

Отзыв
на автореферат диссертации
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»
представленной на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.6 – оптика

Работа Буторина П. С. посвящена исследованию и оптимизации лазерной плазмы, возбуждаемой на ксеноновой газоструйной мишени и рассматриваемой в качестве источника экстремального ультрафиолетового излучения на длине волны $\lambda = 11.2$ нм для применения в перспективных системах нанолитографии. Для этой цели автором проведены комплексные экспериментальные и расчетно-вычислительные исследования, включающие разработку новых методов диагностики, таких как абсолютно калиброванные спектральные измерения излучения плазмы в экстремальном ультрафиолетовом диапазоне (ЭУФ, EUV), изучение поглощения лазерного излучения в плазме, а также нахождение новых методов управления интенсивностью излучения плазмы в указанном выше диапазоне длин волн. Актуальность темы диссертации не вызывает сомнения, поскольку развитие EUV-литографии является ключевым направлением для дальнейшей миниатюризации элементов интегральных схем, а поиск альтернативных длин волн и эффективных источников излучения представляет значительный научный и практический интерес.

Диссертационная работа состоит из 5 глав. В первой главе диссертации представлен обзор современного состояния и проблем EUV-литографии, обоснованы мотивация и цели исследования. Вторая глава посвящена описанию экспериментальной установки и методик измерений. В Главе 3 описаны результаты спектрометрических исследований, измерения пространственно-временных характеристик плазмы и поглощения лазерного излучения. В Главах 4 и 5 содержатся результаты оптимизации источника излучения и разработка метода определения внутренних параметров плазмы на основе данных поглощения. Практическая значимость предложенного в работе метода состоит в возможности создания эффективного и технологически реализуемого источника EUV-излучения для литографии на длине волны ~ 11 нм, а также в развитии новых диагностических подходов для исследования короткоживущих неравновесных плазменных образований.

Результаты, представленные в автореферате, являются новыми, работа изложена логично и последовательно, формулировки приведены в понятной и четкой форме. Автором достигнуты следующие значимые научные результаты:

1. Впервые с помощью двухзеркальной брэгговской спектрометрии получены абсолютно калиброванные спектры излучения Xe лазерной плазмы в диапазоне 11–14 нм, показано 13-кратное превышение интенсивности на $\lambda = 11.2$ нм по сравнению с $\lambda = 13.5$ нм.
2. Установлено, что при облучении газовой мишени расширенным лазерным лучом достигается рекордный для данного типа источников коэффициент конверсии лазерной энергии в EUV-излучение – 3.9%.

3. Разработаны новые методы диагностики плазмы, включая «ИК-скопию» и анализ поглощения лазерного излучения, позволившие определить пространственно-временную структуру плазмы и оценить её внутренние параметры (температуру ~ 41 эВ, средний ионный заряд ~ 10.2).
4. Показано, что длительность существования плазмы определяется не только длительностью лазерного импульса, но и гидродинамическим разлётом, что важно для оптимизации геометрии облучения.

По автореферату можно сделать следующие замечания:

1. 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.
2. 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 , $\langle Z \rangle$). 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.

Считаю, что диссертационная работа Павла Сергеевича Буторина "Эффективный плазменный источник излучения экстремального ультрафиолетового диапазона с длиной волны $\lambda = 11.2$ нм для нанолитографии: особенности физических процессов и методы управления интенсивностью" отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 "Оптика" согласно Положению о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, а ее автор П. С. Буторин заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук.

Ведущий научный сотрудник,
ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН,
кандидат физ.- мат. наук,
Адрес: 194021, г. Санкт-Петербург,
ул. Политехническая, д.26.
Тел.: +7 950 007 8749
email: e.mukhin@mail.ioffe.ru

Мухин Е. Е.

«12» февраля 2026 г



Подпись Мухина Е.Е. удостоверяю
отделом кадров ФТИ им.А.Ф.Иоффе

В.С., Н.С. Буценко