На правах рукописи

Иванов Матвей Сергеевич

ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ ФОКУСИРОВКА ПОТОКОВ НАНОЧАСТИЦ В ПРОЦЕССАХ СУХОЙ АЭРОЗОЛЬНОЙ ПЕЧАТИ

1.3.8. Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Долгопрудный — 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: Иванов Виктор Владимирович,

доктор физико-математических наук, профессор,

член-корреспондент РАН.

Официальные оппоненты: [Оппонент 1: ФИО, ученая степень, звание, место работы и должность]

[Оппонент 2: ФИО, ученая степень, звание, место работы и должность]

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединённый институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН).

Защита состоится [дата и время] на заседании диссертационного совета [шифр совета], созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» (МФТИ, Физтех).

по адресу: 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МФТИ, Физтех и на сайте организации https://mipt.ru.

Автореферат разослан « » 2026 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета **Токунов Юрий Матвеевич**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Развитие гибких, носимых и крупноформатных устройств — дисплеев, сенсорных систем, медицинских диагностических устройств — сформировало запрос на технологии формирования проводящих и функциональных микроструктур непосредственно на полимерных и термочувствительных подложках. Традиционные методы (фотолитография, вакуумное напыление, плазмохимическое травление) обеспечивают нанометровое разрешение, однако на таких подложках ограничены длинными технологическими циклами, высокими капитальными затратами и использованием агрессивных реагентов [1–3]. Это стимулирует развитие аддитивных методов печатной электроники [2, 4, 5].

Одно из ключевых направлений — аэрозольная печать, наиболее известная реализация которой, технология Aerosol Jet Printing (AJP, Optomec, США), использует предварительно приготовленные жидкие чернила с наночастицами или прекурсорами [4, 5]. Цикл приготовления чернил (синтез, диспергирование, стабилизация ПАВ, последующее удаление растворителя и ПАВ) делает процесс печати длинным и создаёт риск химического загрязнения структур [5–7].

Принципиально иной подход — сухая аэрозольная печать (САП), развиваемая в МФТИ [8–10]: наночастицы синтезируются непосредственно в газоразрядной ячейке, образующиеся агломераты преобразуются лазерным воздействием в компактные квазисферические частицы, после чего сфокусированный поток осаждается на подложку. Такая цепочка исключает приготовление и хранение чернил. Первые отечественные исследования подтвердили возможность фокусировки сухих агломератов [9], а последующие работы были направлены на управление их морфологией [10].

Ключевым узлом принтера САП является фокусирующее сопло. Первые модели газодинамической фокусировки были построены для капель чернил [7], для твёрдых

наночастиц предложены аэродинамические линзы [11–13], однако для сопел с ограждающим газом задача фокусировки сухих наночастиц решена не была [14]. Аналитическая модель [7] в приближении несжимаемой среды не учитывает сжимаемость газа, сопряжённый теплообмен и истечение в вакуум.

Актуальность исследования определяется: научной актуальностью — недостаточной изученностью газодинамической фокусировки потоков сухих квазисферических частиц размером 50–100 нм в соплах с учётом сжимаемости газа; технологической актуальностью — потребностью в воспроизводимых конструкциях сопел, обеспечивающих разрешение на уровне десяти микрометров; методической актуальностью — необходимостью валидированной вычислительной платформы, объединяющей полные уравнения Навье–Стокса и лагранжеву модель полидисперсных частиц.

Степень разработанности темы. Теоретические основы фокусировки аэрозольных потоков сформированы в работах по пучкам частиц и аэродинамическим линзам [11–13, 18–20], аналитическая модель баланса расходов для чернильной печати предложена в [4, 5, 7], численные и экспериментальные исследования геометрии сопла и формы линии выполнены в [15, 16]. Безрастворные методы развивались по нескольким направлениям: аэродинамически сфокусированная печать порошков (AFN) [13], сухое аэрозольное нанесение в вакууме (dADW) [14], а также сухая аэрозольная печать МФТИ, дополненная лазерной модификацией агломератов [8–10]. При этом количественно валидированное описание движения полидисперсного потока сухих наночастиц в сопле с ограждающим газом при изменении геометрии и противодавления остаётся неразработанным; совместное оптимизирующее исследование такой фокусировки при выводе потока в динамический вакуум до начала данной работы не проводилось.

Цель и задачи исследования. Целью работы является разработка и экспериментальная валидация численной модели газодинамической фокусировки

потоков наночастиц в каналах фокусирующих сопел, определение на её основе рациональных параметров профиля канала и условий истечения, а также разработка способа энергоэффективной лазерной модификации агломератов, обеспечивающих печатные линии минимальной ширины. Для достижения цели решены следующие задачи:

1. Выполнить аналитическую оценку чисел Стокса и поперечного отклонения траекторий наночастиц для условий сухой аэрозольной печати и экспериментально подтвердить возможность формирования линии малой ширины.

2. Разработать вычислительную методику на основе стационарных уравнений Навье–Стокса для вязкого сжимаемого теплопроводного газа с условиями скольжения на стенках, дополненную лагранжевой трассировкой наночастиц с учётом силы сопротивления, броуновской диффузии, силы тяжести и реального распределения частиц по размерам.

3. Для режимов истечения в динамический вакуум при скорости газа, ограниченной $c/2$, исследовать влияние длины выходного (b) и входного (B) цилиндрических участков сопла на ширину пятна осаждения наночастиц золота диаметром 50 и 100 нм и определить их оптимальные значения.

4. Выполнить экспериментальную валидацию модели на макете принтера МФТИ с использованием реального потока лазерно-модифицированных наночастиц золота (средний диаметр 70 нм, полуширина 20 нм) и сформулировать рекомендации по выбору геометрии сопла.

5. Разработать и применить способ энергоэффективной лазерной модификации агломератов наночастиц золота для получения уединённых квазисферических частиц, пригодных для эффективной фокусировки.

Объект исследования — газодинамическая фокусировка аэрозольных потоков наночастиц в соплах с ограждающим потоком газа в процессах сухой аэрозольной

печати. **Предмет исследования** — влияние геометрии канала сопла, режимов истечения и размеров наночастиц на ширину пятна осаждения на подложке.

Научная новизна.

1. Разработана оригинальная численная модель газодинамической фокусировки полидисперсного потока лазерно-модифицированных наночастиц золота в канале сопла с ограждающим газовым потоком и выводом в динамический вакуум, основанная на полных уравнениях Навье–Стокса для вязкого сжимаемого теплопроводного газа с условиями скольжения на стенках и лагранжевом описании движения частиц.

2. Для истечения в динамический вакуум (5000 Па) при скорости газа $c/2$ впервые численно установлено влияние длин b и B цилиндрических участков сопла на ширину пятна осаждения и определены их оптимальные значения: 46,5 мкм для частиц диаметром 50 нм и 11,5 мкм — для 100 нм.

