

На правах рукописи
УДК 541.182.3

Платонов Вячеслав Владимирович

**Исследование процессов получения наночастиц при помощи
излучения импульсно-периодического CO₂ лазера.**

01.04.13 - “Электрофизика, электрофизические установки”

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Екатеринбург - 2008

Работа выполнена в Институте электрофизики
Уральского отделения Российской академии наук

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор
Осипов Владимир Васильевич

Официальные оппоненты:

доктор химических наук, профессор
Кононенко Владимир Иванович

доктор физико-математических наук
Никулин Сергей Павлович

Ведущая организация:

ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет -УПИ»
(УГТУ-УПИ)

Защита состоится «20» января 2009г. в 15 час. 00 мин. на заседании
диссертационного совета D 200.024.01 в Институте электрофизики УрО РАН по
адресу: 620016 , г. Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 106.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института электрофизики
УрО РАН

Автореферат разослан «28» ноября 2008г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.ф.-м.н.

Сюткин Н.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

В последнее время неуклонно растет интерес к созданию высокоплотных керамик с малыми размерами кристаллитов и малой толщиной межзеренных границ. Такие керамики представляют значительный интерес для создания активных элементов твердотельных лазеров Nd:Y₂O₃ и Nd:YAG [1, 2], сцинтилляторов, керамических твердых электролитов основе ZrO₂ - Y₂O₃ (YSZ), ZrO₂ - Sc₂O₃, CeO₂ – Gd₂O₃ (Ce_{1-x}Gd_xO_{2-δ}) [3, 4, 5]. Основой для создания таких керамик являются нанопорошки сложных оксидов, которые должны состоять из слабоагломерированных частиц с узким распределением по размерам и малым средним размером. В случае оптической керамики, нанопорошки должны быть химически чистыми. Кроме того, технология получения наночастиц должна обеспечивать получение химически чистых нанопорошков в количествах достаточных для проведения исследований и опытно-конструкторских разработок (~1кг). Таким образом, в настоящее время есть насущная необходимость развития метода получения нанопорошков с вышеназванными свойствами.

Анализ методов получения наночастиц показал, что в наибольшей степени этими качествами обладают нанопорошки, полученные лазерным методом, который заключается в испарении твердого вещества лазерным излучением и в последующей конденсации паров в потоке несущего газа.

Впервые конкурентноспособность лазерного метода была продемонстрирована в работах немецких ученых под руководством Мюллера [6, 7], которые использовали мощный непрерывный CO₂-лазер для получения с высокой производительностью наночастиц Al₂O₃, ZrO₂, ZrO₂:MgO, ZrO₂:CaO, ZrO₂:Y₂O₃. При мощности излучения ≈4кВт и плотности мощности на мишени 4·10⁵Вт/см² они получили нанопорошки ZrO₂ с производительностью до 130г/час, которые содержали слабоагломерированные сферические наночастицы со средним размером d_{ВЕТ}≈60нм. Однако в непрерывном режиме лазерного излучения достаточно большими оказываются потери энергии на нагрев мишени [8]. Переход к импульсно-периодическому режиму излучения за счет модуляции добротности резонатора непрерывного CO₂-лазера позволил их снизить. При средней мощности излучения 500Вт (t_и=45мкс) производительность получения наночастиц ZrO₂ увеличилась до 7г/час, что вдвое выше, чем в непрерывном режиме с той же мощностью излучения. При этом средний размер наночастиц d_{ВЕТ} уменьшился до 20нм. Однако в режиме модуляции добротности резонатора КПД лазера и максимальная средняя мощность излучения снизились в 4 раза. Поэтому общие удельные затраты электроэнергии при получении нанопорошка только увеличились, что сделало нецелесообразным применение CO₂-лазера с модулированием добротности резонатора для наработки наночастиц.

В полной мере реализовать преимущества использования импульсного режима испарения мишени можно только с помощью мощного импульсно-периодического CO_2 -лазера с высоким КПД. Остались неисследованными фракционный состав получаемых с помощью импульсно-периодического CO_2 -лазера нанопорошков, зависимость среднего размера наночастиц от материала мишени и условий синтеза, динамика и характеристики лазерного факела, возникающего при испарении оксидных мишеней в атмосфере буферного газа.

Таким образом, исследование метода получения нанопорошков оксидов с помощью мощного импульсно-периодического CO_2 -лазера, имеющего высокий КПД, является актуальной научно-исследовательской задачей.

Цель работы. Исследовать особенности получения нанопорошков с помощью излучения импульсно-периодического CO_2 -лазера, их основные характеристики и характеристики лазерного факела, в котором образуются наночастицы.

Для достижения поставленной цели решались следующие основные задачи:

1. установить влияние энергетических параметров мощного импульсно-периодического лазерного излучения $\lambda=10,6\text{мкм}$, формы импульса на производительность синтеза наночастиц;
2. определить фракционный состав получаемых нанопорошков;
3. выявить влияние химического состава мишени, давления буферного газа и скорости его прокачки через испарительную камеру на распределение наночастиц по размерам;
4. изучить динамику и спектральные характеристики лазерного факела;
5. исследовать динамику плавления мишени в зависимости от формы импульса лазерного излучения.

Научная новизна.

1. Впервые предложено использование для получения оксидных наночастиц газозольным способом мощного импульсно-периодического CO_2 -лазера с высоким КПД (~8%). При получении нанопорошков тугоплавких оксидов (типа ZrO_2) это позволило при одинаковой средней мощности излучения (~500Вт) снизить затраты электроэнергии до 0,9(кВт·г)/час, что в два раза меньше, чем при использовании непрерывного CO_2 -лазера и в четыре раза меньше, чем в случае CO_2 -лазера с модуляцией добротности резонатора.

2. В импульсно-периодическом режиме испарения удельная поверхность нанопорошка YSZ не зависит от энергии и пиковой мощности лазерного импульса (в диапазонах 0,2÷1,2Дж и 0,5÷2МВт/см², соответственно).

Впервые было показано, что при атмосферном давлении воздуха в испарительной камере и неизменной скорости его прокачки над поверхностью мишени средний размер наночастиц YSZ и $\text{Ce}_{1-x}\text{Gd}_x\text{O}_{2-\delta}$, $\text{Nd:Y}_2\text{O}_3$ оказывается почти одинаковым и равным 10÷14нм. В то же время, средний размер наночастиц уменьшается с ростом скорости прокачки газа над поверхностью

мишени. Впервые показано, что наиболее эффективным способом увеличения среднего размера наночастиц (типа $\text{Nd:Y}_2\text{O}_3$) является создание избыточного, по сравнению с атмосферным, давления воздуха в испарительной камере. Причиной наблюдаемых зависимостей размеров наночастиц от условий синтеза является то, что давление и концентрация пара в лазерном факеле перед началом конденсации определяется давлением воздуха, а скорость его прокачки влияет на скорость охлаждения паров.

3. Показано, что изменение химического состава нанопорошков по сравнению с веществом мишени зависит от плотности пиковой мощности лазерного излучения на мишени.

4. Показано, что испарение мишеней из простых или сложных оксидов происходит в виде радикалов (типа YO , ZrO), а образование наночастиц в лазерном факеле при его разлете в атмосферный воздух начинается на расстоянии нескольких миллиметров от мишени и сопровождается интенсивным турбулентным перемешиванием пара и наночастиц с воздухом.

5. Установлено, что крупные осколки, имеющиеся в нанопорошке, образуются в момент кристаллизации остывающего расплава в кратере после окончания испарения мишени импульсом лазерного излучения.

Практическая ценность работы.

Результаты, полученные в ходе работы, могут быть полезны при дальнейшем развитии лазерного метода получения наночастиц с контролируемым распределением их по размерам:

- при проектировании установки для получения нанопорошков с замкнутым газовым контуром, которая позволит получать нанопорошки в атмосфере различных газов (в первую очередь в гелии, аргоне или воздухе) давлением как выше, так и ниже атмосферного;
- при выборе источника мощного лазерного излучения.

