитридов алюминия можно использовать и для других нитридов металлов, перспективных для создания на их основе электронных, оптоэлектронных и акустоэлектронных приборов.
- Найденные способы управления скоростью поступления нанокластеров AlN при расфокусировке и изменения угла падения лазерного пучка на мишень можно использовать для повышения качества пленок получаемых и из других соединений.
- Разработанные методики повышения выхода нанокластеров AlN при предварительном оксидировании поверхности алюминия можно использовать при получении высокоактивных нанопорошков.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в научных журналах в соответствии с п.18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоения ученых званий в Республике Беларусь

1. Зажогин, А. П. Динамика процессов абляции и развития приповерхностной лазерной плазмы сплавов алюминия сдвоенными лазерными импульсами / А. П. Зажогин, А. Р. Фадаиян // Вестн. Бел. гос. ун-та. Сер. 1. – 2008. – № 3. – С. 15–18.
2. Атомно-эмиссионный многоканальный спектральный анализ: научное и практическое применение / Е. С. Воропай, К. Ф. Ермалицкая, А. П. Зажогин, М. П. Патапович, А. Р. Фадаиян // Вестн. Бел. гос. ун-та. Сер. 1. – 2009. – № 1. – С. 14–20.
3. Фадаиян, А. Р. Эффекты низкопорогового пробоя металлов одиночными и сдвоенными лазерными импульсами / А.Р. Фадаиян, А. П. Зажогин // Вестн. Бел. гос. ун-та. Сер. 1. – 2009. – №2. – С.12– 14.
4. Фадаиян, А. Р. Исследование характеристик приповерхностной лазерной плазмы в зависимости от угла падения сдвоенных лазерных импульсов на многокомпонентную металлическую мишень / А. Р. Фадаиян, А. П. Зажогин // Вестн. Бел. гос. ун-та. Сер.1. – 2010. – № 1. – С. 22–26.
5. Фадаиян, А. Р. Процессы модификации поверхности алюминиевых сплавов с легкоплавкими микродобавками при лазерной обработке их мощными сдвоенными лазерными импульсами / А. Р. Фадаиян, М. П. Патапович // Вестн. Бел. гос. ун-та. Сер. 1. – 2010. – № 3. – С. 51–56.
6. Фадаиян, А. Р. Процессы образования многозарядных ионов алюминия и радикалов AlO в приповерхностной лазерной плазме при воздействии на алюминиевые сплавы сдвоенными лазерными импульсами / А. Р. Фадаиян, Чинь Нгок Хоанг, А. П. Зажогин // Вестн. Бел. гос. ун-та. Сер.1. – 2011. – № 2. – С. 27–32.
7. Чинь, Н. Х. Спектральный контроль и управление процессами образования кластеров нитридов алюминия в плазме при воздействии на алюминий сериями сдвоенных лазерных импульсов / Н. Х. Чинь, А. Р. Фадаиян, А. П. Зажогин // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов : межвуз. сб. науч. тр. / под общей ред. В. М. Самсонова, Н. Ю. Сдобнякова ; Тверской гос. ун-тет. – Тверь, 2011. – Вып. 3. – С. 259–263.
8. Фадаиян, А. Р. Исследования процессов образования наночастиц и фракталов на поверхности оксидированного алюминия при лазерном напылении тонких пленок меди сдвоенными лазерными импульсами /

А. Р. Фадаиян, А. П. Зажогин // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. Естественные науки. – 2011. – № 6 (69). – С. 149–152.

9. Фадаиян, А. Р. Процессы формирования нанокластеров TiO в приповерхностной лазерной плазме при воздействии сдвоенными лазерными импульсами на титан и титанат бария / А. Р. Фадаиян, С. В. Проценко, А. П. Зажогин // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов : межвуз. сб. науч. тр. / под общей ред. В. М. Самсонова, Н. Ю. Сдобнякова ; Тверской гос. ун-тет. – Тверь, 2012. – Вып. 4. – С. 296–301.

10. Исследования процессов образования радикалов AlN и AlO в плазме от расфокусировки сдвоенных лазерных импульсов при воздействии их на оксидированный алюминий / С. В. Проценко, Х. А. Р. Альдигауи, А. Р. Фадаиян, Е. С. Воропай, А. П. Зажогин // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов : межвуз. сб. науч. тр. / под общей ред. В. М. Самсонова, Н. Ю. Сдобнякова ; Тверской гос. ун-тет. – Тверь, 2013. – Вып. 5. – С. 261–266.