3. Впервые выполнена экспериментальная валидация модели на макете принтера САП: расхождение расчётных и измеренных ширин линий не превысило 11 % при b = 0,5 мм, B = 1,9 мм; минимальная измеренная ширина — 51,2 мкм.

4. Предложен и запатентован способ подбора параметров импульсного лазерного излучения для энергоэффективного преобразования агломератов наночастиц золота в уединённые квазисферические частицы [А9]: для длины волны 1064 нм и длительности импульса 5 нс достаточны плотность энергии 4,4 мДж/см² и частота следования не менее 22 Гц.

Теоретическая и практическая значимость работы. Результаты расширяют знания о газодинамической фокусировке полидисперсных аэрозольных потоков в соплах с ограждающим газом при дозвуковых скоростях и последующем расширении струи в вакуум, с учётом реального распределения частиц по размерам и броуновской диффузии. Результаты могут быть использованы:

— при разработке фокусирующих систем сухой аэрозольной печати, работающих в условиях динамического вакуума, с формированием линий шириной в десятки микрометров;

— при проектировании и оптимизации геометрии канала фокусирующих сопел с сокращением числа экспериментальных циклов;

— при обоснованном выборе режима истечения и ограничении скорости газа на входе величиной $c/4$–$c/2$;

— при разработке методов формирования микроструктур на гибких и термочувствительных подложках;

— при создании плазмонных наноструктур и газочувствительных слоёв с улучшенной однородностью;

— при проектировании принтеров сухой аэрозольной печати для задач прецизионной аддитивной микроэлектроники.

Методология и методы исследования. Методологическую основу составляет совместное применение физического моделирования, вычислительного эксперимента и натурной проверки. Газовая фаза описывается уравнениями сохранения массы, импульса и энергии для сжимаемого теплопроводного газа; движение частиц — в лагранжевой постановке с учётом силы сопротивления, поправки на скольжение и стохастической составляющей. Вычислительный метод включает параметрическое изменение геометрии сопла и расходов газа, контроль сеточной сходимости и оценку чувствительности расчёта. Применение верификации и валидации принципиально необходимо: верификация подтверждает корректность численного решения, но не заменяет сопоставление с экспериментом.

Положения, выносимые на защиту.

1. На основе аналитической модели аэродинамической фокусировки в приближении несжимаемого газа для сопла с выходным диаметром 100 мкм, при

оптимальной степени сжатия аэрозольной струи ψ = 0,25 и максимальной скорости несущего газа аргона на выходе из сопла $c/2$ показано, что для квазисферических наночастиц из материалов с плотностью более 5 г/см³ при среднем диаметре более 70 нм числа Стокса превышают единицу, а расчётное поперечное отклонение траекторий наночастиц от оси потока при движении к подложке составляет менее 1 мкм.

2. Экспериментально реализована сухая аэрозольная печать квазисферическими наночастицами золота через фокусирующее сопло с выходным диаметром 100 мкм при скорости несущего газа аргона $c/2$ линий шириной до 30 мкм, что количественно согласуется с аналитической моделью аэродинамической фокусировки для сухой аэрозольной печати.

3. Предложен численный алгоритм определения оптимальных геометрических параметров канала фокусирующего сопла, обеспечивающих минимальный размер пятна осаждения наночастиц аэрозольного пучка в динамическом вакууме, основанный на решении системы уравнений Навье-Стокса для сжимаемого теплопроводного газа с трассировкой наночастиц. В частности, при выходном диаметре сопла 200 мкм обеспечивается минимальный размер пятна осаждения: 46,5 мкм для сферических наночастиц золота диаметром 50 нм (при длине выходного цилиндрического участка b = 0,25 мм и длине верхнего цилиндрического участка B = 2,5 мм) и 11,5 мкм для наночастиц диаметром 100 нм (при b = 0,375 мм и B = 2,5 мм).

4. Реализована экспериментальная верификация численного алгоритма на макете принтера сухой аэрозольной печати с выходным диаметром сопла 200 мкм при истечении в динамический вакуум для канала с размерами выходного цилиндрического участка b = 0,5 мм, входного цилиндрического участка B = 1,9 мм и расстояния от сопла до подложки 0,5 мм. При использовании реального потока квазисферических наночастиц золота с логнормальным распределением по размерам (со средним размером 70 нм и полушириной 20 нм) минимальная ширина печатной

линии составляет 51,2 мкм, что в пределах 11 % соответствует расчету по численному алгоритму.

5. Разработанный способ энергоэффективного лазерного преобразования агломератов золота в уединённые квазисферические наночастицы с оптимизированными параметрами излучения обеспечивает формирование аэрозольного потока с узким распределением частиц по размерам, что является необходимым условием для эффективной газодинамической фокусировки.

Степень достоверности и апробация результатов. Выводы диссертации подтверждены сопоставлением экспериментальных результатов с литературными данными: отношение ширины линии к диаметру выходного отверстия сопла составило около 0,26 (51,2 мкм при 200 мкм), что близко к 0,27 (67 мкм при 248 мкм) для сухой печати частицами Au менее 100 нм в вакууме [14]; прямым количественным сравнением расчёта и эксперимента (расхождение не более 11 % в исследованном диапазоне); сеточной сходимостью расчётов (относительное изменение контрольного параметра менее 1 %) и измерением ширины линии не менее чем в трёх сечениях; публикациями результатов в рецензируемых изданиях и патентом на способ лазерного преобразования агломератов.

Апробация работы проведена на научно-технической конференции «СВЧ-электроника-2023», XIX Международной научной конференции «Физико-химические процессы в атомных системах» (2024), XXIX симпозиуме «Нанофизика и наноэлектроника» (2025), конференциях «Печатная и гибкая электроника: оборудование, материалы и технологии» (2025, 2026), III Научно-технической конференции Союзного государства «Электронное машиностроение» (2026) и XXVIII Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике (2026).

Публикации. Основное содержание работы представлено в двух статьях в рецензируемых научных журналах и шести тезисах докладов на международных и

российских научных конференциях. По результатам работы получен один патент РФ на способ. Работы перечислены в конце автореферата [А1]–[А9].

Личный вклад автора. Автор принимал непосредственное участие в постановке цели и задач исследования, самостоятельно провёл анализ научной литературы по теме диссертации. Автором разработана численная модель на основе уравнений Навье–Стокса с лагранжевой трассировкой частиц и лично выполнен весь объём многопараметрических расчётов в COMSOL Multiphysics 6.2, включая оптимизацию геометрии сопла. Обработка и интерпретация результатов выполнены автором самостоятельно. Эксперименты проведены при его непосредственном участии на базе Центра испытаний функциональных материалов МФТИ. Положения, выносимые на защиту, и основные выводы сформулированы автором; ключевые результаты, вошедшие в публикации, получены при его личном участии.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа изложена на 126 страницах печатного текста, содержит введение, пять глав, заключение и список литературы, включающий 138 библиографических ссылок. Работа содержит 29 рисунков и 2 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследования газодинамической фокусировки сухих аэрозольных потоков для аддитивного формирования микроструктур, рассмотрена степень разработанности темы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость результатов. Представлены положения, выносимые на защиту, сведения о достоверности результатов, личном вкладе автора, апробации и публикациях.