Результаты, полученные при исследовании разлета лазерного факела, помогут быть полезны при создании теоретической модели лазерного факела, которая будет предсказывать характеристики получаемых наночастиц в зависимости от условий их синтеза.

Апробация работы.

Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях:

International Conference on LASERS'2001, Tucson, Arizona, USA, December 3-7, 2001; The XIV International Symposium on Gas Flow & Chemical Lasers and High Power Laser Conference, Wroclaw, Poland, August 26-30, 2002; International Conference on NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES NN'2003, Crete, Greece, August 30 – September 6, 2003; The VI International Conference on Atomic and Molecular Pulsed Lasers AMPL'2003, Tomsk, Russia, September 15-19, 2003; XIX Международная конференция "Уравнения состояния вещества",

Эльбрус, 11-17 марта 2004; Great Lakes Photonics Symposium, Cleveland, OH, USA, June 7-11, 2004; Great Lakes Photonics Symposium, Cleveland, OH, USA, June 7-11, 2004; Advanced Laser Technologies ALT'04, Rome and Frascati, Italy, Sept. 10-15, 2004; International Conference on Coherent and Nonlinear Optics & International Conference on Lasers, Applications and Technologies (ICONO/LAT 2005), St. Petersburg, Russia, May 11-15, 2005; 12th International Symposium on Metastable and Nano Materials (ISMANAM). Paris, France, 3-7 July 2005; The 13th International Conference on Advanced Laser Technologies ALT'05, Tianjin, China, Sept. 3-6, 2005; The VII International Conference on Atomic and Molecular Pulsed Lasers AMPL'2005, Tomsk, Russia, September 12-16, 2005; XX Международная конференция "Воздействие интенсивных потоков энергии на вещество", Эльбрус, 1-6 марта 2005; 11th International Ceramic Congress, 4th Forum on New Materials. Acireale, Sicily, Italy, June 4-9 2006; International Conference on Advanced Laser Technologies ALT'06, Brasov, Romania, Sept. 8-12, 2006; 3-я Международная конференция по физике кристаллов «Кристаллофизика 21-го века», Москва, 20-26 ноября 2006; The 8th International Conference "Atomic and Molecular Pulsed Lasers" AMPL'2007, Tomsk, Russia, September 10-14, 2007; 3rd Laser Ceramics Symposium: International Symposium on transparent Ceramics for photonic applications, Paris, France, October 8-10, 2007; VIII International conference Atomic and molecular pulsed laser, Tomsk, Russia, 10-14 september, 2007.

Личный вклад автора.

Автор работы провел модернизацию электрической схемы накачки импульсно-периодического CO₂-лазера, накачиваемого комбинированным разрядом, с целью обеспечения надежной его работы при получении нанопорошков, руководил проведением экспериментов по исследованию динамики разлета лазерного факела в воздух и экспериментами по исследованию влияния различных параметров на размеры наночастиц и производительность их получения. Кроме того, он принимал активное участие в обсуждениях и анализе экспериментальных данных, подготовке рукописей статей, в опытно-конструкторских разработках узлов установки для получения нанопорошков. Спектральные исследования лазерного факела проводились совместно с Кайгородовой О.А. Первоначально эксперименты по получению нанопорошков YSZ и Ce_{1-x}Gd_x O_{2-δ} проводились совместно с сотрудниками лаборатории импульсных процессов ИЭФ УрО РАН, в ходе которых, в частности, был выполнен седиментационный анализ нанопорошков и установлено наличие в них частиц трех видов.

Защищаемые положения.

1. Использование для получения наночастиц импульсно-периодического CO₂ лазера, накачиваемого комбинированным разрядом, позволяет при равных

средних мощностях излучения уменьшить затраты электрической энергии за счет снижения потерь лазерного излучения на нагрев мишени по сравнению с непрерывным CO₂ лазером, а также за счет более высокого КПД лазера, чем в случае CO₂-лазера с модуляцией добротности резонатора.

2. Полученные с помощью импульсно-периодического CO₂ лазера в атмосферном воздухе нанопорошки оксидов кроме образующихся при конденсации пара наночастиц с размерами 2-40нм и разбрызганных из кратера капель расплава с размерами 0,2÷2мкм, также содержат в себе бесформенные осколки мишени размерами 1÷50мкм, которые образуются после окончания испарения мишени при растрескивании кристаллизующегося расплава в лазерном кратере.

3. Средний размер наночастиц не зависит от химического состава мишени, энергии и плотности пиковой мощности лазерного импульса (в диапазонах 0,2÷1,2Дж и 0,5÷2МВт/см², соответственно), а определяется параметрами потока несущего газа, в котором происходит образование наночастиц в результате конденсации паров.

4. Под действием излучения CO₂-лазера мишень из простых или сложных оксидов испаряется в виде радикалов (типа YO, ZrO), излучательная релаксация которых обеспечивает свечение видимой области лазерного факела, имеющей форму столба.

5. В процессе разлета пары, имеющие вблизи устья кратера температуру приблизительно равную температуре кипения мишени, охлаждаются. Однако на расстоянии нескольких миллиметров от поверхности мишени этот процесс задерживается выделением энергии сублимации на начальном этапе конденсации пара, а окончательное образование наночастиц происходит в вихревых облаках, которые формируются при турбулентном перемешивании пара с воздухом.

Публикации.

Основные результаты работы опубликованы в 16 статьях в российских и зарубежных журналах [1-16] и в 19 сборников трудов конференций [17-35].

Структура и объем работы.

Диссертационная работа изложена на 113 страницах машинописного текста, иллюстрируется 38 рисунками, 5 таблицами и состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 85 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследований, их научная новизна и практическая значимость, защищаемые положения.

Первая глава содержит в себе детальный обзор научной литературы, в котором рассматривается современное состояние дел по теме диссертационной работы и обосновывается ее актуальность.

Показано, что в настоящее время существует необходимость развития методов получения различных оксидных нанопорошков, которые применяются в качестве сырья для изготовления твердых электролитов на основе $ZrO_2 - Y_2O_3$ (YSZ), $ZrO_2 - Sc_2O_3$, $CeO_2 - Gd_2O_3$ ($Ce_{1-x}Gd_xO_{2-\delta}$) [3, 4, 5], а также керамических активных элементов твердотельных лазеров $Nd:Y_2O_3$ и $Nd:YAG$ [1, 2]. Сформулированы предъявляемые к этим порошкам требования (слабая агломерация частиц, малый средний размер частиц и узкое распределение их по размерам), а также требования к методу синтеза наночастиц: сравнительно высокая производительность, возможность получения наночастиц сложных оксидов с заданным химическим составом и не содержащих посторонние примеси.

Проведен анализ существующих методов получения нанопорошков. Широко распространенные методы осаждения из коллоидных растворов позволяют получать нанопорошки с наибольшей производительностью, но получаемые наночастицы являются сильно агломерированными [9], вследствие необходимости их прокаливания для удаления продуктов химических реакций. При смене материала наночастиц необходимо каждый раз подбирать технологию и исходные реагенты. Этим недостатком лишены газофазные методы получения нанопорошков, суть которых заключается в испарении вещества нужного химического состава и последующей конденсации паров в буферном газе. В результате получаются слабоагломерированные наночастицы как правило сферической формы [9]. Наиболее перспективными способами испарения исходных материалов являются электрический взрыв проводников, электронные пучки и лазерное излучение.

Существенным ограничением метода электрического взрыва проволочек, с помощью которого получают металлические, оксидные и нитридные нанопорошки, является то, что не все материалы имеются в виде проводящей электрический ток проволоки. Электронные пучки обладают радиационной опасностью, а их применение для испарения тугоплавких материалов требует больших затрат электроэнергии, вследствие очень больших потерь энергии электронного пучка из-за объемного характера его поглощения твердыми веществами. Этим недостатком лишен метод испарения твердой мишени излучением мощного CO_2 -лазера.