11. Спектральные исследования процессов образования радикалов AlO и AlN в плазме при воздействии на оксидированный алюминий сериями сдвоенных лазерных импульсов / А. Р. Фадаиян, Баззал Ходор, Е. С. Воропай, А. П. Зажогин. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов: межвуз. сб. науч. тр. / под общей ред. В. М. Самсонова, Н. Ю. Сдобнякова ; Тверской гос. ун-тет. – Тверь, 2014. – Вып. 6. – С. 409–414.

12. Исследования процессов образования нитрида алюминия в плазме при воздействии сдвоенных лазерных импульсов на алюминиевый сплав Д16Т в атмосфере воздуха / Х. Баззал, А. Р. Фадаиян, Е. С. Воропай, А. П. Зажогин // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов: межвуз. сб. науч. тр. / под общей ред. В. М. Самсонова, Н. Ю. Сдобнякова ; Тверской гос. ун-тет. – Тверь, 2015. – Вып. 7. – С. 70–75.

13. Баззал, Ходор. Процессы образования нитрида алюминия в плазме при воздействии сдвоенных лазерных импульсов на алюминиевый сплав Д16Т в атмосфере воздуха / Ходор Баззал, А. Р. Фадаиян, А. П. Зажогин // Вестн. Бел. гос. ун-та. Сер. 1. – 2016. – №1. – С. 26–33.

14. Баззал, Х. Исследования процессов образования нитрида алюминия в плазме в зависимости от угла падения сдвоенных лазерных импульсов на мишень из алюминиевого сплава Д16Т в атмосфере воздуха / Х. Баззал, А. Р. Фадаиян, А. П. Зажогин // Журн. Бел. гос. ун-та. физика. –2017. – №1. – С. 34–42.

Статьи в сборниках трудов научных конференций

15. Фадаиян, А. Р. Исследование характеристик приповерхностной лазерной плазмы в зависимости от угла падения сдвоенных лазерных импульсов на металлическую мишень / А. Р. Фадаиян, А. П. Зажогин // Сборник научных трудов II Конгресса физиков Беларуси, Минск 3–5 ноября 2008 г. – Минск, 2008. – С. 112–113.

16. Фадаиян, А. Р. Использование метода сдвоенных лазерных импульсов при различных углах падения на многоэлементную мишень для управления характеристиками приповерхностной плазмы в процессах ИЛНП / А. Р. Фадаиян, Е. С. Воропай, А. П. Зажогин // Проблемы инженерно-педагогического образования в Республики Беларусь : Материалы III междунар. научно-практ. конф., Минск, 23–24 октября 2008 г. / Мин-во обр., БНТУ ; редкол. : Б. М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2009. – С. 351–355.

17. Фадаиян, А. Р. Разработка методов контроля и целенаправленного изменения состава и характеристик приповерхностной лазерной плазмы алюминия при ИЛНП сдвоенными лазерными импульсами / А. Р. Фадаиян, М. П. Патапович, А. П. Зажогин // Проблемы инженерно-педагогического образования в Республики Беларусь : Материалы III междунар. научно-практ. конф., Минск, 23–24 октября 2008 г. / Мин-во обр., БНТУ; редкол. : Б. М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2009. – С. 356–359.

18. Фадаиян, А. Р. О роли предимпульса в процессах образования наночастиц и фракталов на поверхности стекла при абляции металлической мишени сдвоенными лазерными импульсами / А. Р. Фадаиян, А. П. Зажогин // Взаимодействие излучений с твердым телом (ВИГТ-2009) : материалы 8-й Междунар. конф., Минск, 23-25 сентября 2009 г. / Мин-во обр. РБ, [и др.] ; Редкол: В.М. Анищик [и др.]. – Минск : БГУ, 2009. – С. 278-280.