Глава 1. Литературный обзор. Рассмотрено развитие аэрозольной печати: от чернильной аэрозольной печати (AJP), унаследовавшей ограничения жидкой фазы (синтез и стабилизация коллоидов, отжиг растворителя и ПАВ) [4–7], до сухой аэрозольной печати, объединяющей синтез наночастиц в газовом разряде, их

лазерную модификацию и газодинамическую фокусировку [8–13]. Проведена классификация аэрозольных методов печати по объекту переноса и способу его получения, разграничивающая AJP, AFN [13], dADW [14] и отечественную технологию САП.

Проанализирована аналитическая модель баланса расходов несущего и фокусирующего газов в приближении несжимаемой среды [4, 5, 7], рассчитаны числа Стокса и поперечные отклонения траекторий частиц; показана ограниченная применимость модели при высоких скоростях истечения. Рассмотрены особенности фокусировки при истечении в атмосферу и в динамический вакуум; для оценки границ континуального и кинетического описания введено локальное число Кнудсена, разграничивающее области применимости уравнений Навье–Стокса (с условием прилипания либо скольжения Максвелла), переходного кинетического и свободномолекулярного режимов [19, 21, 22]; отмечена эффективность гибридного численного подхода, сочетающего вычислительную гидрогазодинамику (CFD) и прямое статистическое моделирование методом Монте-Карло (DSMC), при одновременном наличии нескольких режимов течения в одной установке.

Рассмотрены численные подходы к моделированию течений газа с наночастицами на основе полных уравнений Навье–Стокса с лагранжевой трассировкой частиц, включающей силу аэродинамического сопротивления (с поправками Каннингема и Эпштейна на разреженность [23–25]), стохастическую силу броуновского движения и силу тяжести, а также методы определения ширины пятна осаждения и контроля сеточной сходимости расчётов. Показано, что морфология агломератов наночастиц существенно снижает эффективность их фокусировки из-за пониженной эффективной плотности, а лазерная модификация агломератов в компактные квазисферические частицы повышает число Стокса и улучшает фокусировку.

По результатам анализа литературы установлено, что количественно валидированное описание движения полидисперсного потока сухих наночастиц в сопле с ограждающим газом при истечении в динамический вакуум отсутствует, а критерии выбора параметров лазерного преобразования агломератов не формализованы, что определило цель и задачи диссертационной работы.

Глава 2. Применяемые в работе методы исследования. Представлены экспериментальная установка и вычислительный подход. Исследования выполнены на макете принтера сухой аэрозольной печати, созданном в МФТИ. Его основные узлы — газоразрядная ячейка, генератор импульсных токов, лазерный оптимизатор, фокусирующая система, камера печати, координатный стол и вакуумная система, обеспечивающая режим динамического вакуума (порядка 5000 Па). Наночастицы получают электрической эрозией электродов в потоке аргона; синтезированные частицы агломерируют при транспортировании, после чего поступают в проточную ячейку лазерной модификации на основе импульсного лазера CNI AO-S-1064 (1064 нм, 5 нс). Функциональная схема макета приведена на рисунке 1.

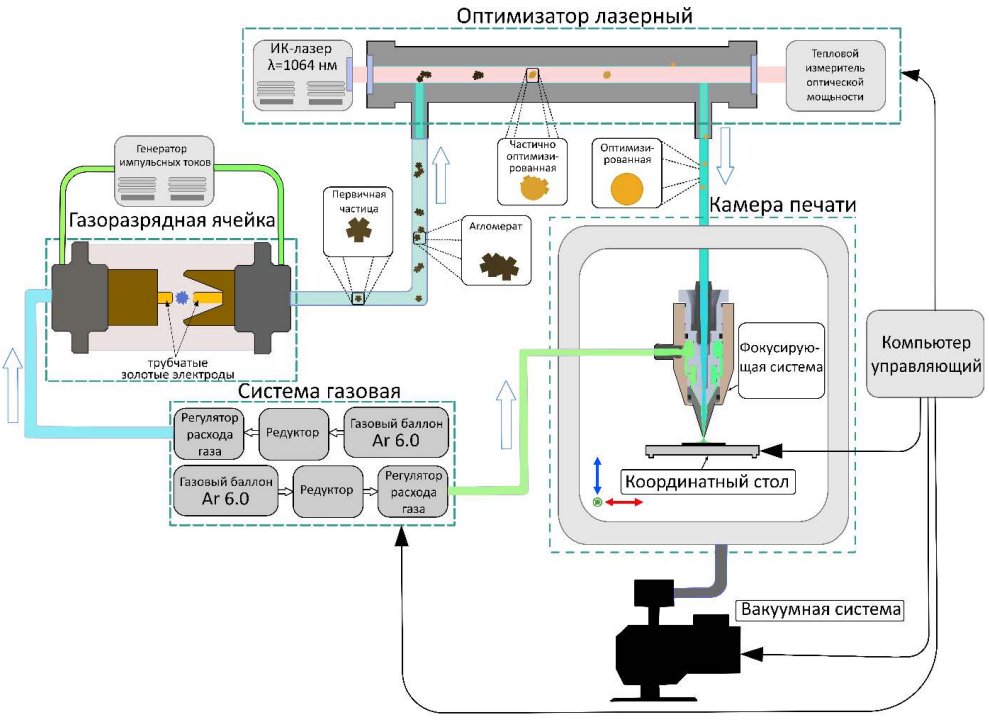


Рисунок 1 — Функциональная схема макета принтера сухой аэрозольной печати

Подготовленный аэрозоль подают в центральный канал коаксиальной фокусирующей системы, а чистый аргон — через кольцевой зазор; поток истекает через выходное отверстие сопла в камеру печати и осаждается на подвижную подложку.

Распределение частиц по размерам и их счётную концентрацию измеряли анализатором дифференциальной электрической подвижности SMPS 3936 (TSI Inc.); морфологию отобранных частиц — просвечивающей электронной микроскопией (JEM-2100), изображения напечатанных структур — растровой электронной микроскопией. Рельеф напечатанных линий измеряли оптическим конфокальным профилометром SNeox (не менее трёх поперечных профилей на линию); при гауссовой форме профиля определяли полную ширину на половине высоты F, среднеквадратичное отклонение σ и ширину $\delta = 4\sigma$, соответствующую приблизительно 95 % распределения — такой же критерий применяли к расчётным профилям осаждения.

Численные расчёты выполнены методом конечных элементов в COMSOL Multiphysics 6.2: сначала определяли стационарные поля скорости, давления и температуры аргона (модуль Non-Isothermal Flow), затем рассчитывали траектории частиц в полученном поле течения (модуль Particle Tracing for Fluid Flow) в осесимметричной постановке. Для проверки решения последовательно измельчали сетку; контрольным параметром служило среднее абсолютное давление в выходном сечении сопла, изменение которого при переходе от средней к мелкой сетке составило менее 1 %.

