

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор
Федерального государственного
бюджетного научного учреждения
«Федеральный исследовательский
центр Институт прикладной физики
им. А.В. Гапонова-Грехова Россий-
ской академии наук»



Доктор физико-математических на-
ук, академик РАН

Денисов Григорий Геннадьевич

«12» февраля 2026 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации " Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»" о диссертационной работе Буторина Павла Сергеевича на тему " Эффективный плазменный источник излучения экстремального ультрафиолетового диапазона с длиной волны $\lambda = 11.2$ нм для нанолитографии: особенности физических процессов и методы управления интенсивностью" на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности: 1.3.6 – Оптика

В диссертационной работе Павла Сергеевича Буторина представлены результаты подробного исследования возбуждаемой в газовой струе из ксенона лазерной искры, которая рассматривается в качестве источника излучения экстремального ультрафиолетового диапазона (ЭУФ, EUV) с длиной волны $\lambda = 11.2$ нм для литографии следующего поколения на указанной длине волны. Представленный соискателем материал отражает его сложную, мультидисциплинарную, на стыке двух разделов физики – оптики ЭУФ излучения и физики лазерной плазмы – структуру.

1. Актуальность темы исследования

Развитие современной микроэлектроники требует постоянного уменьшения топологических размеров элементов микросхем. Этот прогресс во многом достигается благодаря развитию проекционной фотолитографии на длине волны 193 нм. Благодаря применению различных методов повышения разрешающей способности (шаблоны с фазовым сдвигом, иммерсия, многократное экспонирование) удалось достичь разрешения до 8 нм, что более чем в 20 раз превышает длину волны экспонирующего излучения. Однако цена этого достижения крайне высока: сложность оборудования и технологического процесса, огромный, десятки процентов, брак.

Внедрение в 2018-2019 гг. промышленной литографии ЭУФ диапазона на длине волны 13.5 нм с источником излучения в виде лазерной плазмы, возбуждаемой на мишени в виде микрошариков жидкометаллического олова, стало прорывом в освоении наноразмерных технологических норм. В настоящее время микросхемы с критическими размерами элементов от 16 нм и менее изготавливаются только с применением ЭУФ литографии. Однако огромная цена и стоимость эксплуатации ЭУФ литографов сделали их практически не доступными для большинства участников рынка. Главная причина этого – "грязный" оловянный источник и крупногабаритный CO₂ лазер.

Поэтому поиск новых подходов в ЭУФ литографии является крайне актуальным. Причем он касается как замены "грязного" оловянного источника "чистым", так и более коротких длин волн. В этой связи разработка эффективного и "чистого" источника, в котором в качестве мише-

ни используется струя многоэлектронного инертного ксенона, наиболее интенсивно излучающего на $\lambda = 11.2$ нм, представляет собой актуальную задачу, лежащую на переднем крае прикладной оптики и физики взаимодействия излучения с веществом.

Актуальность диссертационного исследования для специальности «Оптика» обусловлена комплексом специфических проблем, связанных с генерацией и транспортировкой столь коротковолнового излучения. Ключевыми являются вопросы создания лазерной плазмы с оптимальными спектральными характеристиками, что требует глубокого изучения процессов излучения высокозарядных ионов, а также задач эффективной коллекции и транспортировки этого излучения в условиях сильного поглощения всеми материалами. Исследование методов управления интенсивностью и стабильностью выходного излучения напрямую связано с фундаментальными оптическими проблемами: взаимодействием мощного лазерного излучения с мишенью и спектроскопией плотной плазмы.

Разработка и оптимизация такого источника открывает новые возможности не только для микроэлектроники, но и для смежных областей, таких как нанопотоника, рентгеновская микроскопия и метрология.

Таким образом, актуальность темы диссертационной работы П.С. Буторина не вызывает сомнений.

2. Новизна исследования и полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Проведённое соискателем исследование обладает существенной научной новизной, а полученные результаты вносят значимый вклад в развитие технологий источников ЭУФ излучения и физики лазерной плазмы.

