ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА ФТИ 34.01.03.25
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе
Российской академии наук
по диссертации
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК
аттестационное дело №_____
решение диссертационного совета от 26 февраля 2026 г. № 4

О присуждении Буторину Павлу Сергеевичу,
гражданину Российской Федерации,
ученой степени кандидата физико-математических наук

Диссертация «Эффективный плазменный источник излучения экстремального ультрафиолетового диапазона с длиной волны λ = 11.2 нм для нанолитографии: особенности физических процессов и методы управления интенсивностью» по специальности 1.3.6. – «оптика» принята к защите 4 декабря 2025 г. протокол № 2, диссертационным советом ФТИ 34.01.03.25 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), расположенном по адресу: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул. д.26. Диссертационный совет утвержден приказом директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе от 15 июля 2025 г. № 02.01.02-153, приложение 3.

Соискатель Буторин Павел Сергеевич, 13 сентября 1995 года рождения, в 2019 году с отличием окончил магистратуру в СПбПУ по направлению подготовки 03.04.02 «физика». В 2023 году окончил аспирантуру в ФТИ им. А.Ф. Иоффе по направлению 03.06.01 - «Физика и астрономия». Кандидатские экзамены, в том числе по специальности 1.3.6. – «оптика», успешно сданы соискателем в ФТИ им. А.Ф. Иоффе в 2022 году. В настоящее время соискатель работает в должности младшего научного сотрудника лаборатории квантоворазмерных гетероструктур ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Научный руководитель – Калмыков Сергей Георгиевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории квантоворазмерных гетероструктур ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Официальные оппоненты:

1. Анкудинов Александр Витальевич, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физико-химических свойств

полупроводников ФТИ им. А.Ф. Иоффе предоставил положительный отзыв на диссертацию, содержащий 15 замечаний.

2. Можаров Алексей Михайлович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории возобновляемых источников энергии СПбАУ РАН им. Ж. И. Алфёрова, предоставил положительный отзыв на диссертацию, содержащий 5 замечаний.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН) предоставила положительный отзыв на диссертацию, содержащий 5 замечаний. Отзыв подготовили Чхало Николай Иванович, доктор физико-математических наук, член-корр. РАН, заведующий отделом, ИФМ РАН – филиала ФГБНУ «ФИЦ ИПФ им. А.В. Гапонова-Грехова РАН» и Нечай Андрей Николаевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ИФМ РАН – филиала ФГБНУ «ФИЦ ИПФ им. А.В. Гапонова-Грехова РАН». Отзыв утвердил директор Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук», доктор физико-математических наук, академик РАН Денисов Григорий Геннадьевич.

В отзыве ведущей организации сказано, что содержание автореферата полностью соответствует содержанию и основным положениям диссертационной работы.

Основным, самым важным результатом работы является открытие подобных друг другу зависимостей поглощенной доли энергии лазерного импульса и излученной плазмой энергией 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 настоящий день мировым рекордом. Полученное значение обосновывает возможность и необходимость применения рассмотренного в диссертации источника излучения в промышленной EUV литографии.

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 Положения 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.

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что один из них имеет ученую степень доктора наук, а второй – кандидата наук, работают в различных организациях, не имеют других ограничений, накладываемых п. 3.7 действующего Положения о присуждении ученых степеней. Выбранные оппоненты являются широко известными специалистами и обладают высоким уровнем компетентности в научной области, в которой выполнена диссертационная работа, что подтверждается их публикациями в рецензируемых научных журналах.

Выбор ведущей организации обосновывается тем, что ИПФ РАН является одним из ведущих институтов в России, занимающихся разработкой лазерно-плазменного источника EUV излучения с Xe газоструйной мишенью. В состав института входит Институт Физики Микроструктур РАН, который специализируется на изготовлении многослойной интерференционной оптики, в том числе – Be- содержащих брегговских зеркал, применявшихся в диссертационной работе соискателя. Кроме того, в ИПФ РАН действуют диссертационные советы по физико-математическим специальностям.