19. Фадаиян, А. Р. Процессы образования наночастиц и фракталов на поверхности стекла при абляции металлической мишени сдвоенными лазерными импульсами в воздушной атмосфере / А. Р. Фадаиян // Актуальные проблемы физики твердого тела – ФТТ – 2009 : сборник докладов Междунар. научн. конф., Минск, 20–23 октября 2009 г., в 3 т. / НАН Беларуси [и др.] ; редкол. Н. М. Олехнович [и др.]. – Минск : ИТТиП НАН Беларуси, 2009. – Т. 3. – С. 378–380.

20. Воропай, Е. С. Исследования влияния первого импульса на эффективность процессов пробивки металлов сдвоенными лазерными импульсами / Е. С. Воропай, А. П. Зажогин, А. Р. Фадаиян // Лазерная физика и оптические технологии: сб. науч. тр. VIII междунар. науч. конф., Минск, 27–30 сентября 2010 г. / НАН Беларуси [и др.]; редкол: В. А. Орлович [и др.]. – Минск, 2010. – С. 294–297.

21. Фадаиян, А. Р. Исследование влияния междуимпульсного интервала на эффективность процессов пробивки металлов сдвоенными лазерными импульсами / А. Р. Фадаиян, Лэ Тхи Ким Ань, А. П. Зажогин // Взаимодействие излучений с твердым телом (ВИТТ-2011) : материалы 9-й Междунар. конф., Минск, 20–22 сентября 2011 г. / Мин-во обр. РБ [и др.] ; редкол: В. М. Анищик [и др.]. – Минск: БГУ, 2011 – С. 86–88.

22. Чинь, Н. Х. Спектральный контроль и управление процессами образования оксидов алюминия в плазме при воздействии на алюминий сериями сдвоенных лазерных импульсов / Н. Х. Чинь, А. Р. Фадаиян, Е. С. Воропай // Взаимодействие излучений с твердым телом (ВИТТ-2011) : материалы 9-й Междунар. конф., Минск, 20–22 сентября 2011 г. / Мин-во обр. РБ [и др.] ; редкол: В. М. Анищик [и др.]. – Минск: БГУ, 2011 – С. 88–90.

23. Фадаиян, А. Р. Разработка методов контроля и изменения состава приповерхностной лазерной плазмы титана при воздействии сдвоенными лазерными импульсами / А. Р. Фадаиян, С. В. Проценко, А. П. Зажогин // Лазерная физика и оптические технологии: материалы IX междунар. науч. конф., Гродно, 30 мая–2 июня 2012 г.: в 2 ч. / НАН Беларуси [и др.] ; редкол.: С.А. Маскевич [и др.]. – Гродно, 2012. – Ч. 2 – С. 209–213.

24. Спектральные исследования процессов образования радикалов AlO в плазме при воздействии на оксидированный алюминий сериями сдвоенных лазерных импульсов / А. Р. Фадаиян, Е. С. Воропай, А. В. Арсенов, А. П. Зажогин // Лазерная физика и оптические технологии: материалы IX междунар. науч. конф., Гродно, 30 мая–2 июня 2012 г.: в 2 ч. / НАН Беларуси [и др.]; редкол.: С.А. Маскевич [и др.]. – Гродно, 2012. – Ч. 2 – С. 213–216.

25. Чинь, Н. Х. Исследование процессов образования наночастиц и фракталов оксидов цинка на поверхности стекла при напылении тонких пленок сдвоенными лазерными импульсами при атмосферном давлении воздуха / Н. Х. Чинь, А. Р. Фадаиян, А. П. Зажогин // II Всероссийская конференция по фотонике и информационной оптике : сб. науч. тр. , Москва, 23–25 января 2013 г. / Москва. НИЯУ МИФИ ; отв. ред. В. Г. Родин. – Москва, 2013. – С. 223–224.

26. Спектральные исследование процессов образования нитридов титана в плазме при воздействии на титан сериями сдвоенных лазерных импульсов / Е. С. Воропай, А. Р. Фадаиян, С. В. Проценко, А. П. Зажогин // Сборник научных трудов IV Конгресса физиков Беларуси, Минск 24–26 апреля 2013 г. – Минск, 2013. – С. 321–322.

27. Исследования процессов образования радикалов AlN в плазме от расфокусировки сдвоенных лазерных импульсов при воздействии их на оксидированный алюминий / С. В. Проценко, Альдигауи Хайдар Али Раи, А. Р. Фадаиян, Е. С. Воропай, А. П. Зажогин // IX Междунар. науч.-тех. конф.