Глава 3. Аналитическая модель газодинамической фокусировки и её экспериментальная верификация. В приближении несжимаемого ламинарного течения степень сжатия струи ψ связана с отношением расходов фокусирующего и несущего газов χ. Для частиц золота диаметром 70 нм число Стокса составило 6,70 при поперечном отклонении 0,26 мкм; для платины, серебра и никеля того же

диаметра числа Стокса также превышают единицу при отклонениях менее 1 мкм. Для алюминия диаметром 70 нм число Стокса равно 0,94, а отклонение достигает 1,86 мкм; при увеличении диаметра до 120 нм число Стокса возрастает до 2,68, а отклонение снижается до 0,63 мкм.

Таблица 1 — Числа Стокса и поперечные отклонения траекторий частиц при радиусе аэрозольного потока 12,5 мкм и скорости аргона с/2

Тип частиц	**Плотность, г/см³**	**Диаметр частиц, нм**	**Число Стокса**	**Поперечное отклонение, мкм**
Микрокапли чернил (30 вес.% Pt)	1,3	1000	85,8	0,02
Pt	21,1	70	7,32	0,24
Au	19,32	70	6,70	0,26
Ag	10,5	70	3,64	0,48
Ni	8,9	70	3,09	0,57
Al	2,7	70	0,94	1,86
Al	2,7	120	2,68	0,63

Сопоставление с чернильными микрокаплями (числа Стокса 80–90) показывает, что оптимизированные сухие наночастицы металлов по условиям фокусировки им уступают, но остаются в области эффективной фокусировки при условии предварительного преобразования рыхлых агломератов в компактные квазисферические частицы.

Экспериментальную проверку выполнили с квазисферическими наночастицами золота (модальный размер около 120 нм) и соплом с выходным диаметром 100 мкм; на подложке получены линии шириной около 30 мкм с ровными краями. Распределение частиц по размерам и РЭМ-изображение напечатанной линии приведены на рисунке 2. Аналитическая модель даёт диаметр струи около 25 мкм; разность (~5 мкм) объясняется аэродинамическим уширением струи и полидисперсностью аэрозоля. Результаты подтверждают применимость

аналитической модели для предварительной инженерной оценки и показывают необходимость более детального описания течения, развиваемого в главе 4.

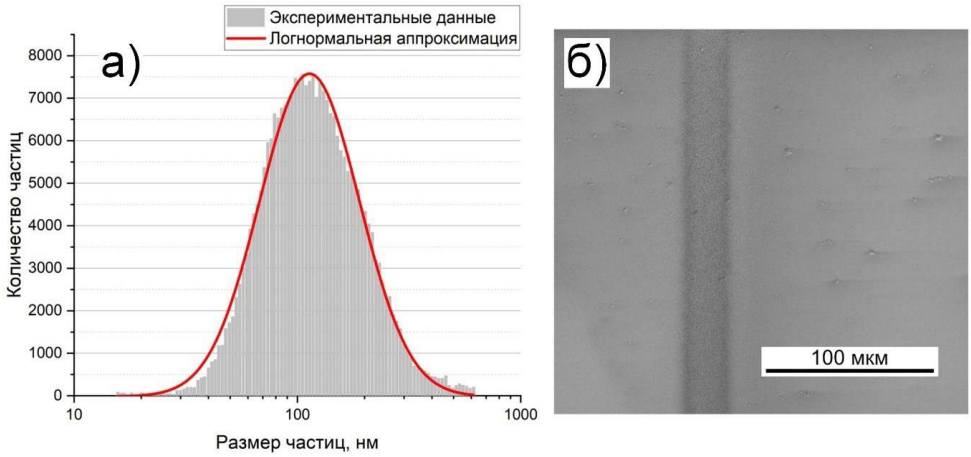


Рисунок 2 — Результаты сухой аэрозольной печати квазисферическими наночастицами золота: (а) — распределение частиц по размерам на выходе из фокусирующего сопла; (б) — РЭМ-изображение напечатанной линии, ширина линии около 30 мкм

Глава 4. Численная оптимизация профиля канала фокусирующего сопла и верификация модели. Разработана численная модель на основе стационарных уравнений Навье–Стокса для сжимаемого теплопроводного газа с лагранжевой трассировкой частиц; граничные условия на стенках сопла задавались с учётом локального числа Кнудсена (прилипание либо скольжение Максвелла). Геометрические параметры фокусирующей системы показаны на рисунке 3.

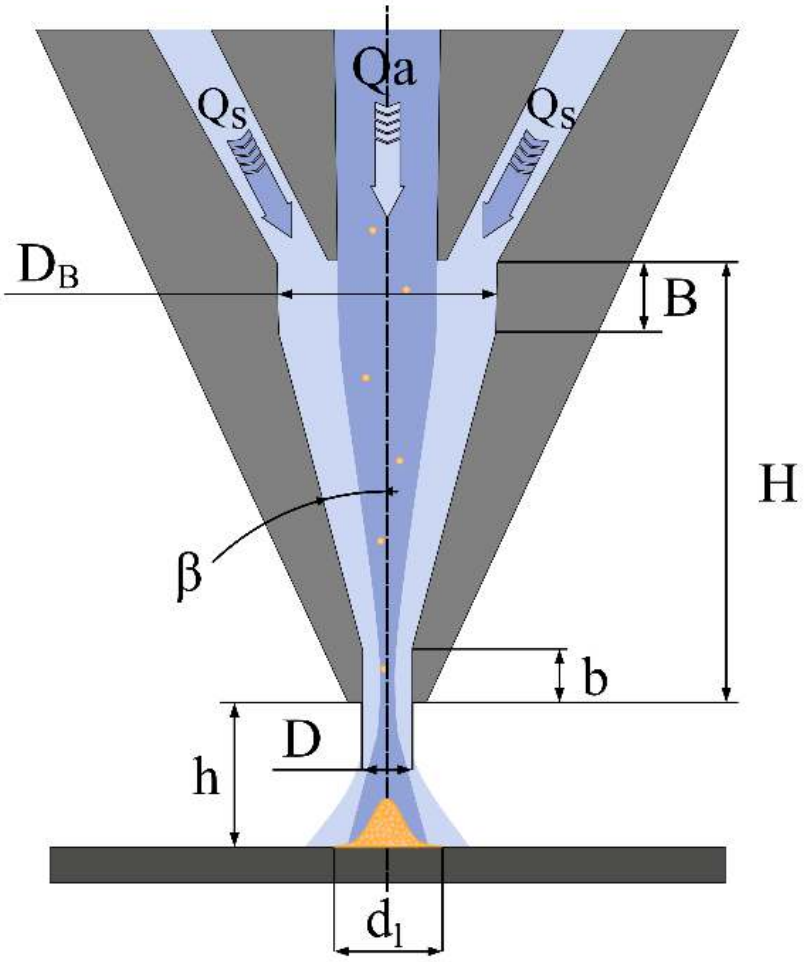


Рисунок 3 — Схема фокусирующей системы: D и Dв — диаметры выходного и верхнего цилиндрических участков; b и B — их длины; h — расстояние от выхода сопла до подложки; Q_a и Q_s — расходы аэрозоля и фокусирующего газа

Параметрическое исследование показало, что ширина пятна осаждения возрастает с увеличением доли аэрозольного потока в суммарном расходе газа, а оптимальная длина выходного цилиндрического участка *b* зависит от диаметра частиц; для обоих рассмотренных размеров частиц оптимальная длина входного участка *B* составила 2,5 мм. Зависимости относительного размера пятна осаждения от длины выходного участка приведены на рисунке 4.