Впервые конкурентноспособность лазерного метода была продемонстрирована в работах [6, 7], в которых для получения наночастиц Al_2O_3 , ZrO_2 , $ZrO_2:MgO$, $ZrO_2:CaO$, $ZrO_2:Y_2O_3$ использовался мощный непрерывный CO_2 -лазер. При мощности излучения ≈ 4 кВт и плотности

мощности на мишени $4 \cdot 10^5 \text{Вт/см}^2$ производительность получения нанопорошка ZrO_2 , содержащего слабоагломерированные сферические наночастицы со средним размером $d_{\text{ВЕТ}} \approx 60 \text{нм}$, достигла 130г/час . Для того, чтобы уменьшить потери энергии лазерного излучения, авторы [7] перешли к импульсно-периодическому режиму испарения за счет модуляции добротности резонатора непрерывного CO_2 -лазера. При средней мощности излучения 500Вт и длительности импульса 45мкс производительность наработки нанопорошка ZrO_2 оказалась равной 7г/час , что вдвое выше, чем в непрерывном режиме с той же мощностью излучения. При этом средний размер наночастиц $d_{\text{ВЕТ}}$ уменьшился до 20нм . Однако в импульсно-периодическом режиме излучения КПД лазера и максимальная средняя мощность излучения снизились в ≈ 4 раза, по сравнению с непрерывным режимом. Поэтому общие удельные затраты электрической энергии при получении нанопорошка только увеличились, что сделало нецелесообразным применение CO_2 -лазера с модулированием добротности резонатора в целях получения наночастиц.

В полной мере реализовать преимущества использования импульсного режима испарения мишени можно только с помощью импульсно-периодического CO_2 -лазера с высоким КПД и большой средней мощностью излучения. Кроме того, до сих пор не исследовалось развитие лазерного факела при синтезе оксидных наночастиц с помощью импульсно-периодического CO_2 -лазера, а также влияние условий синтеза на характеристики наночастиц.

На основании вышеизложенного были сформулированы задачи настоящего исследования.

Во второй главе описаны экспериментальная аппаратура и средства измерений. Для получения наночастиц использовался разработанный в лаборатории квантовой электроники ИЭФ УрО РАН накачиваемый комбинированным разрядом импульсно-периодический CO_2 -лазер «ЛАЭРТ», который обладает следующими характеристиками:

Средняя мощность излучения _____ до 800Вт
Пиковая мощность излучения _____ до 11кВт
Энергия импульса излучения _____ до $1,3 \text{Дж}$
Частота следования импульсов _____ до 800Гц
Апертура лазерного пучка _____ $20 \times 30 \text{мм}$
КПД _____ 8%

Отличительной особенностью этого лазера является применение комбинированного объемного газового разряда для создания и накачки активной среды. При комбинированном разряде в межэлектродном промежутке сначала возбуждается самостоятельный объемный разряд малой длительности ($\sim 10^{-7} \text{нс}$), который создает активную среду лазера, а затем в течение несамостоятельного объемного разряда длительностью несколько сот микросекунд при оптимальном для возбуждения колебательных степеней свободы молекулы CO_2 параметре $E/N \sim 2 \cdot 10^{-16} \text{В} \cdot \text{см}^2$ [10] осуществляется

накачка активной среды. На создание плазмы при самостоятельном разряде расходуется только малая часть ($\approx 2\%$) энергии комбинированного разряда.

При таком способе возбуждения CO_2 -лазера главной технической проблемой является «развязка» цепей питания самостоятельного и несамостоятельного разрядов. Первоначально в данном лазере для этой цели использовалась сборка из 20 параллельно включенных диодов КЦ201Е, которые выходили из строя через 50÷100 работы лазера. Для повышения надежности работы лазера впервые было предложено использовать в качестве элемента электрической «развязки» магнитный ключ. В ненасыщенном состоянии сердечника магнитный ключ обладает большой индуктивностью и эффективно препятствует утечке тока самостоятельного разряда через цепи питания несамостоятельного разряда. После окончания самостоятельного разряда магнитный ключ за короткое время переходит в насыщенное состояние с низкой индуктивностью и почти не ограничивает ток несамостоятельного разряда. За все время работы лазера (≈ 1000 часов) магнитный ключ ни разу не выходил из строя.

Концентрация электронов в плазме несамостоятельного разряда из-за процессов рекомбинации и прилипания экспоненциально снижается при давлении ~ 60 торр в течение нескольких сот микросекунд. Кроме того, время столкновительного разрушения верхнего лазерного уровня молекулы CO_2 00^0_1 составляет $\sim 10^{-4}$ с. Ранее это позволило увеличить энергию накачки и пиковую мощность импульса лазерного излучения за счет использования пакетного режима накачки лазера и оптимальным количеством импульсов самостоятельного разряда в пакете оказалось равным 2.

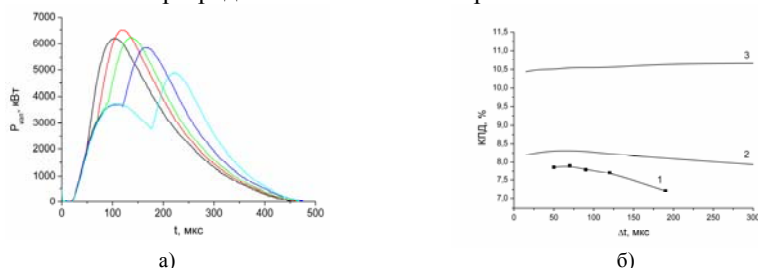


Рис.1. Изменение формы импульса излучения CO_2 -лазера «ЛАЭРТ» (эксперимент) при варьировании интервала между моментами инициирования самостоятельного разряда в пакете (а) и зависимость КПД CO_2 -лазера (б) от интервала между самостоятельными разрядами в пакете (1 – эксперимент, 2 - расчет, 3 – расчет без учета процессов VT-релаксации). Везде начальное зарядное напряжение на накопительной емкости несамостоятельного разряда 1950В.

Для дальнейшей оптимизации пакетного режима накачки лазера в настоящей работе было исследовано влияние временного интервала Δt между самостоятельными разрядами в пакете на энергетические характеристики лазерного излучения. Было экспериментально обнаружено, что пиковая мощность лазерного импульса увеличивается с уменьшением интервала Δt с

200мкс до 70мкс, т.к. второй импульс накачки в пакете приходится на плазму с все большей степенью ионизации (рис.1а). Однако при дальнейшем уменьшении Δt пиковая мощность лазерного импульса снижается из-за уменьшения энергии накачки в первом импульсе. Очевидно, что интервал $\Delta t=70\text{мкс}$, при котором достигается максимальная пиковая мощность излучения, является наиболее оптимальным.

Аналогичным образом ведет себя и экспериментально найденная зависимость КПД лазера от интервала между самостоятельными разрядами в пакете (рис.1б, кривая 1). Однако спад КПД при $\Delta t > 70\text{мкс}$ здесь связан с увеличением тепловых потерь энергии накачки за счет VT-релаксации возбужденных колебательных уровней молекул N_2 , CO , и CO_2 , что подтверждается данными оценочного расчета процессов накачки активной среды лазера и генерации излучения. Для этого решалась система дифференциальных кинетических уравнений, которая учитывала возбуждение прямым электронным ударом колебательных уровней $\text{N}_2(v=1)$ $\text{CO}(v=1)$, верхнего лазерного уровня 00^0_1 молекулы CO_2 , а также процессы VT-релаксации и VV-обмена при столкновениях молекул друг с другом и с атомами He. Теоретическая зависимость КПД лазера от Δt качественно совпадает с экспериментальными данными (рис.1б, кривая 2). Если при расчете процессы VT-релаксации не учитывать, то с увеличением интервала между импульсами самостоятельного разряда в пакете с 15мкс до 300мкс КПД все время слабо увеличивается (рис.1б, кривая 3), что объясняется увеличением энергии накачки лазера из-за уменьшения перекрытия первого и второго импульсов в пакете.

