



ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
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",
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности: 1.3.6 – Оптика

Диссертационная работа Буторина Павла Сергеевича посвящена изучению плазменного источника излучения экстремального ультрафиолетового диапазона с длиной волны $\lambda = 11.2$ нм, который рассматривается в качестве возможного источника коротковолнового рабочего излучения для целей нанолитографии.

1. Актуальность темы исследования

Исследование Павла Сергеевича Буторина посвящено разработке и оптимизации лазерно-плазменного источника экстремального ультрафиолетового (ЭУФ, EUV) излучения на длине волны 11.2 нм с ксеноновой газоструйной мишенью, что представляет значительный интерес для современной физики плазмы, оптики коротковолнового диапазона и нанотехнологий. Развитие полупроводниковой промышленности и переход к техпроцессам с нормами менее 10 нм требуют создания более эффективных и экономичных систем EUV-литографии, что, в свою очередь, является серьезным технологическим вызовом. Выбор рабочей длины волны в EUV-диапазоне фундаментально ограничен возможностями многослойной интерференционной (брэгговской) оптики, для которой коэффициент отражения и ширина полосы критически зависят от материалов пар слоёв и длины волны. Несмотря на значительный прогресс, достигнутый с источниками на основе мишени из олова ($\lambda = 13.5$ нм) и оптикой на основе пар Si/Mo, проблема загрязнения зеркал каплями олова является значительным фактором, ограничивающим срок службы оптической системы и повышающим частоту требуемого технического обслуживания установки. В качестве альтернативной согласованной группы «источник - зеркальное покрытие» для EUV литографии может выступать газоструйная мишень на основе ксенона и интерференционные Be-содержащие покрытия зеркал (Mo/Be, Ru/Be), оптимизированных для диапазона ~ 11 нм. В свою очередь, из-за технических особенностей формирования таких покрытий, работа над получением стабильных пленок началась сравнительно недавно, что вновь поставило вопрос актуальности проведения исследования газоструйной мишени под данный, новый спектральный диапазон, на передний план. Таким образом, работа, находящаяся на стыке физики плазмы, прецизионной спектроскопии ЭУФ-диапазона и технологий, выполняется в русле актуальных научно-технических направлений и имеет ключевое значение как для развития методов управления излучением в условиях сильного поглощения, так и для прикладных задач создания оптических систем следующего поколения для нанолитографии.

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

Научная новизна исследования определяется комплексным подходом к изучению лазерной плазмы на ксеноне с использованием современных спектральных, пространственно- и времяразрешенных диагностических методов. В отличие от предшествующих работ, в настоящей диссертации впервые:

1. Установлено, что длительность существования лазерной плазмы и её EUV-излучения определяется не только длительностью лазерного импульса, но и гидродинамическим

истечением, что приводит к сокращению времени жизни для плазмы малого диаметра (~50 мкм).

2. Обнаружено и объяснено влияние геометрии облучения (диаметр лазерного пучка) на эффективность источника, что проявляется в неочевидной «двугорбой» зависимости интенсивности EUV-излучения от положения мишени относительно фокуса с максимумом при диаметре пучка ~400 мкм.
3. Показано, что при таком внефокусном облучении достигается рекордный для Хе-плазмы коэффициент конверсии (СЕ) лазерной энергии в узкополосное излучение, который, составляет 3.9%.
4. Предложен новый диагностический метод оценки внутренних параметров короткоживущей неравновесной плазмы (температуры и среднего ионного заряда), основанный на измерении поглощения в ней накачивающего лазерного излучения и использовании базы данных сечений ударной ионизации.

Полученные результаты расширяют существующие представления о физике лазерной плазмы и вносят существенный вклад в развитие методов создания и оптимизации EUV-источников для нанолитографии.