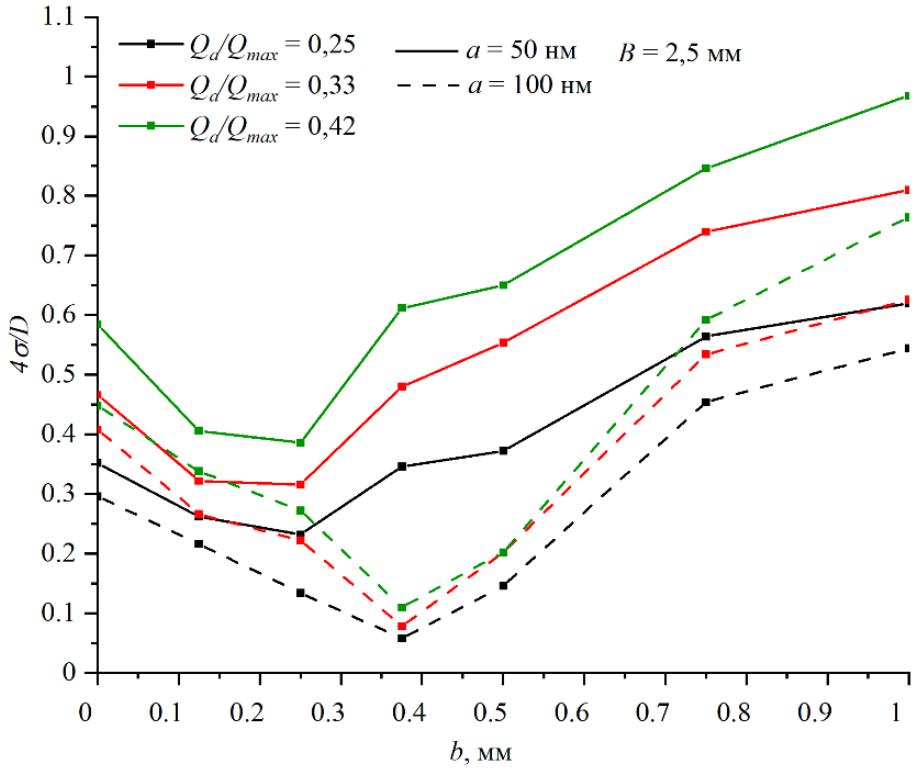


Рисунок 4 — Зависимости относительного размера пятна осаждения наночастиц от длины выходной цилиндрической части канала сопла b для частиц диаметром 50 и 100 нм

Таблица 2 — Расчетные оптимумы геометрии сопла с выходным диаметром 200 мкм при B = 2,5 мм

Диаметр частиц Au, нм	**Длина выходного участка b, мм**	**Минимальная ширина пятна, мкм**
50	0,250	46,5
100	0,375	11,5

Для сопла с выходным диаметром 200 мкм минимальная расчётная ширина пятна осаждения составила 46,5 мкм (частицы 50 нм, b = 0,25 мм, B = 2,5 мм) и 11,5 мкм (частицы 100 нм, b = 0,375 мм, B = 2,5 мм). Независимость влияния длин b и B на ширину пятна подтверждена дополнительными расчётами при фиксированном B = 2,5 мм.

Для экспериментальной проверки использовали сопло с выходным диаметром 200 мкм, B = 1,9 мм и b = 0,5 мм; расстояние до подложки — 0,5 мм. Минимальная

экспериментальная ширина линии составила 51,2 мкм; максимальное расхождение между расчётом и экспериментом в исследованном диапазоне расходов не превысило 11 %. Сопоставление расчётных и экспериментальных значений приведено на рисунке 5. В числе ограничений модели — допущение о полном осаждении частицы при первом контакте с подложкой без учёта возможного отскока и шероховатости поверхности.

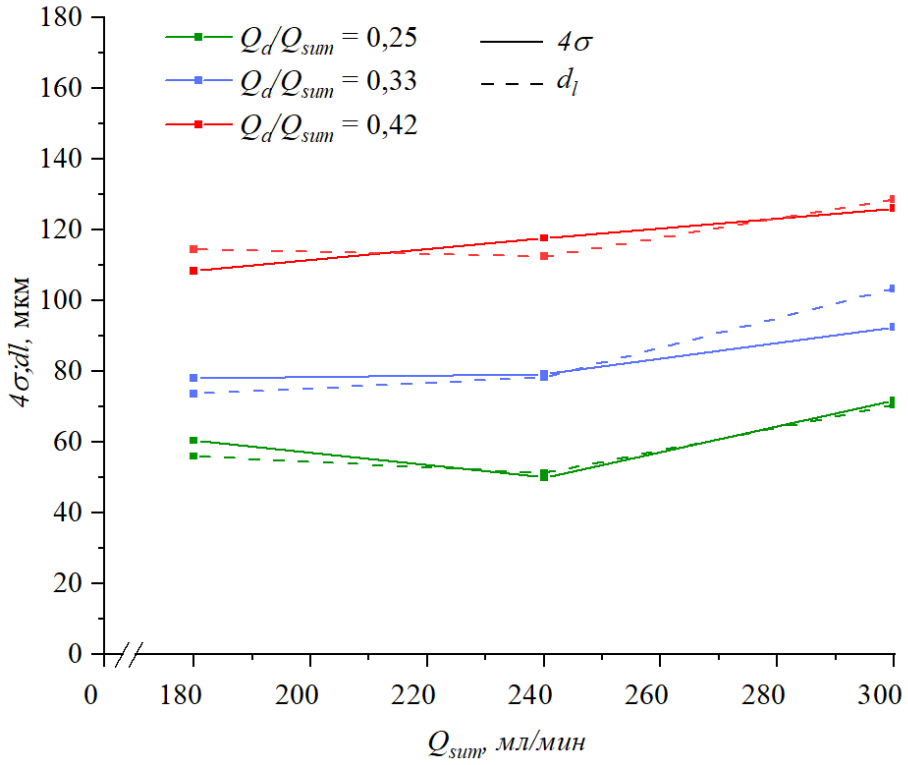


Рисунок 5 — Экспериментальные и расчётные значения размера пятна осаждения фокусируемого аэрозольного потока от полного объёмного расхода газа

Глава 5. Метод энергоэффективного преобразования агломератов наночастиц в потоке газа в уединённые наночастицы околосферической формы. Разработан способ последовательного определения критической плотности энергии, длительности импульса и минимально допустимой частоты следования импульсов лазерного излучения, обеспечивающих полное преобразование агломератов золота в компактные квазисферические частицы при минимальных энергозатратах; способ защищён патентом РФ № 2828069 [A9].