Также в этой главе описаны экспериментальная установка для получения нанопорошков, стенды для исследования разлета лазерного факела методом скоростной киносъемки и теневого фотографирования, а также перечислены средства измерения характеристик нанопорошков.

В третьей главе приводятся результаты исследований фракционного состава нанопорошков, а также влияния условий синтеза на размеры наночастиц YSZ , $\text{Ce}_{1-x}\text{Gd}_x\text{O}_{2-\delta}$, $\text{Nd}^{3+}:\text{Y}_2\text{O}_3$ и производительность установки.

Производительность получения нанопорошка определяется удельной энергией испарения вещества и энергетическими характеристиками лазерного луча. При увеличении средней мощности лазерного излучения и сохранении формы импульса лазерного излучения и частоты их следования производительность получения нанопорошков линейно увеличивается (рис.2). При средней мощности излучения 500Вт производительность получения нанопорошка YSZ достигла величины $\approx 20\text{г/час}$, а при испарении более легкоплавкого CeGdO - 70г/час . Это обусловило удельные затраты электроэнергии при получении этих порошков $\approx 300(\text{Вт}\cdot\text{час})/\text{г}$ и $\approx 90(\text{Вт}\cdot\text{час})/\text{г}$, соответственно. Производительность получения нанопорошка чистого оксида циркония при средней мощности излучения 500Вт составила величину 7г/час . При этом удельные затраты электроэнергии оказались равными $\approx 0,9(\text{кВт}\cdot\text{час})/\text{г}$, что в два раза меньше, чем при испарении ZrO_2 излучением непрерывного CO_2 -

лазера и в 4 раза меньше, чем в случае использования импульсно-периодического CO₂-лазера с модулированием добротности резонатора при равных средних мощностях излучения [7].

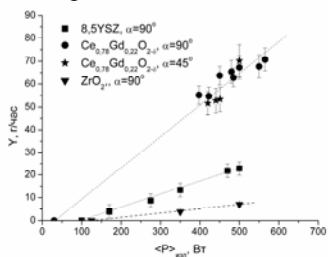
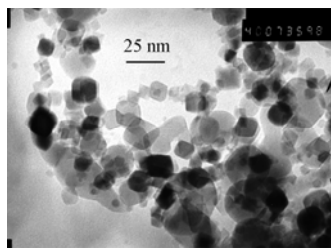


Рис.2 Зависимость производительности получения из различных нанопорошков от средней мощности лазерного излучения при частоте следования импульсов 500Гц

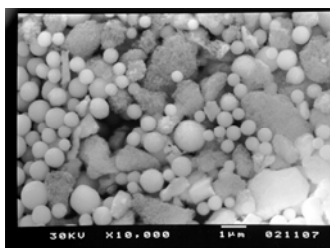
92÷97%. Выпадающая в осадок фракция содержит в себе сферические частицы с размерами 0,2÷2мкм и осколки мишени неправильной формы с размерами 1÷50мкм. Механизм образования сферических частиц общеизвестен и заключается в разбрызгивании жидкого расплава из образующегося кратера давлением пара. Бесформенные частицы являются осколками оплавленного слоя мишени. Однако до сих пор оставались неясными причины и момент их образования, что будет исследоваться в настоящей работе далее.

Удивительно, что в результате испарения мишеней из материалов с различными теплофизическими свойствами (Nd:Y₂O₃, YSZ и Ce_{0,78}Gd_{0,22}O_{2-δ}) в условиях атмосферного давления воздуха в испарительной камере и одинаковой скорости его прокачки образуются наночастицы с практически одинаковыми распределениями по размерам (рис. 4а). Их средний размер оказался равным 10÷14нм. Для объяснения этого факта был произведен оценочный расчет размеров, образующихся при испарении этих материалов наночастиц с помощью подхода, основанного на теории квазихимической конденсации [11, 12]. Полученные при расчете функции распределения по размерам наночастиц из этих материалов, также как и в эксперименте, хорошо совпадают друг с другом (рис.4б). Это объясняется тем, что к моменту начала конденсации давление в лазерном факеле выравнивается с давлением воздуха в испарительной камере и, несмотря на различные свойства материалов мишеней, концентрации паров оказываются примерно одинаковыми. Значительное превышение среднего размера наночастиц, полученное в результате расчета, над реальным значением обусловлено оценочным характером модели, а также пренебрежением прокачкой воздуха над поверхностью мишени, что, как известно, ускоряет охлаждение и конденсацию паров.

В целях исследования фракционного состава, полученные при атмосферном давлении воздуха в испарительной камере, нанопорошки YSZ и Ce_{1-x}Gd_xO_{2-δ} были подвергнуты седиментации в изопропиловом спирте. Было обнаружено, что нанопорошок разделяется на две фракции (рис.3). Первая фракция содержит в себе частицы с размерами менее 40нм ограненной (Ce_{1-x}Gd_xO_{2-δ}) или сферической (YSZ) формы. Весовая доля этой фракции в нанопорошке составляет

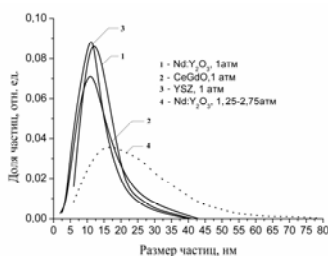


А)

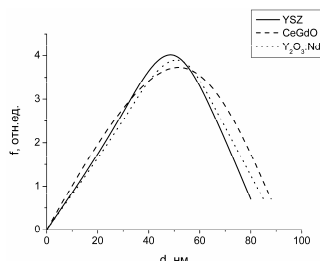


б)

Рис.3 Фотографии частиц различных фракций разделенных в процессе седиментации нанопорошков $\text{Ce}_{0,78}\text{Gd}_{0,22}\text{O}_{2,6}$: наночастиц (а) и крупных тяжелых частиц выпавших в осадок (б).



А)



б)

Рис.4 Распределения по размерам наночастиц из различных материалов полученные в эксперименте при давлениях воздуха $p=1\text{атм}$ и $p=1,25\div 2,75$ (а) и в расчете при давлении воздуха $p=1\text{атм}$ (б).

Дальнейшие исследования показали, что удельная поверхность наночастиц из YSZ не зависит от энергии импульса лазерного излучения и от пиковой мощности (в диапазонах $0,2\div 1,2\text{Дж}$ и $0,5\div 2\text{МВт/см}^2$, соответственно) и равна $63\pm 3\text{м}^2/\text{г}$. Это также является следствием того, что давление пара перед началом конденсации выравнивается с давлением воздуха в испарительной камере. Поэтому увеличение массы испаренного вещества с ростом энергии лазерного импульса приводит только к увеличению объема лазерного факела без изменения концентрации пара в нем. При давлении воздуха в испарительной камере выше атмосферного объема лазерного факела визуально уменьшается, а концентрация пара в нем увеличивается. Это является причиной смещения центра тяжести распределения наночастиц по размерам в нанопорошке $\text{Nd:Y}_2\text{O}_3$, который был получен в условиях плавно меняющегося давления воздуха в испарительной камере с $1,25\text{атм}$ до $2,75\text{атм}$ (рис.4, кривая4). В этом случае средний размер наночастиц оказался равным 24нм , что в два раза больше, чем в случае атмосферного давления воздуха.