Основное содержание диссертации представлено в 11 публикациях, опубликованных в журналах, соответствующих требованиям Положения о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук:

• Буторин П. С., Задиранов Ю. М., Зуев С. Ю., Калмыков С. Г., Полковников В. Н., Сасин М. Э., Чхало Н. И. Абсолютно калиброванные спектрально разрешенные измерения интенсивности излучения Xe лазерной плазмы в дальнем ультрафиолетовом диапазоне // Журнал технической физики. – 2018. – Т. 88, № 10. – С. 1554–1558.

• Butorin P. S., Kalmykov S. G., Sasin M. E. Absolutely calibrated EUV spectra of Xe laser plasma radiation for lithography needs // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1135, No. 1. – 012086.

• Буторин П. С., Калмыков С. Г., Сасин М. Э. Новый метод подавления периферического поглощения в лазерно-плазменном источнике коротковолнового излучения с Xe газоструйной мишенью // Письма в Журнал технической физики. – 2018. – Т. 44, № 23. – С. 111–119.

• Kalmykov S. G., Butorin P. S., Sasin M. E. Xe laser-plasma EUV radiation source with a wavelength near 11nm—Optimization and conversion efficiency // Journal of Applied Physics. – 2019. – Vol. 126, No. 10. – 103301.

• Butorin P. S., Kalmykov S. G., Maximov V. A., Sasin M. E. Further development of the Xe laser plasma 11-nm radiation source – new data on laser energy absorption and spectroscopy // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1697, No. 1. – 012237.

• Белашов А. В., Буторин П. С., Задиранов Ю. М., Калмыков С. Г., Максимов В. А., Сасин М. Э., Сердобинцев П. Ю. Измерение геометрических параметров мощного ИК лазерного луча в прифокальной области для применений в лазерно-плазменном источнике коротковолнового излучения // Оптика и спектроскопия. – 2020. – Т. 128, № 8. – С. 1338–1341.

• Kalmykov S. G., Butorin P. S., et al. Absorption of laser radiation in a laser-produced plasma of Xe – hydrodynamic effects and nonequilibrium ionization // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2022. – Vol. 55, No. 10. – 364001.

• Kalmykov S. G., Butorin P. S., Zakharov V. S. A method for calculating the mean ion charge in a short-lived laser-produced plasma – its application to diagnostics of the laser spark // Journal of Applied Physics. – 2023. – Vol. 134, No. 23. – 233101.

• Буторин П. С., Белашов А. В., Калмыков С. Г., Сасин М. Э., Сердобинцев П. Ю. Анализ прошедшего через плазму лазерного излучения как метод оценки внутренних параметров лазерной плазмы // Оптика и спектроскопия. – 2023. – Т. 131, № 12. – С. 1688–1693.

• Буторин П. С., Калмыков С. Г. Оптимизация условий возбуждения ксеноновой лазерной плазмы в источнике экстремального ультрафиолетового излучения для нанолитографии с целью повышения его эффективности // Оптический журнал. – 2024. – Т. 91, № 5. – С. 95–104.

• Калмыков С. Г., Буторин П. С. Ксеноновая лазерная плазма как источник излучения для литографии на длинах волн вблизи 11 нм // Оптический журнал. – 2024. – Т. 91, № 6. – С. 47–61.

На автореферат поступило 4 отзыва:

1. Отзыв кандидата физико-математических наук, Абрамова Ильи Сергеевича, заместителя заведующего отделом по научной работе ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук», положительный, замечаний не содержит.
2. Отзыв кандидата физико-математических наук, Жевлакова Александра Павловича, ведущего научного сотрудника АО «НПО Государственный Оптический Институт им С. И. Вавилова», положительный, содержит 3 замечания:
    - В положениях, выносимых на защиту, не указана длина волны, для которой автором достигнуто рекордное значение коэффициента конверсии лазерного излучения в EUV диапазон.
    - Автор исследовал процессы формирования эффективного излучения в ксеноновой лазерной плазме, в основном, на длине волны 11.2 нм, а рекордное значение коэффициента конверсии достигнуто на длине волны 11.4 нм (см. стр.8; 27).

- В заключении не сформулирован заявленный в цели работы комплекс оптимизационных мер, для широкомасштабного производства интегральных схем в литографии.