Для лазера с длительностью импульса 5 нс (1064 нм) критическая плотность энергии составила 4,4 мДж/см², для лазера с длительностью 14 нс (1053 нм) — около 13,5 мДж/см², то есть сокращение длительности импульса втрое снизило необходимую плотность энергии. Соответствующие зависимости приведены на рисунке 6.

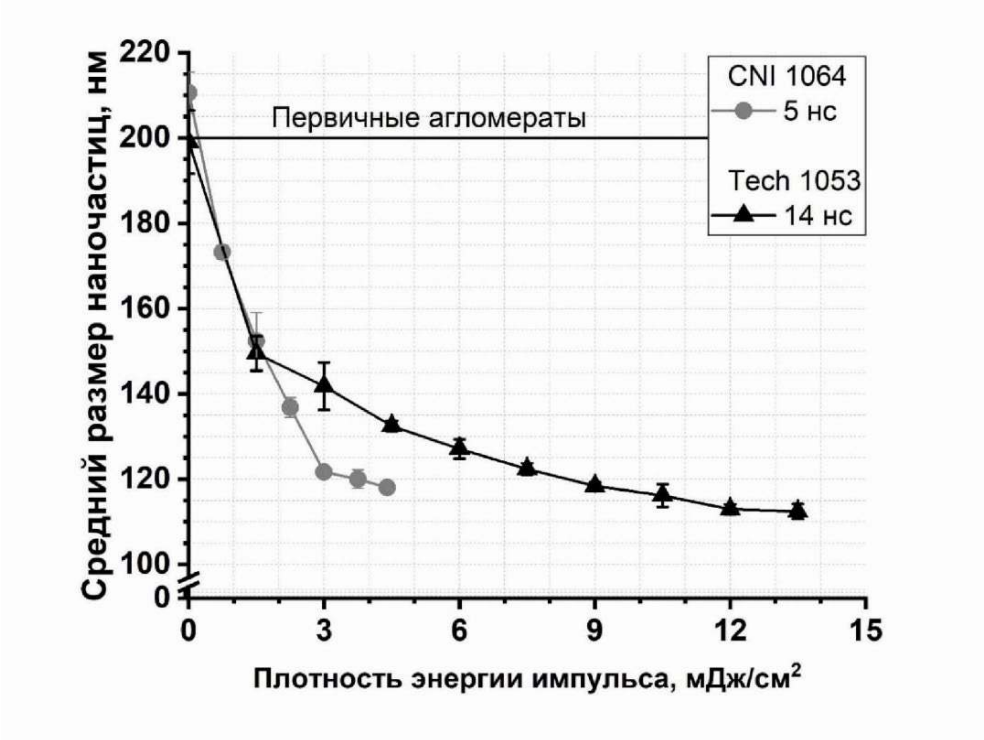


Рисунок 6 — Зависимость среднего размера наночастиц от плотности энергии излучения при частоте следования импульсов 500 Гц для лазеров с длительностью импульса 5 нс (CNI 1064) и 14 нс (Tech 1053)

Электронная микроскопия подтвердила преобразование разветвлённых агломератов в частицы, близкие к сферическим, со средним размером около 115 нм (рисунок 7).

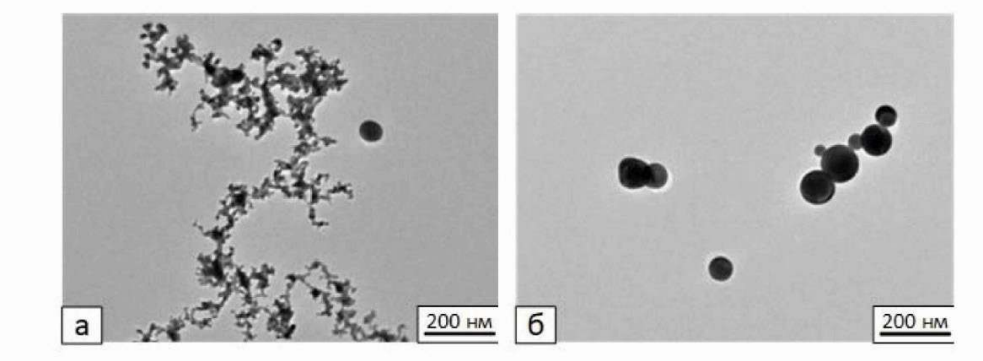


Рисунок 7 — ПЭМ-изображения: (а) первичных агломератов и (б) квазисферических наночастиц после обработки лазерным излучением с длиной волны 1064 нм, длительностью импульса 5 нс и плотностью энергии 4,4 мДж/см²

При длительности импульса 14 нс и плотности энергии 12,7 мДж/см² определена минимальная частота следования импульсов около 22 Гц, связанная с условиями транспортирования аэрозоля через зону облучения (рисунок 8).

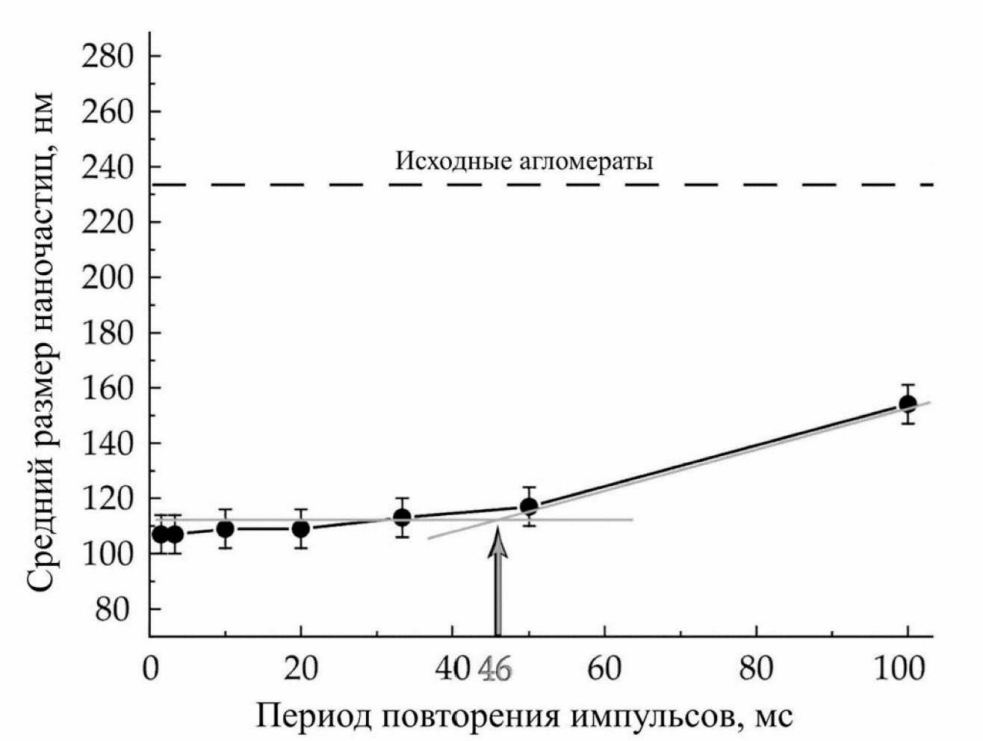


Рисунок 8 — Зависимость среднего размера наночастиц от периода следования лазерных импульсов при плотности энергии 12,7 мДж/см² и расходе аргона 200 мл/мин

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе разработана и экспериментально проверена численная модель газодинамической фокусировки потоков сухих наночастиц и предложен способ подготовки аэрозоля посредством энергоэффективной лазерной модификации агломератов. Получены следующие основные результаты.