Другим параметром, от которого зависят размеры наночастиц, является скорость прокачки воздуха над поверхностью мишени, т.к. прокачка холодного по сравнению с лазерной плазмой воздуха через область ее конденсации способствует быстрому переохлаждению паров и увеличение ее скорости

должно привести к уменьшению среднего размера наночастиц. Эти соображения подтвердились при получении нанопорошка YSZ в условиях атмосферного давления воздуха в испарительной камере. С ростом скорости прокачки воздуха от 2м/с до 20м/с удельная поверхность этого нанопорошка линейно увеличивалась с 44м²/г до 72м²/г, а средний размер наночастиц, соответственно уменьшался.

В нанопорошках сложных оксидов, полученных в настоящей работе, всегда наблюдается дефицит содержания более тугоплавкого оксида по сравнению с химическим составом материала мишени, что объясняется более низкой скоростью его испарения. Величина этого изменения зависит как от разницы в удельных энергиях испарения компонент мишени, так и от плотности мощности лазерного излучения на ее поверхности. Содержание Y₂O₃ в нанопорошке из YSZ оказывается только на 10%мольн. меньше, чем в мишени. Содержание Gd₂O₃ в нанопорошке Ce_{1-x}Gd_xO_{2-δ} изменяется гораздо сильнее, поскольку удельная теплота сублимации Gd₂O₃ и CeO₂ различаются в три раза: при плотности пиковой мощности 2,6МВт/см² массовое содержание Gd₂O₃ в мишени в 1,6раз превышает содержание его в нанопорошке, а при I=1,1МВт/см² уже в 2,5 раза. Таким образом, нанопорошок Ce_{1-x}Gd_xO_{2-δ} с заданным химическим составом возможно получить путем подбора исходного состава мишени только при жестком контроле плотности пиковой мощности лазерного излучения, которая зависит от качества лазерного пучка и его стабильности во времени.

В четвертой главе излагаются результаты исследования разлета в воздух лазерного факела при испарении мишеней из YSZ, шихты Nd:YAG и графита.

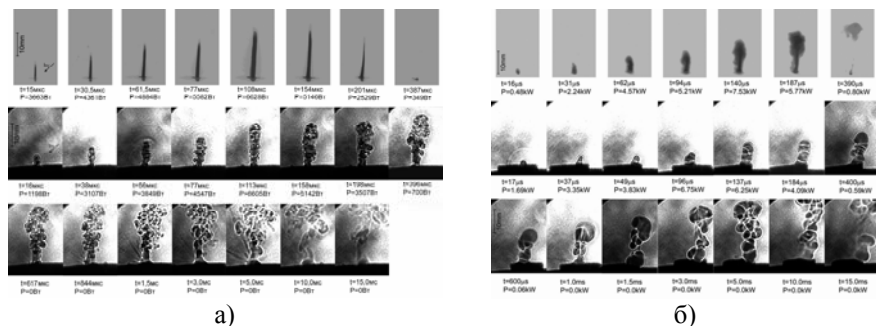


Рис.5. Кинограммы собственных свечений лазерных (верхние ряды снимков) факелов от YSZ-мишени (а) и от графитовой мишени (б), а также их теневые изображения (два нижних ряда). Время отсчитывается с момента появления факела.

Динамика светящейся зоны лазерного факела исследовалась с помощью скоростной кинокамеры, а динамика невидимых зон факела - с помощью теневого фотографирования. Кроме того, светящаяся область лазерного факела исследовалась с помощью спектрографа.

Установлено, что светящийся факел от мишени из YSZ имеет форму иглы, высота которой зависит от мгновенной мощности лазерного излучения (Рис.5).

В спектрах собственного свечения лазерной плазмы доминируют следующие полосы электронно-колебательных переходов нейтральных радикалов ZrO и YO, составляющих вещество мишени: 1) ZrO: ($C^3\Delta \rightarrow X^3\Delta$) $\Delta v=0$: $\lambda=465\text{нм}$; $\Delta v=-1$: $\lambda=486\text{нм}$; $\Delta v=1$: $\lambda=455\text{нм}$; 2) ZrO: ($B^3\Pi \rightarrow X^3\Delta$) $\Delta v=0$: $\lambda=559\text{нм}$; $\lambda=566\text{нм}$; $\lambda=576\text{нм}$; $\Delta v=-1$: $\lambda=594\text{нм}$, $\lambda=596\text{нм}$, $\lambda=604\text{нм}$, $\lambda=607\text{нм}$; $\Delta v=1$: $\lambda=548\text{нм}$; 3) ZrO: ($A^3\Phi \rightarrow X^3\Delta$) $\Delta v=-1$: $\lambda=698\text{нм}$, $\lambda=701\text{нм}$; 4) YO: ($A^2\Pi \rightarrow X^2\Sigma$) $\Delta v=0$: iiQ серия ($\lambda=613.2\text{нм}$ (0-0), $\lambda=614.8\text{нм}$ (1-1), $\lambda=616,5\text{нм}$ (2-2)), iiR серия ($\lambda=609.7\text{нм}$ (0-0), $\lambda=611.5\text{нм}$ (1-1)), iQ серия ($\lambda=597.2\text{нм}$ (0-0), $\lambda=598.8\text{нм}$ (1-1), (2-2) $\lambda=600.4\text{нм}$ (2-2)). Обнаружено, что видимая часть лазерного факела является слабонеравновесной плазмой. Ее температура вблизи поверхности мишени оказывается на 50К выше температуры кипения материала (рис.6). В процессе разлета пар охлаждается и на расстоянии от поверхности мишени 6мм ее температура достигает 3,1кК. Однако при дальнейшем удалении от мишени охлаждение плазмы прекращается и даже происходит ее нагрев до 3,7кК ($l=12\text{мм}$), который связан с началом конденсации пара и выделением энергии сублимации. Это подтверждается данными теневого фотографирования факела от мишени из YSZ, которое показало, что примерно на этом расстоянии начинается образование вихревого облака, где конденсирующийся пар перемешивается с воздухом.

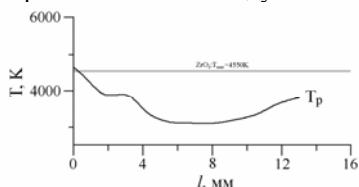


Рис.6 Зависимость температуры в осевой части лазерного факела от YSZ мишени от расстояния до поверхности мишени.

В отличие от случая YSZ светящаяся область лазерного факела от углеродной мишени при разлете принимает сложную вихреобразную форму, которая состоит из столба и вихревого облака. Свечение столба, соединяющего мишень с вихревым облаком, исчезает с окончанием лазерного импульса, а облако светится значительно дольше. Образование облака связывается с развитием неустойчивости Рихтмайера-Мешкова на контактной границе между

парами и воздухом. Столь длительное его свечение вызвано протеканием следующей экзотермической реакции:



Эта реакция является причиной нагрева лазерной плазмы до температуры $\approx 10\text{кК}$, а излучательная релаксация возбужденных молекул C_2 дает наибольший вклад в свечение видимой области лазерного факела. Кроме спектральных полос излучения C_2 в спектре свечения углеродной плазмы идентифицированы также полосы молекулы C_3 ($X^1\Sigma_g^+ \rightarrow A^1\Pi_g$), линии иона C^+ , а на расстояниях более 3мм от мишени линии свечения молекулярного иона N_2^+ ($B^2X_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+$).

На тневых фотографиях факела от YSZ мишени спустя $\approx 800\text{мкс}$ с момента образования лазерного факела, когда мишень уже прекращает испаряться, появляются прямолинейные полосы, которые являются следами пролета

крупных осколков с размерами в десятки микрон. Подобные треки имеются также на теневых фотографиях лазерного факела от мишени из гранатовой шихты. Образование этих осколков очевидно связано с разрушением застывшего расплава в кратере в момент его кристаллизации или сразу после нее. Это объясняет отсутствие треков на теневых фотографиях факела, образующегося при испарении графита, т.к. он не образует жидкого расплава при возгонке в условиях наших экспериментов.