3. Отзыв доктора физико-математических наук, Калинина Николая Валентиновича, ведущего научного сотрудника ФТИ им. А.Ф. Иоффе, положительный, замечаний не содержит.
4. Отзыв кандидата физико-математических наук, Мухина Евгения Евгеньевича, ведущего научного сотрудника ФТИ им. А. Ф. Иоффе, положительный, содержит 2 замечания:
    - Автором показан значительный выигрыш при использовании расширенного лазерного пучка (~400 мкм). Однако не обсуждаются потенциальные технологические сложности, связанные с обеспечением необходимой плотности газа и однородности мишени на столь большой площади, что может стать препятствием для создания стабильного источника с высокой частотой повторения, требуемой в промышленности.
    - В положении, выносимом на защиту (пункт 4), и в описании методики в Главе 5 утверждается, что разработанный диагностический метод позволяет определять внутренние параметры плазмы (T, <Z>). Однако в автореферате отсутствует оценка погрешностей данных, полученных этим методом, и их сравнение с результатами независимых измерений или полноценного численного моделирования, что важно для подтверждения достоверности и точности новой методики.

Диссертационный совет отмечает, что в рамках выполненных соискателем работ по диссертации «Эффективный плазменный источник излучения экстремального ультрафиолетового диапазона с длиной волны λ = 11.2 нм для нанолитографии: особенности физических процессов и методы управления интенсивностью» были получены следующие основные результаты:

1. Метод многозеркальной брэгговской спектрометрии впервые применен для количественных измерений мощности излучения ксеноновой лазерной плазмы в EUV-диапазоне. Это позволило получить абсолютно калиброванные спектры с разрешением $\lambda/\Delta\lambda$ = 25–70 для широкого круга экспериментальных условий.

2. Обнаружена и экспериментально подтверждена зависимость времени существования лазерной плазмы от диаметра инициирующего лазерного луча. Установлено, что определяющим фактором является гидродинамическое истечение плазмы за пределы освещаемой области. Показано, что при диаметре луча в несколько десятков микрон длительность существования плазмы сокращается в 2–3 раза по сравнению с длительностью лазерного

импульса, что необходимо учитывать при моделировании и оптимизации параметров источников.

3. Достигнута рекордная для лазерно-плазменных источников излучения с ксеноновой газоструйной мишенью конверсионная эффективность (CE ≈ 4%), определяемая как отношение энергии, излученной плазмой в полусферу в 2%-ной спектральной полосе вокруг рабочей длины волны λ = 11.4 нм, к энергии возбуждающего лазера, подведенной к плазме.

4. Разработан метод определения среднего ионного заряда для короткоживущей неравновесной лазерной плазмы, основанный на анализе спектральных характеристик излучения и данных по поглощению лазерной энергии.

5. Создана новая, экспериментально обоснованная диагностика короткоживущей неравновесной лазерной плазмы. Анализ полученных результатов позволил реконструировать пространственную структуру поглощения и определить ключевые внутренние параметры плазмы — температуру и средний ионный заряд, что вносит существенный вклад в понимание физики процессов и развитие методов диагностики лазерной плазмы.

Практическая значимость работы заключается в том, что полученные в ходе её выполнения результаты могут быть использованы при разработке современного EUV-литографа с длиной волны рабочего излучения около 11 нм. Кроме того, разработанный калиброванный в абсолютных величинах (Вт/(нм·стрд)) лазерно-плазменный источник коротковолнового излучения имеет самостоятельную ценность для тестирования и калибровки новых разработок полупроводниковых датчиков и измерительных устройств в диапазонах EUV и мягкого рентгена.

Достоверность результатов обеспечена высокой повторяемостью полученных экспериментальных данных. Экспериментально полученные результаты согласуются с ранее предсказанными и основанными на теоретических выкладках и численном моделировании результатами других авторов. Важнейший прикладного значения результат настоящей работы – рекордно высокое значение конверсионного коэффициента – поддерживается близким (примерно в 2 раза более низким) результатом, который можно вывести из данных, полученных при иных экспериментальных условиях в ИФМ РАН.