1. На основе анализа аэрозольных методов печати обоснована необходимость совместного рассмотрения профиля канала сопла, условий истечения и характеристик частиц. Разработана методика, объединяющая аналитические оценки, расчёт течения сжимаемого теплопроводного газа, трассировку наночастиц и экспериментальное измерение параметров осаждаемых линий.

2. В приближении несжимаемого газа выполнены оценки инерционности частиц и поперечного отклонения их траекторий. Для сопла диаметром 100 мкм при $\psi = 0{,}25$ и скорости аргона $c/2$ показано, что у квазисферических частиц из материалов плотностью более 5 г/см³ со средним диаметром более 70 нм число Стокса превышает единицу, а расчётное поперечное отклонение составляет менее 1 мкм. Экспериментально получены линии из наночастиц золота шириной около 30 мкм, согласующиеся с аналитическими оценками.

3. Разработана численная модель газодинамической фокусировки на основе стационарных уравнений Навье–Стокса для сжимаемого теплопроводного газа и лагранжевой трассировки частиц. Учтены аэродинамическое сопротивление с поправками на скольжение, броуновское движение, сила тяжести и реальное распределение наночастиц по размерам. При измельчении сетки изменение среднего давления в выходном сечении составило менее 1 %.

4. Для сопла диаметром 200 мкм при истечении в динамический вакуум с давлением 5000 Па определены рациональные длины цилиндрических участков канала. Для частиц золота диаметром 50 нм минимальная расчётная ширина пятна 46,5 мкм получена при $b = 0{,}25$ мм и $B = 2{,}5$ мм; для частиц диаметром 100 нм ширина

11,5 мкм — при b = 0,375 мм и B = 2,5 мм. Установлена зависимость рациональной длины выходного участка от размера частиц.

5. Численная модель проверена экспериментально для сопла диаметром 200 мкм с b = 0,5 мм, B = 1,9 мм и расстоянием до подложки 0,5 мм. При использовании полидисперсного потока частиц золота со средним диаметром 70 нм минимальная ширина напечатанной линии составила 51,2 мкм. В исследованных режимах расхождение расчёта и эксперимента не превышало 11 %. Результат подтверждает применимость модели в проверенных условиях; расчётные минимумы для монодисперсных частиц относятся к другим геометрическим параметрам.

6. Разработан и защищён патентом РФ № 2828069 способ последовательного выбора параметров лазерного преобразования агломератов в уединённые квазисферические частицы. Для агломератов золота при длине волны 1064 нм и длительности импульса 5 нс критическая плотность энергии составила 4,4 мДж/см²; сформированы компактные частицы со средним размером около 115 нм. По сравнению с исследованным режимом импульсов длительностью 14 нс требуемая плотность энергии уменьшилась примерно втрое. В отдельной серии при длительности импульса 14 нс и плотности энергии 12,7 мДж/см² определена минимальная частота следования около 22 Гц для исследованных условий транспортирования аэрозоля.

7. Совокупность численной модели, результатов оптимизации сопла и способа лазерной подготовки частиц составляет основу для проектирования систем сухой аэрозольной печати с разрешением на уровне десятков микрометров. Дальнейшее развитие связано с экспериментальной проверкой рассчитанных оптимальных геометрий, уточнением взаимодействия частиц с подложкой и расширением диапазона размеров и материалов частиц.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных журналах

А1. Иванов В. В., Ефимов А. А., Борисов В. И., Уразов М. Н., Корнюшин Д. В., Мусаев А. Г., Ворошилова В. А., Долгов В. А., Симоненко Н. П., Иванов М. С. Формирование микроструктур методами бесконтактной аэрозольной печати наночастицами // Журнал технической физики. — 2025. — Т. 95, № 9. — С. 1725–1732. — DOI: 10.61011/JTF.2025.09.61233.76-25.

А2. Иванов М. С., Ворошилова В. А., Долгов В. А., Борисов В. И., Корнюшин Д. В., Свирелкин Г. М., Иванов В. В. Численная оптимизация профиля канала сопла аэрозольного принтера для наилучшей фокусировки потока аэрозоля при выходе в вакуум // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. — 2026. — № 4. — С. 69–82. — DOI: 10.7868/S3034534026040057.

Тезисы докладов

А3. Иванов В. В., Ефимов А. А., Арсенов П. В., Борисов В. И., Уразов М. Н., Корнюшин Д. В., Ворошилова В. А., Долгов В. А., Иванов М. С. Формирование микроструктур методами бесконтактной аэрозольной печати наночастицами // Нанофизика и наноэлектроника. XXIX симпозиум (Нижний Новгород, 10–14 марта 2025 г.) : тезисы докладов. — Нижний Новгород, 2025. — С. 454.

А4. Определение основных параметров виртуального импактора для сухой аэрозольной печати // Печатная и гибкая электроника: оборудование, материалы и технологии : тезисы докладов. — 2025.

А5. Принтер сухой аэрозольной печати и возможности его применения в перспективной микроэлектронике // Печатная и гибкая электроника: оборудование, материалы и технологии : тезисы докладов. — 2025.

А6. Принтер сухой аэрозольной печати для формирования микроразмерных объектов на различных подложках // Научно-техническая конференция «СВЧ-электроника-2023» : тезисы докладов. — 2023.

А7. Оборудование для прямого формирования элементов электроники сухой аэрозольной печатью с одновременным лазерным спеканием // III Научно-техническая конференция Союзного государства «Электронное машиностроение» : тезисы докладов. — 2026.

А8. Возможные применения методов аэрозольной печати в создании оптоэлектронных устройств // XXVIII Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике : тезисы докладов. — 2026.

Патент на способ

А9. Патент RU 2828069 C1, Российская Федерация. Способ оптимизации значений параметров импульсного лазерного излучения, обеспечивающего максимальную энергоэффективность преобразования агломератов наночастиц в потоке газа в уединенные наночастицы околосферической формы / Иванов В. В., Иванов М. С., Ворошилова В. А., Корнюшин Д. В., Долгов В. А., Уразов М. Н., Борисов В. И. — № 2023131463; заявл. 30.11.2023; опубл. 07.10.2024, Бюл. № 28.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Madou, M. J. Fundamentals of Microfabrication and Nanotechnology. Vol. 2, Manufacturing Techniques for Microfabrication and Nanotechnology / M. J. Madou. — 3rd ed. — Boca Raton : CRC Press, 2011. — P. 403–405.