Дополнительным подтверждением вышесказанному являются результаты трехмерного расчета динамики плавления мишени из YSZ. Для этого решалось теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \chi(T)\Delta T + \frac{Q_{вн}}{c(T)} \quad (2)$$

Воздействие лазерного излучения на поверхность мишени моделировалось источником тепла:

$$Q_{вн}(x, y, z, t) = (1-R) \cdot I_0(x, y) \cdot \exp(-\alpha \cdot z) \cdot f(t) \quad (3)$$

Принятая форма распределения интенсивности излучения в пятне, а также зависимость мощности излучения от времени соответствовали экспериментальным данным.

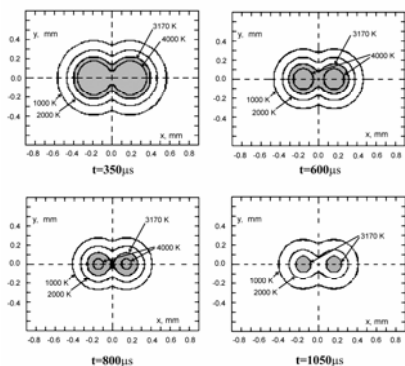


Рис.7 Распределение температуры на поверхности мишени и расплава в различные моменты времени для реализующегося в эксперименте импульса излучения. Серым цветом отмечена зона расплава.

На диаграммах приведены распределения температуры в кратере в различные моменты времени. Серым цветом отмечена область расплава. Спустя 600мкс после начала испарения мишени по краям кратера начинается интенсивная кристаллизация расплава, а в момент времени 800мкс ванна расплава разделяется на две половины. Процесс кристаллизации расплава сопровождается изменением его объема, что может вызвать растрескивание застывшего оплава, а возникающие упругие силы приводят к разлету осколков. Этому несомненно способствуют большие температурные градиенты, имеющиеся по краям перемычки между двумя этими ваннами расплава.

С помощью этой модели было оценено также влияние формы лазерного импульса на объем расплава в кратере на поверхности мишени из YSZ, который качественно отражает энергетические потери лазерного излучения на нагрев мишени. Установлено, что наибольший вклад в величину объема расплава дает длинный спад лазерного импульса. Однако даже при прямоугольной форме импульса излучения с той же самой энергией (1,25Дж) объем расплава

уменьшился только на 40%. Это объясняется тем, что поглощение лазерного излучения веществом мишени носит все же объемный характер и определенную роль играет неравномерность распределения плотности мощности лазерного излучения в пятне.

В заключении формулируются основные результаты работы.

1. Впервые в электрической схеме накачки CO_2 -лазера, возбуждаемого комбинированным разрядом в качестве элемента развязки источников питания самостоятельного и несамостоятельного разрядов был использован магнитный ключ, который позволил многократно увеличить срок службы развязывающего элемента (не менее 1000 часов). Теоретически и экспериментально определен интервал между самостоятельными разрядами в пакете накачки активной среды лазера, при котором обеспечивается максимальная пиковая мощность импульса при равном начальном напряжении несамостоятельного разряда.

2. Показано, что испарение твердой мишени излучением мощного импульсно-периодического CO_2 -лазера с высоким КПД и длительностью импульса излучения $\sim 10^{-4}$ с является перспективным способом получения наночастиц тугоплавких сложных оксидов типа YSZ, $\text{Ce}_{1-x}\text{Gd}_x\text{O}_{2-\delta}$ и $\text{Nd:Y}_2\text{O}_3$.

В этом режиме при получении наночастиц ZrO_2 при одинаковой средней мощности излучения (≈ 500 Вт) снизились затраты электрической энергии в два раза, по сравнению с непрерывным CO_2 -лазером, а по сравнению с CO_2 -лазером с модуляцией добротности резонатора - в четыре раза.

3. Полученные нанопорошки содержат в себе частицы двух фракций. Первая фракция состоит из наночастиц округлой формы (или с огранкой), которые образуются при конденсации пара и при атмосферном давлении воздуха в испарительной камере имеют средний размер - $11 \div 14$ нм. Вторая фракция состоит из разбрызганных из расплава сферических частиц с размерами $0,2 \div 2$ мкм и бесформенных осколков мишени с размерами $1 \div 50$ мкм, образующихся в результате разрушения оплавленного вещества в кратере в момент кристаллизации.

4. Средние размеры частиц в нанопорошках YSZ, $\text{Ce}_{1-x}\text{Gd}_x\text{O}_{2-\delta}$ и $\text{Nd:Y}_2\text{O}_3$ оказываются одинаковыми и не зависят от энергии ($0,2 \div 1,2$ Дж) и пиковой мощности лазерного излучения ($0,5 \div 2$ МВт/см²), а определяются параметрами несущего газа. С ростом скорости прокачки воздуха над поверхностью мишени с 2м/с до 22м/с увеличивается удельная поверхность нанопорошка YSZ с 42м²/г до 70м²/г из-за увеличения скорости охлаждения пара в лазерном факеле. Объем лазерного факела, а значит и концентрация частиц пара перед началом конденсации контролируются давлением воздуха в испарительной камере. По этой причине средний размер наночастиц полученных в условиях плавно растущего давления воздуха с уровня 1,25атм до 2,75атм был равен 24нм, что в ≈ 2 раза выше, чем при нормальном давлении.

5. Химический состав наночастиц сложных оксидов типа YSZ, $\text{Ce}_{1-x}\text{Gd}_x\text{O}_{2-\delta}$ и $\text{Nd:Y}_2\text{O}_3$ отличается от состава исходных мишеней. Это различие оказывается тем выше, чем больше разница теплофизических свойств простых оксидов,

составляющих мишень. Кроме того, изменение химического состава нанопорошка $Ce_{1-x}Gd_xO_{2-\delta}$ существенно возрастает при снижении средней по пятну плотности мощности излучения на мишени с $2,6 \text{ МВт/см}^2$ до $1,1 \text{ МВт/см}^2$. Поэтому для получения заданного химического состава наночастиц из этого материала требуется строго контролировать качество лазерного пучка и пиковую мощность импульса излучения.

6. При исследовании методами скоростной киносъемки, теневого фотографирования и с помощью спектрографа разлета в воздух лазерного факела, возникающего при испарении мишени, обнаружено следующее.

- Под действием излучения CO_2 -лазера мишень из простых или сложных оксидов испаряется в виде радикалов (типа YO , ZrO), излучательная релаксация которых обеспечивает свечение видимой области лазерного факела, имеющей форму столба.

- В процессе разлета пары, имеющие вблизи устья кратера температуру чуть выше температуры кипения мишени, охлаждаются до температур ниже точки кипения. Однако на расстоянии нескольких миллиметров от поверхности мишени этот процесс задерживается выделением энергии сублимации на начальном этапе конденсации пара, окончательное образование наночастиц происходит в вихревых облаках, которые формируются при турбулентном перемешивании пара с воздухом.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ.

1. Осипов В.В. Высокоэффективный импульсно-периодический CO_2 -лазер ЛАЭРТ для технологических применений / Осипов В.В., Иванов М.Г., Лисенков В.В., Платонов В.В. // Квантовая электроника. -2002. - Т.32, №3. -С.253-259.
2. Ю.А.Котов. Исследование характеристик оксидных нанопорошков, получаемых при испарении мишени импульсно-периодическим CO_2 -лазером / Ю.А.Котов, В.В.Осипов, М.Г.Иванов, О.М.Саматов, В.В.Платонов, Е.И.Азаркевич, А.М.Мурзакаев, А.И.Медведев // Журнал технической физики. -2002, -Т.72. №11. -С.76-82.
3. Yu. A. Kotov. Properties of Oxide Nanopowders Prepared by Target Evaporation with a Pulse-Periodic CO_2 Laser / Yu. A. Kotov, V. V. Osipov, M. G. Ivanov, O. M. Samatov, V. V. Platonov, E. I. Azarkevich, A. M. Murzakaev, and A. I. Medvedev // Technical Physics. -2002. -Vol.47, №11, -P.1420-1426.
4. Г.А. Месяц. Нелинейная динамика плазменного факела, генерируемого импульсом лазерного излучения большой длительности / Г.А. Месяц, В.В. Осипов, Н.Б. Волков, В.В. Платонов, М.Г. Иванов // Письма в ЖТФ. -2003. -Т.29, №19. -С.54-60.