Новизна работы связана, во-первых, с выбранной рабочей длиной волны рассматриваемого источника излучения – работы с лазерно-плазменными источниками излучения на основе Хе газоструйной мишени и с длиной волны $\lambda = 11.2$ нм ведутся сейчас очень ограниченным числом исследователей. При этом, как отмечено и в диссертационной работе, и в другой научной литературе по теме, рассматриваемый источник является перспективной альтернативой используемому сейчас в литографическом производстве источнику излучения с Sn-мишенью.

Во-вторых, в материал диссертации входят описания диагностических методов, которые соискателю пришлось разработать самостоятельно и применить в своей работе. Эти методы – одни из немногих существующих сейчас путей экспериментальной оценки внутренних параметров неравновесной короткоживущей лазерной плазмы. До сих пор данные о таких параметрах плазмы, как её средний ионный заряд и температура, получали на основании численного моделирования.

Кроме того, впервые для источника данного типа экспериментально обнаружена и обоснована ключевая роль гидродинамического истечения плазмы за пределы освещаемой лазером области в определении времени жизни плазменного образования, которое может быть в 2–3 раза короче длительности возбуждающего лазерного импульса.

Впервые для лазерно-плазменного источника с Хе газоструйной мишенью экспериментально установлено, что оптимальной для максимизации выхода ЭУФ-излучения является геометрия внефокусного облучения расширенным лазерным пучком (диаметром ~ 400 мкм), что привело к рекордному значению коэффициента конверсии для источников такого типа.

3. Значимость для науки и производства полученных автором диссертации результатов

Диссертация Буторина П. С. является сложным многокомпонентным исследованием на стыке двух наук – оптики и весьма специфической плазмы, лазерной искры.

Основным, самым важным результатом работы является открытие подобных друг другу зависимостей поглощенной доли энергии лазерного импульса и излученной плазмой энергии на длинах волн 11 и 13.5 нм от диаметра облучающего плазму лазерного пучка. Последнее при максимально широком облучающем пучке позволило получить значение коэффициента преобразования энергии лазерного импульса в излучение плазмы на длине волны 11 нм, близкое к 4%, что является на сегодняшний день мировым рекордом. Полученное значение обосновывает воз-

возможность и необходимость применения рассмотренного в диссертации источника излучения в промышленной EUV литографии.

Кроме того, до сих пор в научной литературе не существовало комплексных, связанных между собой исследований поглощения ИК лазерного излучения в возбуждаемой им плазме и EUV излучения из нее.

4. Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов

Результаты, подтверждающие высокую интенсивность излучения плазмы на длине волны $\lambda = 11.2$ нм и рекордный коэффициент конверсии, являются весомым аргументом для продолжения опытно-конструкторских работ по созданию эффективного источника ЭУФ-излучения. Рекомендуется использовать данные диссертации в качестве научно-технического обоснования при разработке технических заданий в проектах по созданию прототипов литографических установок.

Разработанный компактный, эффективный и «чистый» источник коротковолнового излучения может быть рекомендован к использованию в качестве базового элемента для: лабораторных рентгеновских микроскопов; установок для калибровки и тестирования многослойной ЭУФ- и рентгеновской оптики, а также радиационно-стойких детекторов; систем для проекционной нанолитографии в исследовательских целях.

5. Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и заключений

Представленные в диссертации научные положения, количественные результаты и выводы являются вполне обоснованными и достоверными. Их надежность обеспечивается современной методической базой, корректной статистической обработкой, глубоким физическим анализом и полной внутренней согласованностью всех частей исследования. Полученные данные формируют прочный экспериментальный фундамент для дальнейших теоретических и прикладных разработок в области ЭУФ-источников и диагностики плотной лазерной плазмы.

6. Оценка содержания диссертации, ее завершенность в целом

Диссертационная работа Буторина Павла Сергеевича "Эффективный плазменный источник излучения экстремального ультрафиолетового диапазона с длиной волны $\lambda = 11.2$ нм для нанолитографии: особенности физических процессов и методы управления интенсивностью" является законченным научным исследованием по данной тематике, выполненным на высоком профессиональном уровне. Диссертация является высококачественной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение поставленной задачи по исследованию лазерно-плазменного источника излучения с длиной волны 11.2 нм и разработке средств его диагностики, имеющей существенное практическое значение для развития соответствующей отрасли знаний. Диссертация написана хорошим техническим языком и аккуратно оформлена.