Актуальность полученных результатов обоснована тем, что промышленно реализованный вариант EUV-литографии с длиной волны 13.5 нм и оловянной мишенью сталкивается с критическими ограничениями, главным из которых является быстрое загрязнение оптики материалом мишени, что стимулирует поиск альтернативных решений. Предложенная ИФМ РАН схема с рабочей длиной волны 11.2 нм и «чистым» лазерно-плазменным источником на ксеноновой мишени до настоящего времени не

могла быть реализована из-за отсутствия достоверных количественных данных о спектральной интенсивности излучения Xe плазмы в целевом диапазоне. Диссертационная работа соискателя восполняет этот пробел, а также предлагает ряд оптимизаций и диагностик такого источника излучения, предоставляя экспериментальную базу для перехода к новой, потенциально более эффективной и экономичной конфигурации литографического оборудования.

Полученные результаты позволили соискателю сформулировать и защитить следующие положения:

1) Длительность импульса EUV излучения из лазерной искры определяется не только длительностью возбуждающего ее лазерного импульса. При длительностях импульса в десятки наносекунд, которые рассматриваются в диссертации, гидродинамическое истечение лазерной плазмы за пределы освещаемой области также является влияющим фактором, в результате чего время существования плазменного образования становится зависящим от его размеров. Для плазмы малого размера (десятки микрон) ее время жизни, а вместе с ним продолжительность ее излучения в EUV диапазоне и поглощения в ней лазерного ИК излучения оказываются существенно меньше длительности лазерного импульса.

2) Внефокусное освещение газоструйной мишени, когда диаметр лазерного луча в 7-8 раз превышает его диаметр при острой фокусировке на ось струи, является оптимальным с точки зрения повышения выхода энергии EUV излучения. Оно приводит к многократному увеличению поглощения в плазме излучения лазера и к соответствующему повышению энергии, излучаемой в EUV диапазоне. Освещение мишени лучом с диаметром 350 мкм позволило достичь рекордного для источников излучения этого типа значения коэффициента конверсии лазерного излучения в излучение EUV диапазона: CE = 3.9%.

3) Потери тепловой энергии из Xe лазерной плазмы носят выраженно радиационный характер – более 60% поглощаемой в плазме энергии лазерного импульса высвечивается в диапазоне λ = 9.5-14 нм с максимумом при λ = 10.5-11.5 нм.

4) Зондирование плазмы инициирующим её лазерным лучом является новым методом диагностики этого выраженно неравновесного объекта, позволяющим определить структуру поглощения лазерной энергии в ней и найти численные значения внутренних параметров – температуры и среднего ионного заряда.

Личное участие автора заключается в планировании всех описанных в работе экспериментов, их подготовке, проведении, модификации экспериментальной установки, в работах по юстировке измерительной аппаратуры на всех этапах исследования, выполнении первичной обработки экспериментальных данных, их анализа, проведении интерпретации

полученных результатов. Автор принимал активное участие в подготовке публикаций и представлении результатов работы на конференциях и научных семинарах. Все новые научные результаты получены при непосредственном участии автора.

Результаты диссертационной работы были представлены на 8 российских и международных конференциях в 6 устных и 3 стендовых докладах: Научный форум с международным участием «Неделя науки СПбПУ», (13-19 ноября 2017, Санкт-Петербург, Россия); PhysicA.SPb 2018 (23-25 октября 2018, Санкт-Петербург, Россия); 2018 International Source Workshop (5-7 ноября 2018, Прага, Чехия); 2019 International Source Workshop (4-6 ноября 2019, Амстердам, Нидерланды); PhysicA.SPb 2020 (19-23 октября 2020, Санкт-Петербург, Россия); Российская конференция и школа молодых ученых по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники «Фотоника 2023» (4-8 сентября 2023, Новосибирск, Россия); XXI Всероссийская молодежная Самарская конкурс-конференция по оптике, лазерной физике и физике плазмы, посвященная 300-летию РАН (14-18 ноября 2023, Самара, Россия); Modern X- ray Optics (23-26 сентября 2024, Нижний Новгород, Россия).

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 20 человек, из них 5 докторов по специальности 1.3.6 – «оптика», участвовавших в заседании, из 22 человек, входящих в состав совета, проголосовали за – 19, против – 0, мнение установить (или выявить не удалось) – 1.

На заседании 26 февраля 2026 года диссертационный совет принял решение присудить Буторину П.С. ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 – «оптика».

Председатель диссертационного совета

доктор физ.-мат. наук О.С. Васютинский

Ученый секретарь диссертационного совета

кандидат физ.-мат. наук Г.С. Курскиев

26 февраля 2026 г.