3. Значимость для науки и производства полученных автором диссертации результатов

Практическая ценность работы заключается в том, что полученные результаты и установленные закономерности создают основу для разработки нового поколения более экономичных и технологичных EUV-литографов. В частности:

1. Определённые в работе оптимальные условия облучения (внефокусная геометрия с диаметром пучка ~400 мкм) и достигнутый уровень СЕ могут быть непосредственно использованы для инженерного проектирования компактного и «чистого» источника на ксеноне с рабочей длиной волны 11.2 нм.
2. Предложенный методический подход, включающий абсолютно калиброванную брэгговскую спектрометрию и «ИК-скопию» плазмы с высоким пространственно-временным разрешением, может быть эффективно применён для диагностики и оптимизации широкого класса лазерно-плазменных источников.
3. Результаты работы важны для обоснования перехода литографических систем на Ве-содержащую оптику и длину волны 11.2 нм, что потенциально способно снизить стоимость владения технологией.

Кроме того, сам по себе калиброванный источник ЭУФ может быть использован в научно-прикладных целях, например, для метрологии или тестирования полупроводниковых детекторов такого коротковолнового излучения.

4. Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов

Полученные в диссертации результаты и сформулированные выводы открывают путь для их системного применения в ряде научно-технических направлений. Наиболее прямой путь практического использования работы лежит в области оптимизации лазерно-плазменного источника. Ключевой вывод о преимуществе внефокусной геометрии облучения с диаметром пучка порядка 400 мкм должен стать краеугольным камнем при проектировании оптической системы накачки для перспективного источника на длине волны 11.2 нм. В качестве следующего шага логично провести параметрическое исследование, направленное на поиск оптимальной точки в пространстве параметров — диаметра пучка, энергии импульса и давления газа — для преодоления порога конверсионной эффективности в 5%. Одновременно с этим, для потенциального повышения эффективности, целесообразно проверить синергетический эффект от комбинации выявленной оптимальной геометрии с методом преионизации мишени коротковолновым УФ-излучением.

Полученные абсолютно калиброванные спектры излучения Хе-плазмы предоставляют незаменимые исходные данные для смежной области — разработки и производства многослойной интерференционной оптики. Передача наработанных в рамках настоящей диссертации знаний в научные организации, сосредоточенные на синтезе покрытий на основе пар Ве/Мо и Ве/Ru, позволит прецизионно настраивать полосу отражения зеркал для

совмещения с пиком полосы излучения источника. Таким образом, результаты данной работы служат прямым обоснованием и техническим основанием для инициации проектов по проектированию полных оптических трактов литографов на основе Ве-содержащих зеркал.

Разработанный алгоритм оценки среднего ионного заряда в неравновесной плазме рекомендуется формализовать в виде специализированного программного модуля для расширения функционала существующих диагностических пакетов. Экспериментальные зависимости энергетических и спектральных характеристик от условий облучения следует использовать в качестве надежного эталона для верификации современных гидродинамических и радиационных кодов моделирования лазерной плазмы.

5. Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и заключений

Научные положения и выводы диссертации хорошо обоснованы. Автором использован комплекс современных экспериментальных методов, в том числе, разработанных при его участии: двухзеркальная брэгговская спектрометрия, «ИК-скопия» с пространственным разрешением, близким к дифракционному пределу, времяразрешенные измерения с применением быстрых фотодиодов и АЦП. Эксперименты проводились на оригинальной установке с тщательно контролируруемыми параметрами (давление, геометрия облучения мишени лазером, энергия в импульсе). Обработка результатов проводилась с применением требуемого математического аппарата. Достоверность подтверждается высокой воспроизводимостью данных, их внутренней согласованностью (корреляция поглощения лазерной мощности и излучения EUV) и соответствием качественным физическим моделям. Полученные выводы не противоречат фундаментальным законам и хорошо согласуются с отдельными результатами других научных групп.

6. Оценка содержания диссертации, ее завершенность в целом

Диссертация является законченной, целостной научной работой. Структура работы логична, все поставленные цели и задачи выполнены в полном объеме. Объем и содержание глав соразмерны, изложение материала последовательное и ясное. Работа демонстрирует высокий уровень научной квалификации автора.

