О Т З Ы В

Официального оппонента

на диссертацию Кутузова Дмитрия Сергеевича

ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННАЯ ФЛУОРЕСЦЕНЦИЯ КАК МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ В СИСТЕМАХ С МАГНИТНОЙ ТЕРМОИЗОЛЯЦИЕЙ

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08-физика плазмы на совете Д 520.009.02 при НИЦ «Курчатовский институт»

1.**Актуальность темы диссертации**. Тема диссертации, несомненно, актуальна. Основное внимание уделяется определению абсолютных концентраций атомов и ионов инертных газов Ne, Ar, Xe в открытой ловушке с тороидальным дивертором ПС-1, а также определению электронной температуры методом лазерно-индуцированной флуоресценции (ЛИФ). Несмотря на достаточно богатый экспериментальный материал, и достаточно долгое использование метода, до сих пор ЛИФ, в основном, используется для определения температуры и направленных скоростей атомов и ионов плазмы. В значительной мере это вызвано необходимостью создания и применения столкновительно-излучательных моделей для интерпретации полученных сигналов флуоресценции, что может быть затруднительно в силу неполноты информации об атомных переходах и отсутствия сведений о сечениях различных атомных процессов. В работе приведены рабочие спектроскопические схемы возбуждения флуоресцентного излучения, а также предложены простые интерпретационные модели для расчета концентраций частиц плазмы. Метод ЛИФ обладает исключительно высоким пространственным, временным и спектральным разрешением, а также успешно решает проблемы зашумленности сигнала за счет отстройки лазерного излучения от длин волн флуоресцентного излучения. Указанные факторы делают его использование актуальным и оправданным на большинстве плазменных установках. Работа значительно расширяет диагностический потенциал метода, позволяя использовать его для контроля различных параметров плазмы в сложных условиях, что может быть полезно для проверки моделей и теорий описывающих состояние плазмы на различных установках. Таким образом, актуальность темы диссертации не вызывает сомнений.

2. **Научная новизна и основные результаты.**

1. Разработана и создана универсальная автоматизированная диагностическая система для измерения параметров плазмы методом ЛИФ работающая в широком диапазоне длин волн в импульсно-периодическом режиме.

2. Впервые использованы трехуровневые спектроскопические схемы инертных газов для измерений концентрации атомов неона и однократно ионизованного иона ксенона в системе с магнитной термоизоляцией.

3. Методом ЛИФ получены детальные пространственно-временные характеристики абсолютной концентрации аргона, ксенона и неона.

4. Представлены расчетные модели для атома неона NeI, иона аргона ArII и иона ксенона XeII.

5. Показано, что в определенных условиях существует возможность измерения локальных значений электронной температуры по отношению интенсивностей двух линий флуоресценции, возбуждаемых из двух различных метастабильных состояний иона Ar II.

3. **Степень обоснованности**. Все основные результаты и выводы, представленные в диссертации, убедительно аргументированы и строго научно обоснованы.

4. **Практическая значимость работы и рекомендации по использованию**.

1. На основе разработанной концепции создана универсальная автоматизированная лазерная система. Использован оптико-параметрический генератор (ОПГ) ESTLA NT342A-SH-20-AW, спектральная ширина линии которого много больше, чем ширина линий поглощения атомов и ионов в исследуемой плазме.

2. Показано, что применяемый в качестве источника излучения ОПГ позволяет реализовать компьютерное управление оперативной сменой рабочих длин волн от 190 нм до 2100 нм.

3. Разработанные методы демонстрируют возможность получения количественных оценок концентрации без сканирования линии поглощения.

4. Показано, что ЛИФ-методика обладает дополнительным диагностическим потенциалом, в частности, возможностью проведения локальных оценок параметров электронной компоненты.

5. Проведены систематические измерения концентрации атомов и ионов при различных параметрах разряда.

6. Разработаны расчетные модели атомов и ионов Ne, Ar, Xe для интерпретации экспериментальных данных.

Основное содержание работы.

В первой главе рассмотрены физические основы методов, основанных на применении оптической накачки объектов исследования и методика ЛИФ диагностики. Приведён

краткий обзор литературы по изучаемым вопросам; рассматриваются основные объекты исследований и области применения диагностики.

