

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

Диссертация Буторина Павла Сергеевича посвящена созданию эффективного источника излучения для литографии в экстремальном ультрафиолетовом (ЭУФ, EUV) диапазоне. Такой источник – это краеугольный камень для альтернативы технологии иммерсионной литографии с коротковолновым ультрафиолетовым эксимерным лазером. Одно из современных решений, промышленная система на 13.5 нм (Sn – плазма, многослойные Si/Mo – зеркала), помимо высокой сложности, имеет ключевой недостаток – быстрое загрязнение зеркал парами олова. У другой альтернативы, выбранной автором диссертации системы на 11.2 нм (Xe – плазма, Be/Ru – зеркала), этого недостатка нет, но она характеризуется почти на порядок меньшей мощностью. В таком свете, проясняется актуальность темы, востребованность результатов диссертации. В ее фокусе – создание 11.2 нм-источника, сопоставимого по мощности с 13.5 нм-источником, но лишённого главного недостатка последнего.

Диссертация содержит новые научные результаты. Впервые для плотной Xe – плазмы выполнены абсолютно калиброванные спектральные измерения в диапазоне 11–14 нм с использованием двухзеркальной брэгговской спектрометрии, что позволило достоверно установить 11-кратное превосходство спектральной плотности излучения на длине 11.2 нм по сравнению с 13.5 нм. Новизной обладает авторская пространственно-разрешенная диагностика поглощения ИК - лазера в плазме, использованная для визуализации структуры плазменного образования. Найден оптимальный режим работы источника — облучение Xe – струи широким пучком (~400 мкм). Демонстрируется рекорд для коэффициента конверсии, 3.9%. Предложены теоретические оценки внутренних параметров неравновесной плазмы по данным о поглощения излучения, использованного для ее возбуждения 1064 нм-лазера.

Работа обладает высокой практической ценностью. Она демонстрирует преимущества 11.2 нм-EUV-литографии (простота и чистота) по сравнению с конкурентной технологией на длине волны 13.5 нм. Разработанный 11.2 нм-источник и методики могут быть использованы для калибровки EUV-детекторов, тестирования стойкости оптических покрытий и в других прикладных задачах, требующих мощного коротковолнового излучения.

Научные положения, выводы, заключение диссертации являются обоснованными и достоверными. Она является целостным, логически завершенным научным исследованием.

Структура работы. Введение четко задает рамки исследования и обосновывает его мотивацию. Первая глава содержит глубокий и всесторонний аналитический обзор. Вторая глава дает исчерпывающее техническое описание экспериментальной установки и методик, позволяющее воспроизвести исследования. Третья глава представляет собой ядро работы, где с высокой детализацией изложены методики измерений и базовые результаты по спектроскопии и пространственно-временным исследованиям плазмы. Четвертая глава посвящена систематическому исследованию методов оптимизации и содержит главный практический результат работы — достижение рекордного коэффициента конверсии энергии подведенного к плазме лазерного луча в энергию ЭУФ излучения из плазмы. Пятая глава демонстрирует способность автора к теоретическому обобщению и разработке новых диагностических методов. Заключение резюмирует достигнутые результаты. Изложение материала последовательное, стиль — научный и в достаточной мере строгий. Объем и глубина проработки материала соответствуют требованиям к кандидатским диссертациям.

Диссертацию интересно читать, чувствуется увлеченность автора.

Основные научные результаты диссертации опубликованы в 11 статьях в ведущих российских и зарубежных рецензируемых журналах, представлены в виде докладов на 8 российских и международных конференциях.

Автореферат соответствует диссертации. Все ключевые положения, выводы и результаты, включая новизну, научную и практическую значимость, нашли отражение в тексте автореферата.