"Квантовая электроника" : материалы, Минск, 18–21 ноября 2013 г. / Мин. обр. РБ [и др.] ; редкол. : М. М. Кугейко [и др.]. – Минск, 2013. – С. 220–221.

28. Исследования процессов образования радикалов АЮ в плазме от расфокусировки сдвоенных лазерных импульсов при воздействии их на оксидированный алюминий / С. В. Проценко, Альдигауи Хайдар Али Раи, А. Р. Фадаиян, Е. С. Воропай, А. П. Зажогин // IX Междунар. науч.-тех. конф. "Квантовая электроника": материалы, Минск, 18–21 ноября 2013 г. / Мин. обр. РБ [и др.] ; редкол. : М. М. Кугейко [и др.]. – Минск, 2013. – С. 222–223.

29. Исследование влияния между импульсного интервала на процессы образования наночастиц и фракталов оксидов свинца на поверхности стекла при напылении тонких пленок сдвоенными лазерными импульсами при атмосферном давлении воздуха / А. Р. Фадаиян, Альдигуи Хайдар Али Раи, Е. С. Воропай, А. П. Зажогин // III Всероссийская конференция по фотонике и информационной оптике : сб. науч. тр., Москва, 29–31 января 2014 г. / Москва. НИЯУ МИФИ ; отв. ред. В. Г. Родин. – Москва, 2014. – С. 243–244.

30. Спектральные исследования процессов образования радикалов АЮ и АIN в плазме от расфокусировки сдвоенных лазерных импульсов при воздействии их на алюминиевый сплав Д16Т в атмосфере воздуха / А. Р. Фадаиян, Ходор Баззал, Е. С. Воропай, А. П. Зажогин // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния : материалы III Междунар. науч.-прак. конф., Минск, 28–29 апреля 2015 г. / Мин-во обр. РБ, Науч.-ис. учр."ин-т прик. физ. проб. им. А. Н. Севченко" БГУ ; редкол.: В. И. Попечиц [и др.]. – Минск, 2015. – С. 111–114.

31. Воропай, Е. С. Спектральные исследования процессов при напылении тонких пленок оксидов цинка и меди из латуни на поверхность стекла сдвоенными лазерными импульсами при атмосферном давлении воздуха / Е. С. Воропай, А. Р. Фадаиян, Баззал Ходор // Микро- и нанотехнологии в электронике : материалы VII междунар. науч.-техн. конф., Нальчик, Россия, 1–6 июня 2015 г. / Мин-во обр. и науки РФ, Нальчик. Каб.-балк. универ. ; отв.ред. А. М. Кармоков. – Нальчик, 2015. – С. 180–182.

32. Исследование влияния междуимпульсного интервала на процессы образования наночастиц и фракталов оксидов олова при напылении тонких пленок на поверхность стекла сдвоенными лазерными импульсами в воздухе / Е. С. Воропай, А. Р. Фадаиян, Баззал Ходор, А. П. Зажогин // Микро- и нанотехнологии в электронике: материалы VII междунар. науч.-техн. конф., Нальчик, Россия, 1–6 июня 2015 г. / Мин-во обр. и науки РФ, Нальчик. Каб.-балк. универ. ; отв.ред. А. М. Кармоков. – Нальчик, 2015. – С. 197–199.

33. Воропай, Е. С. Исследование влияния расфокусировки на процессы образования радикалов АЮ в плазме при воздействии сдвоенных лазерных

импульсов на алюминий в атмосфере воздуха / Е. С. Воропай, А. Р. Фадаиян, Ходор Баззал // Микро- и нанотехнологии в электронике : материалы VII междунар. науч.-техн. конф., Нальчик, Россия, 30 мая–4 июня 2016 г. / Мин-во обр. и науки РФ, Нальчик. Каб.-балк. универ.; отв. ред. А. М. Кармоков. – Нальчик, 2016. – С.54–57.

34. Исследования процессов образования нитрида алюминия в плазме в зависимости от угла падения сдвоенных лазерных импульсов на алюминиевый сплав Д16Т в атмосфере воздуха / Х. Баззал, А. Р. Фадаиян, Е. С. Воропай, А. П. Зажогин // VI Международная конференция по фотонике и информационной оптике : сб. науч. тр., Москва, 1–3 февраля 2017 г. / Москва. НИЯУ МИФИ ; отв. ред. В. Г. Родин. – Москва, 2017. – С. 510–511.

