

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
Перекалова Александра Алексеевича «Эмиссионные спектры газовых и жидкостных мишеней при импульсном лазерном возбуждении»
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 – приборы и методы экспериментальной физики

Современный прогресс в развитии микроэлектроники всецело зависит от текущего уровня технологий, используемых в литографических установках. Именно с совершенствованием проекционных литографических установок и смещением их рабочей длины волны в область экстремального ультрафиолета (ЭУФ) связана миниатюризация современных электронных компонент, в которых размер элемента не превышает десятков и даже единиц нанометров. Достижения в области ЭУФ литографии уже открыли перспективы развития установок, использующих мягкое рентгеновское (МР) излучение.

Проекционный литограф ЭУФ диапазона – сложная установка, включающая несколько ключевых высокотехнологических элементов. Одним из них является источник излучения. К нему выдвигается ряд ключевых требований: он должен иметь высокую интенсивность, быть относительно узкополосным, не загрязнять или разрушать другие компоненты литографа. Наиболее соответствуют этим критериям синхротронные источники излучения и лазер на свободных электронах. Однако они сами по себе являются стационарными дорогостоящими установками. Поэтому в качестве сравнительно недорогой и компактной альтернативы наибольшее распространение получили лазер-плазменные источники (ЛПИ) ЭУФ и МР излучения.

Собственно источником излучения в ЛПИ является высокоионизированная плазма, образующаяся при взаимодействии лазерного излучения высокой плотности с веществом мишени. Исторически, первоначально мишени изготавливались из твердых материалов в силу технологичности и простоты их воспроизведения. Помимо этого, твердотельные мишени могут изготавливаться из большого набора как чистых химических элементов, так и их комбинаций, ионы которых излучают в широком спектральном диапазоне. Немаловажно, что лазерное излучение эффективно поглощается большинством твердых материалов, что обеспечивает высокий коэффициент преобразования лазерного излучения в ЭУФ и МР. Однако практическое использование твердотельных мишеней в литографических установках ограничено из-за износа мишени и загрязнения установки ее материалом.

Хорошей альтернативой твердотельным мишеням являются газовые и жидкостные струи, которые лишены указанных выше недостатков. Однако их относительно малое распространение связано со сложностью формирования струи с требуемыми физическими параметрами и слабая изученность зависимости получаемых спектров от материала струи и ее параметров.

Диссертационная работа А.А. Перекалова направлена на решение задачи, заключающейся в экспериментальном определении спектральных и излучательных свойств ЛПИ с различными газоструйными и жидкостными мишенями. В связи с этим работа является своевременной и актуальной. Работы выполнялись автором в ИФМ РАН.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, поставлена цель исследований, приведена научная новизна и практическая значимость результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, отражено личное участие автора, приведена апробация полученных результатов.

В первой главе представлен литературный обзор ранее проведенных экспериментальных исследований спектров ЛПИ в ЭУФ и МР диапазоне с газоструйными и жидкостными мишенями. Отдельно выделены диапазоны, перспективные с точки зрения развития литографических установок в ЭУФ диапазоне в диапазоне 11-13 нм и в МР в области «водяного окна» - 2.3-4.4 нм. Систематизированы полученные ранее абсолютные интенсивности ЛПИ с различными газами и жидкостями в этих диапазонах.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальной установки, на которой выполнялись исследования и описаны методики проведения измерений. В состав установки входят: вакуумная камера с откачной системой, лазер-плазменный источник излучения с соплами для формирования газовой и жидкостной струй, рентгеновский спектрометр-монокроматор РСМ-500 для получения спектров ЛПИ с высоким спектральным разрешением, брэгговский зеркальный спектрометр для измерения абсолютной интенсивности ЛПИ в заданном спектральном диапазоне и объектив Шварцшильда для построения изображения ЛПИ на длине волны 11.25 нм. Последние два инструмента созданы при определяющем вкладе А.А. Перекалова.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований спектров ЛПИ с различными газовыми мишенями. При этом использовались как инертные (Ne, Ar, Kr, Xe) так и молекулярные (CO_2 , CHF_3 , N_2) газы. В ходе эксперимента варьировались давление газа на входе в сверхзвуковое сопло и энергия лазерного импульса. Для всех газов получены спектры в диапазоне 2.5-18 нм, проведена идентификация линий многозарядных ионов и получены абсолютные значения интенсивностей свечения плазмы в узких спектральных диапазонах. Для криптона был измерен также размер излучающей области на длине волны 11.25 нм при различных давлениях на входе в сопло и энергиях лазерного импульса.

В четвертой главе представлены результаты исследования спектров ЛПИ с несколькими жидкостными мишенями: спирты (метанол, этанол и изопропанол), циклогексан и дихлорметан. Измерения проводились при давлении жидкости на входе в импульсный клапан 4 бар и энергии возбуждающего импульса лазера 0.8 Дж. Для всех жидкостей получены спектры в диапазоне 2.5-18 нм, проведена идентификация линий многозарядных ионов и получены абсолютные значения интенсивностей свечения плазмы в узких спектральных диапазонах.