2. Wiklund, J. A Review on Printed Electronics: Fabrication Methods, Inks, Substrates, Applications and Environmental Impacts / J. Wiklund, A. Karakoç, T. Palko // Journal of Manufacturing and Materials Processing. — 2021. — Vol. 5, No. 3. — P. 89.

3. Advanced Nanomaterials, Printing Processes, and Applications for Flexible Hybrid Electronics / S. Park, H. Kim, J. H. Kim, W. H. Yeo // Materials. — 2020. — Vol. 13, No. 16. — P. 3587.

4. Secor, E. B. Principles of aerosol jet printing / E. B. Secor // Flexible and Printed Electronics. — 2018. — Vol. 3, No. 3. — P. 035002.

5. A review of aerosol jet printing—a non-traditional hybrid process for micro-manufacturing / N. J. Wilkinson, M. A. A. Smith, R. W. Kay, R. A. Harris // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. — 2019. — Vol. 105, No. 11. — P. 4599–4619.

6. Пат. № 7108894 US. Direct Write System : № 10/072,605 : заявл. 05.02.2002 : опубл. 19.09.2006 / M. J. Renn.

7. Binder, S. Analytical Investigation of Aerosol Jet Printing / S. Binder, M. Glatthaar, E. Rädlein // Aerosol Science and Technology. — 2014. — Vol. 48, No. 9. — P. 924–929.

8. Формирование микроструктур методами бесконтактной аэрозольной печати наночастицами / В. В. Иванов, А. А. Ефимов, В. И. Борисов, М. Н. Уразов, Д. В. Корнюшин, А. Г. Мусаев, В. А. Ворошилова, В. А. Долгов, Н. П. Симоненко, М. С. Иванов // Журнал технической физики. — 2025. — Т. 95, № 9. — С. 1725–1732.

9. Controlled focusing of silver nanoparticles beam to form the microstructures on substrates / A. A. Efimov, G. N. Potapov, A. V. Nisan, V. V. Ivanov // Results in Physics. — 2017. — Vol. 7. — P. 440–443.

10. Modification of Aerosol Gold Nanoparticles by Nanosecond Pulsed-Periodic Laser Radiation / K. Khabarov, M. Nouraldeen, S. Tikhonov, A. Lizunova, A. Efimov, V. Ivanov // Nanomaterials. — 2021. — Vol. 11, No. 10. — P. 2701.

11. Wang, X. Aerodynamic Focusing of Nanoparticles : I. Guidelines for Designing Aerodynamic Lenses for Nanoparticles / X. Wang, F. E. Kruis, P. H. McMurry // Aerosol Science and Technology. — 2005. — Vol. 39, No. 7. — P. 611–623.

12. Aerosol focusing in micro-capillaries: Theory and experiment / I. S. Akhatov, J. M. Hoey, O. F. Swenson, D. L. Schulz // Journal of Aerosol Science. — 2008. — Vol. 39, No. 8. — P. 691–709.

13. Aerodynamically Focused Nanoparticle (AFN) Printing: Novel Direct Printing Technique of Solvent-Free and Inorganic Nanoparticles / G. Lee, J. Park, C. Kim, H. Yoon, J. Yang, S. Ahn // ACS Applied Materials & Interfaces. — 2014. — Vol. 6, No. 19. — P. 16466–16471.

14. Aghajani, S. Process and nozzle design for high-resolution dry aerosol direct writing (dADW) of sub-100 nm nanoparticles / S. Aghajani, A. Accardo, M. Tichem // Additive Manufacturing. — 2022. — Vol. 54. — P. 102729.

15. Computational fluid dynamics and experimental validation of aerosol jet printing with multi-stage flow focusing lenses / S. Ramesh, Z. Xu, I. V. Rivero, D. R. Cormier // Journal of Manufacturing Processes. — 2023. — Vol. 95. — P. 312–329.

16. Supersonic jet deposition of silver nanoparticle aerosols: Correlations of impact conditions and film morphologies / C. Huang, W. Nichols, D. O'Brien, M. Becker, D. Kovar, J. Keto // Journal of Applied Physics. — 2007. — Vol. 101. — P. 064902.

17. Oberkampf, W. Verification and Validation in Scientific Computing / W. Oberkampf, C. Roy. — 1st ed. — Cambridge University Press, 2010.

18. Anderson, J. D. Modern Compressible Flow: With Historical Perspective / J. D. Anderson. — 2nd ed. — New York : McGraw-Hill, 1990. — 650 p.

19. Karniadakis, G. Microflows and Nanoflows: Fundamentals and Simulation / G. Karniadakis, A. Beskok, N. R. Aluru. — New York : Springer, 2005.

20. Aniskin, V. M. Effect of nozzle size on supersonic microjet length / V. M. Aniskin, A. A. Maslov, S. G. Mironov // Technical Physics Letters. — 2011. — Vol. 37, No. 11. — P. 1046–1048.

21. Коган, М. Н. Динамика разреженного газа / М. Н. Коган. — М. : Наука, 1980. — 440 с.

22. Kumar, A. Analysis of Micro-nozzle Flow Using Navier–Stokes and DSMC Method and Locating the Separation Plane Based on Modified Knudsen Number / A. Kumar, M. K. Sukesan, S. S. R. // Fluid Mechanics and Fluid Power, Volume 4 : Lecture Notes in Mechanical Engineering / eds. K. Singh, S. Dutta, S. Subudhi, N. Singh. — Singapore : Springer Nature Singapore, 2024. — P. 461–474.

23. Moshfegh, A. A Novel Slip Correction Factor for Spherical Aerosol Particles / A. Moshfegh, M. Shams, G. Ahmadi, R. Ebrahimi // World Academy of Science, Engineering and Technology. — 2008. — Vol. 2, No. 10. — P. 1121–1126.

24. Millikan, R. A. The General Law of Fall of a Small Spherical Body through a Gas, and its Bearing upon the Nature of Molecular Reflection from Surfaces / R. A. Millikan // Physical Review. — 1923. — Vol. 22, No. 1. — P. 1–23.

25. Epstein, P. S. On the Resistance Experienced by Spheres in their Motion through Gases / P. S. Epstein // Physical Review. — 1924. — Vol. 23, No. 6. — P. 710–733.

26. Altman, D. G. Statistics notes: The normal distribution / D. G. Altman, J. M. Bland // BMJ. — 1995. — Vol. 310, No. 6975. — P. 298.

27. ГОСТ 5197-85. Вакуумная техника. Термины и определения. — М. : Изд-во стандартов, 1985.

[Дата подписания в печать]

[Формат и объем печатного издания]

[Тираж и номер заказа]