35. Спектральные исследования процессов образования радикалов AlO и AlN в плазме при воздействии одиночных лазерных импульсов на алюминиевый сплав Д16Т в атмосфере воздуха / Ходор Баззал, А. Р. Фадаиян, Хунчжи Цинь, Е. С. Воропай, А. П. Зажогин // Материалы IV Международной научно-практической конференции «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния», Минск, 11–12 мая, 2017 г. – Минск, 2017. – С. 7–9.

36. Исследования процессов образования нитрида алюминия в плазме при воздействии серий сдвоенных лазерных импульсов на алюминиевый сплав Д16Т в атмосфере воздуха / Ходор Баззал, А. Р. Фадаиян, Е. С. Воропай, А. П. Зажогин // Взаимодействие излучений с твердым телом (ВИТТ-2017) : материалы 12-й Междунар. конф., Минск, 19–22 сентября 2017 г. / Мин-во обр. РБ [и др.] ; редкол. : В. М. Анищик [и др.]. – Минск: БГУ, 2017. – С. 33–35.

37. О влиянии формы канала на процессы образования AlN при воздействии на алюминий серий последовательных сдвоенных лазерных импульсов / Ходор Баззал, А. Р. Фадаиян, Е. С. Воропай, А. П. Зажогин // "Квантовая электроника" : материалы XI международной научно-технической конференции, Минск, 13–17 ноября 2017 г. / Мин. Обр. РБ [и др.] ; редкол. : М. М. Кугейко [и др.]. – Минск: РИВШ, 2017. – С. 212–213.

РЕЗЮМЕ**Фадаиян Ахмадреза Голамали****Процессы образования нитрида алюминия в плазме при воздействии на алюминий сериями сдвоенных лазерных импульсов в атмосфере воздуха**

Ключевые слова: лазерная атомно-эмиссионная спектрометрия, сдвоенные лазерные импульсы, нитрид алюминия, оксид алюминия.

Цель работы: показать возможность и определить условия получения нитрида алюминия в лазерной плазме методом абляции алюминиевых мишеней сериями сдвоенных лазерных импульсов в воздушной атмосфере для использования его в технологии получения нанокристаллов и напылении тонких пленок.

Методы исследования: лазерная атомно-эмиссионная спектрометрия, лазерное абляционное воздействие.

Полученные результаты и их новизна. Установлено, что воздействие последовательности серий сдвоенных лазерных импульсов, сдвинутых относительно друг друга на 5–12 мкс, на поверхность алюминиевой мишени, обеспечивает увеличение в сотни раз количества ионов алюминия и азота в лазерной плазме по сравнению с нулевым интервалом и позволяет создать условия для образования и одновременного спектрального определения нитридов и субоксидов алюминия в атмосфере воздуха.

Найдено, что увеличение числа импульсов в серии до 40 обеспечивает рост концентрации AlN и AlO за счет сверхзвукового расширения и турбулентного перемешивания газа, содержащего ионы алюминия и азота на выходе из формирующегося импульсного сопла длиной ≈ 200 – 300 мкм и диаметром ≈ 100 мкм.

Определены оптимальные параметры возбуждающих импульсов при эффективной расфокусировке и угле падения излучения на мишень, обеспечивающие увеличение количества наноконплексов нитрида алюминия в лазерном факеле на 10–15 % по сравнению с воздействием сфокусированными импульсами.

Выявлено, что получение путем предварительного оксидирования плотных пленок на поверхности алюминия повышает на 10–20 % образование нитрида алюминия в лазерном факеле по сравнению с более тонкими или пористыми пленками.

Область применения: лазерная физика, получение нанопорошков и пленок нитридов металлов методом лазерной абляции для создания на их основе оптоэлектронных и других электронных приборов.

РЭЗІЮМЭ**Фадаіян Ахмадрэза Галамалі****Працэсы ўтварэння нітрыда алюмінія ў плазме пры ўздзеянні на
алюміній серыямі падвоеных лазерных імпульсаў
ў атмасферы паветра**

Ключавыя словы: лазерная атамна-эмісійная спектраметрыя, падвоеныя лазерныя імпульсы, нітрыд алюмінія, аксід алюмінія.