Введение содержит четкое обоснование актуальности, сформулированы цель, задачи, научная новизна и практическая значимость. **Первая глава** представляет собой подробный и критический аналитический обзор литературы, который демонстрирует глубокое понимание автором эволюции литографии, проблематики EUV-источников и точно определяет нишу данного исследования. **Вторая глава** посвящена описанию экспериментальной установки, методик синтеза газоструйной мишени и применяемых методов диагностики. Изложение отличается технической грамотностью и полнотой. **Третья и четвертая главы** содержат систематическое изложение и глубокий анализ собственных экспериментальных результатов по спектроскопии, оптимизации геометрии и достижению рекордного SE. Данные представлены наглядно. Их обсуждение ведется на высоком профессиональном уровне с привлечением современных теоретических представлений о радиационном энергобалансе и гидродинамике. **Пятая глава** демонстрирует способность автора к теоретическому обобщению, предлагая новый диагностический метод на основе полученных данных. В **Заключении** приводятся выводы, которые полностью соответствуют поставленным цели и задачам работы.

7. Замечания по работе

1. В Главе 4 обсуждается вопрос об облучении мишени расширенным лазерным лучом, диаметр которого достигает нескольких сотен микрон. В связи с этим возникает вопрос о том, каковы требования к размерам источника (искры) для типовых оптических EUV литографов?
2. Среди задач научного исследования (стр.10) и в Главе 3 (стр.55) фигурирует калибровка в единицах Вт/(нм·стер), является ли такая калибровка общепринятой?
3. На рис.35 приведены сигнал, пропорциональный интенсивности излучения ($\lambda = 11.2$ нм) Хе плазмы и поглощенная в плазме доля лазерной энергии, оба в функции от расстояния между фокусом лазерного луча и осью газоструйной мишени для 5 значений энергии лазерного

импульса, подведенной к плазме. Далее в диссертации повествование ведется только для случая облучения мишени лазерным лучом с энергией 1 Дж. На графиках для остальных случаев (с меньшей энергией в пучке) явно присутствует зависимость оптимальной геометрии облучения (точки максимума сигнала) от энергии накачки, которая никак не прокомментирована. Как объясняется эта зависимость?

4. Неясно происхождение спектральных характеристик отражения зеркал (Рис. 13) и чувствительности фотодиода (Рис. 15) – это результаты моделирования или измерений?

5. Рисунок 17б и 18 не согласуются в области длин волн менее 11 нм. Нужно дать пояснение.

8. Соответствие автореферата основным положениям диссертации

Содержание автореферата полностью отражает содержание диссертации, ее основные цели, задачи, методы, результаты и выводы. Автореферат составлен в соответствии с установленными требованиями.

9. Подтверждение опубликованных основных результатов диссертации в научной печати

Основные результаты диссертации опубликованы в 11 статьях в российских и зарубежных рецензируемых научных журналах, что соответствует требованиям ВАК. Публикации полноценно отражают содержание и научные достижения работы.

10. Заключение

На основании изложенного считаю, что диссертационная работа Буторина П.С. полностью соответствует специальности 1.3.6 – Оптика и удовлетворяет требованиям 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.

Старший научный сотрудник лаборатории
возобновляемых источников энергии
СПбАУ РАН им. Ж. И. Алфёрова,
к.ф.-м.н.
Тел.: +79219809929
e-mail: mozharov@spbau.ru



/ Можаров А.М. /

Сведения об организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алфёрова Российской академии наук» (СПбАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова)

Адрес: 194021, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, д.8, к. 3, лит. А
Тел.: +7 812 534-58-17
e-mail: office@spbau.ru

Проректор по науке СПбАУ РАН им. Ж. И. Алфёрова,
д.ф.-м.н.



/ Мухин И.С. /

12.02.2026