5. Yu.A. Kotov. Properties of YSZ and CeGdO nanopowders prepared by target evaporation with a pulse-repetitive CO₂-laser / Yu.A. Kotov, V.V. Osipov, M.G. Ivanov, O.M. Samatov, V.V. Platonov, V.V. Lisenkov, A.M. Murzakayev, A.I. Medvedev, E.I. Azarkevich, A.K. Shtolz, O.R. Timoshenkova // *Rev. Adv. Mater. Sci.* -2003. -Vol.5. -P.85-91.
6. В.В.Осипов. Особенности развития лазерного факела с графитовой мишени / В.В.Осипов, Н.Б.Волков, В.В.Платонов, М.Г.Иванов // *Оптика атмосферы и океана.* -2004, -Т.17, №2-3. -С.108-111.
7. Котов Ю.А. Характеристики нанопорошков, получаемых при испарении CeO₂/Gd₂O₃ мишеней излучением импульсно-периодического CO₂-лазера / Котов Ю.А., Осипов В.В., Саматов О.М., Платонов В.В., Мурзакаев А.Мазаркевич, Е.И.Медведев А.И., Штольц А.К., Тимошенкова О.Р., Иванов М.Г. // *Журнал технической физики.* -2004. -Т.74, №3, -С.72-77.
8. Осипов В.В. Спектроскопия лазерного факела. I. Графитовая мишень / В.В. Осипов, В.И. Соломонов, В.В. Платонов О.А. Снигирева, М.Г. Иванов, В.В. Лисенков // *Квантовая электроника.* -2005. -Т.35, №5. -С.467-473.
9. Осипов В.В. Спектроскопия лазерного факела. II. Мишени графит и оксид циркония, стабилизированный иттрием / В.В. Осипов, В.И. Соломонов, В.В. Платонов, О.А. Снигирева, М.Г. Иванов, В.В. Лисенков // *Квантовая электроника.* -2005. Т.35, №7. -С.633-637.
10. V.V. Osipov. Laser synthesis and characteristics of oxide nanopowders. / V.V. Osipov, Yu.A. Kotov, V.V. Platonov, O.M. Samatov, A.V. Rasuleva, M.G. Ivanov // *SPIE.* -2005. -Vol.6344, Part Two. -P.63442N1-63442N14.
11. V.V. Osipov. Laser synthesis of nanopowders. / V.V. Osipov, Yu.A. Kotov, M.G. Ivanov, O.M. Samatov, V.V. Lisenkov, V.V. Platonov, A.M. Murzakayev, A.I. Medvedev, and E.I. Azarkevich // *Laser Physics.* -2006. -Vol.16, №1. -P.116-125.
12. V.V. Osipov. Dynamics and Spectroscopy of the laser plume from solid targets. / V.V. Osipov, V.I. Solomonov, V.V. Platonov, O.A. Snigireva, V.V. Lisenkov, M.G. Ivanov // *Laser Physics.* -2006. -Vol.16, №1, -P.134-145.
13. M. Ivanov. Laser synthesis of oxide nanopowders. / M. Ivanov, V. Osipov, Yu. Kotov, V. Lisenkov, V. Platonov, V. Solomonov // *Advances in Science and Technology.* -2006. -Vol.45, -P.291-296.
14. Багаев. С.Н. Высокопрозрачная керамика на основе Nd³⁺:Y₂O₃. / С.Н. Багаев, В.В. Осипов, М.Г. Иванов, В.И. Соломонов, В.В. Платонов, А.Н. Орлов, А.В. Расулева, С.М. Ватник, И.А. Ведин, А.П. Майоров, Е.В. Пестряков, А.В. Шестаков, А.В. Салков // *Фотоника.* -2007. -№5. -С.24-29.
15. Осипов В.В. Лазерный синтез нанопорошков и новые оптические материалы, основанные на них. / В.В. Осипов, В.В. Иванов, А.В. Шестаков, М.Г. Иванов, А.Н. Орлов, В.В. Платонов, А.В. Кайгородов,

- В.Р Хрустов, Ю.Л. Копылов // Известия вузов. Материалы электронной техники. -2007. -№2, -С.59-64.
16. Багаев. С.Н. Лазерная керамика из оксида иттрия, активированного неодимом. / С.Н. Багаев, В.В. Осипов, М.Г. Иванов, В.И. Соломонов, В.В. Платонов, А.Н. Орлов, А.В. Расулева, В.В. Иванов, А.С. Кайгородов, В.Р. Хрустов, С.М. Ватник, И.А. Ведин, А.П. Майоров, Е.В. Пестряков, А.В. Шестаков, А.В. Салков //Квантовая электроника. -2008. -Т.38, №9. -С.840-844.
 17. CO₂ Laser Excitation by a Combined Discharge Using gas Flow Through Electrodes / V.V. Osipov, M.G. Ivanov, P.B. Smirnov, V.V. Platonov // The 4th International Conference on Atomic and Molecular Pulsed Lasers AMPL'99, Tomsk, Russia, September 13-17, 1999. Abstracts. 1999. - P.62.
 18. New pulse-repetitive high-efficient technological CO₂-laser and its use for production of nano-powders and thin films / M.G.Ivanov, V.V.Osipov, V.V.Platonov., V.V.Lisenkov // International Conference on LASERS'2001, Tucson, Arizona, USA, December 3-7, 2001, Abstracts -ME.2.
 19. Properties of YSZ and CeGdO nanopowders prepared by target evaporation with a pulse-repetitive CO₂-laser / Yu.A. Kotov, V.V. Osipov, M.G. Ivanov, O.M. Samatov, V.V. Platonov, V.V. Lisenkov, A.M. Murzakayev, A.I. Medvedev, E.I. Azarkevich, A.K. Shtolz, O.R. Timoshenkova //International Conference on NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES NN'2003, Crete, Greece, August 30 -September 6, 2003. Abstracts. 2003. - P.12.
 20. Features of development of the laser plume from the graphite target / V.V.Osipov, N.B.Volkov, V.V.Platonov, M.G.Ivanov // The VI International Conference on Atomic and Molecular Pulsed Lasers AMPL'2003, Tomsk, Russia, September 15-19, 2003. Abstracts. 2003. - P.65.
 21. Особенности формы плазменного факела, генерируемого излучением импульсно-периодического CO₂-лазера. Модель формирования наночастиц. /Осипов В.В., Волков Н.Б., Лисенков В.В., Платонов В.В., ИвановМ.Г. // XIX Международная конференция "Уравнения состояния вещества", Эльбрус,11-17 марта 2004г., Физика экстремальных состояний вещества-2004: сборник докладов. – Черноголовка, 2004г. - 207 с.
 22. The Dynamics of Plasma Jet Produced by Long Pulse Laser Radiation / V.V. Osipov, V.V. Platonov, V.V. Lisenkov, M.G. Ivanov // Great Lakes Photonics Symposium, Cleveland, OH, USA, June 7-11, 2004. Abstracts. 2004. -P.31.
 23. Laser synthesis of nanopowders / V.V. Osipov, Yu.A. Kotov, V.V. Platonov, O.M. Samatov, M.G. Ivanov // Advanced Laser Technologies ALT'04, Rome and Frascati, Italy, Sept. 10-15, 2004. Proc. SPIE, 2005. Vol.5850, -P.242.