Мэта даследавання: вызначэнне магчымасці і умоў атрымання *AlN* ў лазернай плазме метадам абляцыі алюмініевых мішэняў серыямі здвоеных лазерных імпульсаў у паветранай атмасферы дзеля выкарыстання яго ў тэхналогіі атрымання нанакрышталаў і напылення тонкіх плёнак.

Метады даследавання: лазерная атамна-эмісійная спектраметрыя, абляцыйнае ўздзеянне.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: Устаноўлена, што ўздзеянне паслядоўнасці серый падвоеных лазерных імпульсаў, зруханных адносна адзін аднаго ў часе на 5–12 мкс, на паверхню алюмініевай мішэні, забяспечвае павялічэнне ў сотні разоў колькасці іонаў алюмінія і азота ў лазернай плазме ў параўнанні з нулявым інтэрвалам і дазваляе ствараць умовы дзеля ўтварэння і адначасовага спектральнага вызначэння нітрыдаў і субаксідаў алюмінія ў атмасферны паветра.

Выяўлена, што павялічэнне колькасці імпульсаў у серыі да 40 забяспечвае рост канцэнтрацыі *AlN* і *AlO* за кошт звышгукавога пашырэння і турбулентнага перамешвання газу з іёнамі алюмінія і азоту на выхадзе з створанага імпульснага сопла даўжынёй $\approx 200\text{--}300$ мкм і дыяметрам ≈ 100 мкм.

Акрэслены аптымальныя параметры ўзбуджальных імпульсаў пры эфектыўнай расфакусоўцы і вугле падзення выпраменьвання на мішэнь, што абумаўляе перавагу ўтварэння нанакмлексаў нітрыда алюмінія ў лазерным факеле на 10–15 % ў параўнанні з уздзеяннем сфакусаванымі імпульсамі.

Вызначана, што атрыманне пуцём папярэдняга аксідавання на паверхні алюмінія шчыльнай пленкі павялічвае на 10–20 % ўтварэнне нітрыду алюмінія ў лазерным факеле ў параўнанні з больш тонкімі ці сітаватымі пленкамі.

Вобласць прымянення: лазерная фізіка, практычнае атрыманне нанопарашкоў і плёнак нітрыдаў металаў метадам лазернай абляцыі дзеля стварэння на іх аснове оптаэлектронных і іншых электронных прыбораў.

SUMMARY**Fadaeian Ahmadreza****Aluminum nitride formation processes in the plasma when aluminum is subjected to the effect of a series of double laser pulses in the air**

Key words: laser atomic-emission spectrometry, double laser pulses, aluminum nitride, aluminum oxide.

Purpose of the work: to demonstrate the possibility and to establish the conditions for the production of *AlN* in the laser plasma by ablation of aluminum targets, using series of double laser pulses in the air applicable in the technologies associated with the formation of nanocrystals and with thin film deposition.

Research methods: laser atomic-emission spectrometry, laser ablation treatment.

Obtained results and their novelty. It has been found that the effect of a series of double laser pulses, with the 5–12 μs interval between them, on the surface of a metal target leads to the increased numbers of aluminum and nitrogen ions in the laser plasma – hundreds of times higher than in the case of the zero interval, making it possible to realize simultaneous formation and spectral detection of aluminum nitrides and suboxides in the air.

It has been established that an increase in the number of pulses in a series up to 40 pulses results in growth of the concentration of *AlN* and *AlO* forming due to supersonic expansion and turbulent mixing of the gas containing aluminum and nitrogen ions at the output of the formed pulse nozzle $\approx 200\text{--}300\ \mu\text{m}$ in length and $\approx 100\ \mu\text{m}$ in diameter.

The optimum parameters of the exciting pulses are determined for effective defocusing and the angle of incidence of the radiation on the target, which provide a 10–15% increase in the number of aluminum nitride nanocomplexes in the laser flame as compared to the action of focused pulses.

It was found that the production of dense films on the aluminum surface by preliminary oxidation increases the formation of aluminum nitride in a laser torch by 10–20%, compared with thinner or porous films.

Scope: laser physics, production of nanopowders and films of metal nitrides by laser ablation to create on their basis optoelectronic and other electronic devices.