Во второй главе содержится описание установки ПС-1, приведено описание системы диагностики диверторной плазмы установки методом ЛИФ и системы регистрации сигналов, а также устройство лазерной системы ЛИФ.

В третьей главе рассматриваются общие принципы построения расчетных моделей для анализа флуоресцентного сигнала. Приведены результаты по оценке электронной температуры плазмы, полученной методом сравнения ЛИФ сигналов на разных длинах волн.

В четвертой главе представлены результаты проведенных экспериментов по определению концентрации частиц плазмы инертных газов.

В заключении чётко сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

Оппонент не выявил недостатков, ставящих под сомнение основные выводы и положения диссертации, выносимые автором на защиту. В качестве замечаний к работе можно отметить.

1. В тексте диссертации приводятся значения величины "сигнал/шум". При этом на стр.9, стр.11, стр.52 даны разные величины этого соотношения (8, 6-8, 11, 10). Было бы корректней либо привести в соответствие эти величины, либо объяснить, почему эти величины отличаются друг о друга.
2. На стр. 14 приводится качественная оценка изменения населенности некоего возбужденного уровня при воздействии импульса лазерного излучения имеющего прямоугольную форму по времени. Следовало бы упомянуть, что в реальном эксперименте зачастую требуется учет реальной временной и спектральной формы лазерного импульса.
3. Следовало бы привести на стр. 39 величины параметров ФЭУ ($K1K2\eta$), а на стр. 52 по вертикальной шкале рис 2.17 “световая чувствительность мА/В” следовало писать “спектральная чувствительность мА/Вт”
4. На стр. 58 параметр насыщения $S>>1$ (более 3000). При таких параметрах насыщения динамическая модель должна учитывать временную форму лазерного сигнала, где проведены подробные измерения переднего и заднего фронтов.
5. На стр. 71 рисунок 4.3 – повторяет рисунок 3.3.
6. На стр. 70 выражение “участок лазерной линии” было бы корректней заменить на выражение “участок лазерной хорды”.
7. По тексту, не часто, но встречаются опечатки, и имеются фразы, в которые можно внести редакционные правки. Например: на стр.4 пропущено слово “диапазона”, на стр. 8

можно было бы заменить слова “тем не менее” на “а также”, на стр 46 “расхождение пучка” корректнее привести выражение “расходимость пучка”, на стр 61 вместо “качественного определения температуры электронов” лучше писать “оценки температуры электронов”, на стр 69 и стр.73 мощность “8кВ” следует писать “8кВт”, и др.

Указанные замечания не влияют на научную и практическую значимость диссертационной работы и на общую положительную оценку. Работа написана на хорошем научно-техническом уровне, читается легко, материал изложен аргументированно с детальным объяснением логики рассуждений и обработки экспериментального материала. Защищаемые научные положения и выводы обоснованы. Результаты на основе которых сформулированы выводы диссертации, получены автором лично. Диссертация Кутузова Д.С. представляет собой законченную научно-квалификационную работу. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации, тема и материалы которой соответствуют специальности 01.04.08 – «Физика плазмы» и содержит все необходимые формулировки целей и задач исследований, положений, выносимых на защиту, научной новизны и практической значимости.

С учетом сказанного выше, можно констатировать, что диссертационная работа Кутузова Дмитрия Сергеевича «Лазерно-индуцированная флуоресценция как метод измерения параметров плазмы инертных газов в системах с магнитной термоизоляцией», выполнена на должном уровне, является завершенной научно-технической работой и соответствует требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842, предъявляемых к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы».

Кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией «Лазерной диагностики плазмы и взаимодействия плазмы с поверхностью», Физико-технического института им А.Ф. Иоффе (ФТИ им Иоффе), 194021, г Санкт Петербург, ул Политехническая 26, рабочий тел.: +7 (812) 2927127; мобильный тел.: +7 (950) 0078749; FAX: +7 (812) 2975416, e.mukhin@mail.ioffe.ru .

Евгений Евгеньевич Мухин

Подпись и сведения о специалисте-оппоненте Е.Е. Мухина заверяю: 23.01.2020

Ученый секретарь ФТИ им. Иоффе

Кандидат физико-математических наук М.И. Патров