24. Spectral-kinetic investigation of the plume produced with high-power CO₂ laser. / Osipov V.V., Solomonov V.I., Platonov V.V., Ivanov M.G., Lisenkov V.V., Snigireva O.A. // International Conference on Coherent and Nonlinear Optics & International Conference on Lasers, Applications and Technologies (ICONO/LAT 2005), St. Petersburg, Russia, May 11-15, 2005. Technical Digest. 2005. - P.124.
25. Fabrication of Nd:Y₂O₃ transparent ceramics by pulsed compaction and sintering of weakly agglomerated nanopowders / A. Kaigorodov, V. Osipov, M. Ivanov, V. Platonov, Yu. Kotov, A. Medvedev, V. Ivanov, V. Khrustov // IX Conference & Exhibition of the European Ceramic Society. Portoroz, Slovenia, 19-23 June 2005, Abstract book. 2005. -P.143.
26. The method of laser synthesis of oxide nanomaterials. / M.G. Ivanov, Yu.A. Kotov, V.V. Osipov, V.V. Platonov, O.M. Samatov, V.I. Solomonov // 12th International Symposium on Metastable and Nano Materials (ISMAM). Paris, France, 3-7 July 2005. Book of abstracts. 2005. P.I-48.
27. Laser synthesis and characteristics of oxide nanopowders. / V.V. Osipov, Yu.A. Kotov, M.G. Ivanov, V.V. Platonov, O.M. Samatov, A.V. Rasuleva // The 13th International Conference on Advanced Laser Technologies ALT'05, Tianjin, China, Sept. 3-6, 2005. Proc. SPIE, 2006. Vol.6344, - P.63442N.
28. Research of dynamics of the laser plume from graphite and YSZ targets / M.G.Ivanov, V.V. Lisenkov, V.V.Osipov, V.V.Platonov, O.A. Snigireva and V.I. Solomonov // The VII International Conference on Atomic and Molecular Pulsed Lasers AMPL'2005, Tomsk, Russia, September 12-16, 2005. Conference Abstracts. – Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, 2005. -113с.
29. Исследование спектрально-кинетических характеристик лазерного факела. / Лисенков В.В., Осипов В.В., Соломонов В.И., Платонов В.В., Снигирева О.А., Иванов М.Г. // XX Международная конференция "Воздействие интенсивных потоков энергии на вещество", Эльбрус, 1-6 марта 2005 г., сборник докладов -С.172-174.
30. Laser synthesis of oxide nanopowders / M.G. Ivanov, Yu.A. Kotov, V.V. Osipov, V.V. Platonov, O.M. Samatov // 11th International Ceramic Congress, 4th Forum on New Materials. Acireale, Sicily, Italy, June 4-9 2006, Book of abstracts. 2006. -P.26.
31. Dynamics and spectroscopy of the laser plume and generation of the nanoparticles / V.V.Osipov, V.I. Solomonov, V.V.Platonov, O.A. Snigireva, V.V. Lisenkov, M.G.Ivanov, // International Conference on Advanced Laser Technologies ALT'06, Brasov, Romania, Sept. 8-12, 2006, Proc. SPIE. 2007. Vol.6606, -P.66060M.
32. Лазерный синтез нанопорошков и новые оптические материалы, основанные на них / В.В. Осипов, В.В. Иванов, М.Г. Иванов, А.В. Шестаков, А.Н. Орлов, В.В. Платонов, А.В. Кайгородов, В.Р Хрустов, Ю.Л. Копылов // 3-я Международная конференция по физике

- кристаллов «Кристаллофизика 21-го века», Москва, 20-26 ноября 2006 г. Тезисы докладов. 2006. -С.282-283.
33. Laser ceramics based on neodymium-activated yttrium oxide / S.N. Bagaev, V.V. Osipov, M.G. Ivanov, V.I. Solomonov, V.V. Platonov, A.N. Orlov, A.V. Rasuleva, S.M. Vatnik and I.A. Vedin // The 8th International Conference “Atomic and Molecular Pulsed Lasers” AMPL’2007, Tomsk, Russia, September 10-14, 2007, Proceedings of the SPIE. 2008. Vol. 6938, 2008. -P. 69380R1-69380R7.
 34. Laser ceramics based on neodymium-actiated yttrium oxide / S. Bagaev, V. Osipov, M. Ivanov, V. Solomonov, V. Platonov, A. Orlov, A. Rasuleva, S. Vatnik, I. Vedin, E. Pstryakov // 3rd Laser Ceramics Symposium: International Symposium on transparent Ceramics for photonic applications, Paris, France, October 8-10, 2007, Conference Abstracts. 2007. -O-C-13.
 35. Исследование динамики лазерного факела и тепловых процессов в мишени под действием импульсно-периодического CO₂ лазера / В.В. Осипов, В.В. Платонов, В.В. Лисенков // The 8th International Conference “Atomic and Molecular Pulsed Lasers” AMPL’2007, Tomsk, Russia, September 10-14, 2007, Conference Abstracts. -Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, 2007. -120с.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА.

1. Nd³⁺:Y₂O₃ ceramic laser. / Jianren Lu, Junhua Lu, Tomoyo Murai, Kazunori Takaichi, Tomohiro Uematsu, Ken-ichi Ueda, Hideki Yagi, Takagimi Yanagitani, Alexander A. Kaminkii // Japanese Journal of Applied Physics. - 2001. -V.40. -P.L1277-1279.
2. Fabrication and optical properties of high-performance polycrystalline Nd:YAG ceramics for solid-state lasers. / Akio Ikesue, Toshiyuki Kinoshita, Kiichiro Kamata, Kunio Yoshida // Journal American ceramic society. - 1995. -V. 78, № 4. -P.1033-1040.
3. Перфильев М.В. Высокотемпературный электролиз газов. / М.В. Перфильев, А.К. Демин, Б.А. Кузин, А.С. Липилин. -М.: Наука, 1988. - 232с.
4. Нанокерамика стабилизированного оксида циркония, полученная магнито-импульсным прессованием наноразмерных порошков./ В.В. Иванов, В.Р. Хрустов, С.Н. Паранин, А.И. Медведев, А.К. Штольц, О.Ф. Иванова, А.А. Ноздрин // Физика и химия стекла. -2005. -Т. 31, № 4. - С.625-634.
5. Керамика с субмикронной структурой из оксида церия, допированного гадолинием, для электрохимических применений. / В.П. Горелов С.В. Заяц, В.В. Иванов, С.Ю. Ивин, Ю.А. Котов, А.И. Медведев Н.И. Москаленко, А.М. Мурзакаев, О.М. Саматов, В.Р. Хрустов // Физика и химия стекла. -2005. -Т. 31, № 4. -С.635-642.

6. Characterisation of nanocrystalline ceramic oxide powders preparation by laser evaporation. / E. Muller, Ch. Oestreich, U. Popp, G. Michel, G. Staupendahl, K.-H. Henneberg // 4th Euro Ceram. Conf. Ed. Galassi C. Italy: Proc. –1995 -V.1. P.219-224.
7. Properties of nanocrystalline ceramic powders prepared by laser evaporation and recondensation. / U. Popp, R. Herbig, G. Michel, E. Muller, Ch. Oestreich // Journal of European Ceramic Society. –1998. -V.18. -P.1153-1160.
8. Веденов А.А. Физические процессы при лазерной обработке материалов. / А.А. Веденов, Г.Г. Гладуш. -М.: Энергоатомиздат, 1985. - 208с.
9. Гусев А.И. Нанокристаллические материалы. / А.И. Гусев, А.А. Ремпель -М.: Физмат лит, 2000. -222с.
10. В. Витteman. CO₂-лазер: пер. с англ. / В. Витteman. -М.: Мир, 1990. - 360с.
11. Айанагос А.Ф., Халтурин В.Г., Шмаков // Физика и химия обработки материалов. -1995. -№ 3 -С.108.
12. Гордиец Б.Ф. Кинетика низкотемпературной плазмы и газовые лазеры. / Гордиец Б.Ф., Шелепин Л.А. Шмоткин Ю.К. –М.:Наука, 1989.