Пятая глава посвящена моделированию параметров плазмы в зоне разряда для газоструйных мишеней. Подробно рассмотрены процессы возникновения и развития плазмы в зоне лазерной искры газоструйных мишенях, разработан алгоритм численного моделирования ее параметров. В результате моделирования получены зависимости температуры плазмы от давления газа на входе в сопло и энергии лазерного импульса, а так же оценка размера облака плазмы.

Научная новизна работы, сделанной диссертантом, заключается во впервые проведенном измерении абсолютных интенсивностей участков спектров некоторых газов и жидкостей и определении размера плазменного источника в ЭУФ диапазоне спектра.

Найдены параметры газоструйных и жидкостных источников, обеспечивающих максимальную конверсию лазерного излучения в излучение в МР и ЭУФ диапазонах. Наряду с измерением размера источника это является крайне важным с практической точки зрения при разработке систем проекционной литографии в коротковолновом диапазоне.

Достоверность и обоснованность результатов и положений, выносимых на защиту, определяется применением проверенных методов исследований, согласованностью результатов измерений, полученных различными методами, результатами экспериментальных исследований рентгенооптических свойств зеркал.

Диссертация А.А. Перекалова не свободна от недостатков. Можно сделать следующие замечания.

1. В таблице 5 не указан диапазон углов падения излучения на многослойные рентгеновские зеркала (МРЗ), которые соответствуют рабочему диапазону длин волн, а на рис. 19 не приведены углы падения излучения на зеркала, которым соответствуют указанные коэффициенты отражения. В связи с этим непонятно, насколько указанные характеристики соответствуют углу установки МРЗ в брегговском зеркальном спектрометре, использованном в работе.
2. На рис. 20 приведены спектральные ширины линий кислорода. Однако из пояснений неясно, какие именно линии имеются ввиду и откуда взяты значения ширин этих линий.
3. Не указан источник формулы 2.1.
4. При оценке погрешностей измерений брегговского зеркального спектрометра перечислено несколько факторов влияния (коэффициент отражения многослойного рентгеновского зеркала; коэффициенты пропускания пленочных фильтров; чувствительность фотодиода и коэффициент усиления сигнала; напряжение; телесный угол, под которым лазерная искра наблюдается детектором излучения) с указанием их погрешностей. Очевидно, что эти факторы имеют разный вклад в итоговую погрешность. Однако не указана формула, на основании которой получена погрешность измерения абсолютной интенсивности.
5. В таблицах 6-16 и в итоговых таблицах гл. 2 и 3, где приведены абсолютные интенсивности эмиссионного излучения различных газоструйных мишеней, для потока указана размерность «фот/с». Непонятно, это опечатка или указан пересчет на временную шкалу (т.к. не указано, за сколько лазерных импульсов эти значения получены)? Несмотря на то, что в гл.2 приведены погрешности абсолютных измерений, с точки зрения использования приведенных данных, следует привести погрешность значений потока в этих таблицах.
6. На рис. 70, на изображениях лазерной искры в ЭУФ диапазоне спектра следует указать области интегрирования, по которым были получены профили, изображенные на рис. 71 и 72.
7. Для расчетных зависимостей температур плазмы от давления и газа и энергии лазерного импульса, приведенных в главе 5, было бы полезно указать значения,

которые могут быть получены из анализа температурных интервалов возбуждения наблюдаемых ионов с разными степенями ионизации.

Однако указанные замечания не снижают научной и практической ценности работы.

Основные результаты, изложенные в диссертационной работе, обсуждались на отечественных и зарубежных научных конференциях и симпозиумах, они опубликованы в 26-ти работах, в том числе в 11-ти рецензируемых журналах. Содержание автореферата соответствует диссертационной работе.

Диссертационная работа Александра Алексеевича Перекалова «Эмиссионные спектры газовых и жидкостных мишеней при импульсном лазерном возбуждении» соответствует паспорту специальности 1.3.2 – приборы и методы экспериментальной физики и требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденных постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013 (с изменениями на 11 сентября 2021 года), а ее автор, Александр Алексеевич Перекалов, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 – приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,

заведующий лабораторией

Федерального государственного бюджетного

учреждения науки Ордена Трудового Красного Знамени

Институт солнечно-земной физики

Сибирского отделения Российской академии наук

(ИСЗФ СО РАН)

Кузин Сергей Вадимович

31 октября 2024 г

Даю согласие на обработку персональных данных

Кузин Сергей Вадимович

31 октября 2024 г.

Контактные данные:

ИСЗФ СО РАН

Адрес: 664033, Россия, г. Иркутск,

ул. Лермонтова, 126А, а/я 291

e-mail: kuzin@mail.iszf.irk.ru

Телефон +7(916) 795-06-93

Подпись официального оппонента С.В. Кузина заверяю
первый заместитель директора ИСЗФ СО РАН, д.ф.-м.н.



С.В. Олемской

31 октября 2024 г.