Замечания к диссертации

- 1) **стр.56.** Видно, что излученная в EUV диапазоне энергия превышает 40% от поглощенной. При этом следует помнить, ... Составляет ровно 40%. Превышает же, если учесть, как определен спектр. Т.е. «следует» учесть, а не «помнить».
- 2) **3.2.** Измерение конфигурации лазерного луча вблизи фокуса. Определение параметров каустики
- 3) **стр.59.** Диаметр перетяжки в районе фокуса составил $\text{Øwaist} = 2\sigma = 45-46$ мкм. Стоило бы добавить точность измерений. +/- 3 мкм? «Цена деления» равна размеру пикселя, 6 микрон.
- 4) **стр.60.** При этом пространственное разрешение деталей в "теневой картине" для самых малых лазерных плазм с диаметром около 50 мкм, когда луч лазера остро сфокусирован на ось струи, ограничивается уже дифракционным пределом, который для излучения Nd:YAG лазера ($\lambda = 1.064$ мкм) составляет 1-2 мкм. Разрешение оптической системы дает формула $0.61\lambda/\text{NA}$. Для фокусировки (освещения объекта, в терминах микроскопии) используется объектив с $F = 82$ мм (линза-конденсор), на которую падает пучок света диаметром примерно 25 мм. Поскольку $\text{NA} = \sin(\theta)$, то взяв $\tan(\theta) = 25/(2*82)$ и $\lambda = 1.064$ мкм, получим разрешение 4-5 микрон. Каковы параметры двух линз на рис.21, направляющих пучок света на ПЗС матрицу? Если NA системы из этих двух линз меньше чем NA конденсора, то разрешение будет хуже полученной оценки.
- 5) **стр.64.** Поэтому выпуклая поверхность плазменного образования, в отличие от стеклянной линзы с $n > 1$, дефокусирует световой луч, выводит излучение его периферической зоны за апертуру приемной оптики, что выглядит как поглощение. Ширина кольцевой области, где проявляется этот краевой эффект, описывает градиентную зону, где происходит уменьшение вдоль радиуса концентрации свободных электронов и, соответственно, ионов. Сильно облегчил бы восприятие текста с интерпретацией контраста изображений рисунок. На нем показать ход лучей через различные области струи (с плазмой, без нее) при фокусировке в центр, ближе к периферии, а также, для сопоставления, ход лучей в отсутствие струи.
- 6) **стр.68.** Почему не 5 ГГц вместо $5 \times 10^9 \text{ c}^{-1}$?
- 7) **стр.74.** Кроме экспериментов с геометрией облучения, в настоящей главе кратко описаны три других метода – варьирование характеристик импульса газа за счет изменения давления на входе в сопло и изменение параметров лазерного импульса (его энергии и длительности). По очевидным причинам возможности этих трёх методов весьма ограничены. Все же стоило бы описать эти «очевидные» причины.
- 8) **стр. 82.** В формуле (9) подстрочный индекс i обозначает ион. T_i и m_i – это ионная температура и, соответственно, атомная масса Хе. А что этот индекс обозначает в выражении показателя адиабаты, почему он равен 3?
Несколько запутывает читателя *плотность плазмы уменьшается в 2.72 раза от своего начального значения»...в 7 раз...* Если уж соблюдать точность, то в 7.39 раза. Но лучше, понятней: «в e -раз» и «в e^2 -раз».
- 9) **стр.87.** Линейный вид измеренных зависимостей и поглощение на уровне 50% при давлении $P = 13$ атм. дают основания предполагать, что при увеличении давления до значений, при которых поглощённая доля составит около 90%, можно ожидать роста сигнала EUV на $\approx 30\%$. Речь идет о значениях в 20 атм.?
- 10) **стр.88.** 5 методов...Вряд ли перемещения струи, поднятие мощности лазера, увеличение давления Хе, и т.п. стоит называть методами. Правильнее было бы говорить о 5 возможностях.
- 11) **стр.90.** Метод диагностики внутренних параметров лазерной плазмы, базирующийся на измеренном поглощении в ней энергии индуцирующего её лазерного импульса. Определение внутренних параметров плазмы лазерной искры по поглощению индуцирующего импульса.
- 12) **стр.92.** Какой смысл в усложнении формулы (11), где вместо k записано $2\pi/\lambda$?
- 13) **стр. 93.** $V_e(t) = (e/m_e) \int E(t) dt$. В этом выражении чего-то не хватает.

$\langle v_e \rangle_T \sim T = 2\pi/\omega$, где $\langle \dots \rangle_T$ означает усреднение по периоду. Если использовать для вычислений предыдущий интеграл, то средняя скорость ноль. Стоило процитировать источники литературы с выводом формул (13) и (14).

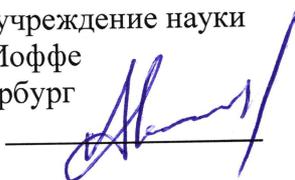
14) стр. 94. Одна из тормозящих чтение, неудачных особенностей стиля автора – часто приходится искать расшифровку обозначений в формулах. В формуле (14), «кулоновский логарифм» содержит параметры. Какие они в случае рассматриваемой лазерной искры? В тексте новый абзац начинается с *Невозможность измерения последней является врождённым недостатком описываемого в этой главе метода.* Это запутывает.

15) стр.102-109. Интересен комментарий автора по поводу $T = 40-42$ эВ, $T = 41.2$ эВ, равновесия плазмы ($T_i < T_e$), моделирования..., в контексте того, что сказано дальше. На рис.17b максимум интенсивности приходится на длину волны 10.8 нм – 114.8 эВ. Для Планковского спектра равновесного излучения черного тела это соответствует температуре $T = 114.8/2.82 = 40.7$ эВ, что практически совпадает с $T = 42$ эВ, значением абсциссы единственной экспериментальной точки на рис.42.

10. Заключение

На основании вышеизложенного считаю, что диссертационная работа П.С. Буторина 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.

Александр Витальевич Анкудинов,
Доктор физико-математических наук,
Ведущий научный сотрудник лаборатории
физико-химических свойств полупроводников,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе
Российской академии наук», г. Санкт-Петербург
«12» февраля 2026 г.



А. В. Анкудинов

Адрес: 194021, г. Санкт-Петербург,
ул. Политехническая, д.26.
Тел.: (812)297-2245, факс: (812) 297-1017
моб.т.: +7 (931)3624317
e-mail: alexander_ankudinov@mail.ioffe.ru, alex_ank@mail.ru



Подпись Анкудинова А.В. удостоверяю
зав.отделом кадров ФТИ им.А.Ф.Иоффе

Н.С. Бусыгина, Н.С. Бусыгина