7. Замечания по работе

1. Важным результатом работы является достижение высокого коэффициента конверсии лазерного излучения в коротковолновое. Однако полученная оценка этого коэффициента может быть подвержена методической погрешности, поскольку измерения интенсивности проводились лишь в одном фиксированном угле наблюдения. Отсутствие данных об угловом распределении излучения плазмы вносит неопределенность, так как используемая неосесимметричная геометрия мишени и лазерного луча, вкупе с поглощением в периферийном нейтральном газе, может приводить к существенной анизотропии излучаемой мощности.

2. В работе исследована зависимость выхода ЭУФ излучения от геометрии облучения, но слабо освещено влияние таких параметров, как длительность лазерного импульса и давление газа на входе в сопло. Как изменяется коэффициент конверсии при варьировании этих параметров? Это важно для оптимизации источника.

3. В тексте диссертации, видимо, содержатся опечатки в нумерации литературы. Так, например, приводится ссылка 62 в абзаце, посвященном обсуждению эффективности отражения многослойных зеркал в длинах волн короче 10 нм. Однако статья посвящена экспериментальному изучению и затем численному моделированию лазерно-плазменных источников излуче-

ния, а именно изучается влияние длительности импульса и длины волны лазера на коэффициент конверсии источника. Многослойная оптика в статье не обсуждается.

4. В заключении диссертационной работы в основных результатах написано, что интенсивность излучения плазмы измерена методом двухзеркальной Брэгговской спектрометрии. В главе 2 на рис.9 и далее в описании установки везде говорится про одно зеркало. Под словом «двухзеркальная» понимается, что использовалось два зеркала при проведении исследований? Если так, то термин не удачный, так как, как правило, он относится к случаю, когда в приборе используются два отражения.

5. В главе 5 на основе расчетов получены значения среднего заряда ионов плазмы и её температуры для случая «острой» фокусировки лазерного луча. При этом для более интересного с точки зрения приложений случая «широкой» фокусировки расчеты не приводятся. Почему в работе автор обсуждает только один из двух случаев?

Приведенные замечания не влияют на общую положительную оценку работы.

8. Соответствие автореферата основным положениям диссертации

Содержание автореферата полностью соответствует содержанию и основным положениям диссертационной работы.

9. Подтверждение опубликованных основных результатов диссертации в научной печати

Основные результаты представленной диссертационной работы изложены в 11 публикациях в российских и зарубежных рецензируемых научных изданиях (в том числе, журналах первого квартиля (Q1))

10. Заключение

На основании изложенного считаем, что диссертационная работа Буторина П.С. полностью соответствует специальности 1.3.6 – Оптика и удовлетворяет требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 и Положению о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Буторин Павел Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 – Оптика.

Отзыв ведущей организации на диссертационную работу Буторина П. С. подготовлен по итогам доклада соискателя на научном семинаре, состоявшемся «11» февраля 2026 года, и одобрен на заседании 12 февраля, протокол семинара по нанотехнологии и диагностике наноструктур №02/26.

д.ф.-м.н., член-корр. РАН, заведующий
отделом, ИФМ РАН – филиал ФГБНУ
«ФИЦ ИПФ им. А.В. Гапонова-Грехова РАН»
603950, Россия, Нижний Новгород, ГСП-105,
(8) 831 4179475, chkhalo@ipmras.ru



/ Н.И. Чхало /

к.ф.-м.н., с.н.с., ИФМ РАН – филиал ФГБНУ
«ФИЦ ИПФ им. А.В. Гапонова-Грехова РАН»
603950, Россия, Нижний Новгород, ГСП-105,
(8) 831 4179475, nechay@ipmras.ru



/ А.Н. Нечай /

Сведения об организации:

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»

603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46

Тел.: +7 (831) 436-64-21

e-mail: ipf-kan@ipfran.ru

<https://www.ipfran.ru/>



ПОДПИСЬ *Н.И. Чванов; А.Н. Герася*
ЗАВЕРЯЮ:
НАЧАЛЬНИК
ОТДЕЛА КАДРОВ ИФМ РАН
ОСИПЕНКО М.Л. *Osipenko*
11.02.2026 г.