Государственный научный центр РФ
Институт Теоретической и Экспериментальной Физики
им. А.И. Алиханова

На правах рукописи

Казаков Евгений Давидович

Применение методов рентгеновской и ВУФ спектроскопии для диагностики импульсных плазменных источников

специальности: 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики,
01.04.05 – оптика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва, 2008

УДК 533.9

Работа выполнена в ГНЦ РФ Институт теоретической и экспериментальной физики им. А.И. Алиханова, г. Москва.

Научные руководители:	доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, профессор Б.Ю Шарков (ИТЭФ, г. Москва)
	кандидат физико-математических наук А.П. Шевелько (ФИ РАН, г. Москва)
Официальные оппоненты:	доктор физико-математических наук, профессор И.К. Красюк (ИОФ РАН, г. Москва)
	кандидат физико-математических наук, И.А. Артюков (ФИ РАН, г. Москва)
Ведущая организация:	Институт спектроскопии РАН (г. Троицк)

Защита состоится «28» октября 2008 года в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 212.130.05 в ГНЦ РФ ИТЭФ, расположенного по адресу: г. Москва, ул. Б. Черемушкинская д.25, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГНЦ ИТЭФ.

Автореферат разослан «____» _____ 2008 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физ.-мат. наук В.В. Васильев

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

В данной работе исследовалась плазма с характерными временами жизни ~ 1-100 нс. Изучение таких плазменных источников имеет огромное значение для решения задач управляемого термоядерного синтеза. Они представляют значительный интерес как для фундаментальных исследований, так и практических приложений: рентгеновская проекционная и контактная литография, микроскопия и др.

Одним из наиболее эффективных методов исследования плазмы является рентгеновская и вакуумно-ультрафиолетовая (ВУФ) спектроскопия многозарядных ионов. Методы рентгеновской и ВУФ спектроскопии плазмы, разрабатывавшиеся на протяжении более 40 лет (см., например, [1-4]), с появлением новых фундаментальных и практических задач активно развиваются и сейчас.

В представленной работе решаются новые задачи по разработке нового метода ВУФ спектроскопии для диагностики плазмы, возникающей на конечном участке магнитоизолированных вакуумных транспортирующих линий мощных импульсных генераторов тока, и по созданию компактных светосильных приборов для регистрации спектров в области вакуумного ультрафиолета с использованием многослойных структур (многослойные структуры были изготовлены в ИФМ РАН, Нижний Новгород) в качестве диспергирующих элементов.

Применение предложенного в данной работе нового метода ВУФ спектроскопии позволяет исследовать такие сложные объекты, как плазма, возникающая в конечном анод-катодном (А-К) промежутке магнитоизолированных вакуумных транспортирующих линий (МВТЛ) сильноточных импульсных генераторов тока. Для оптимизации устройства мощных импульсных генераторов тока необходимо знать параметры плазмы, возникающей при коротком замыкании в А-К зазоре МВЛТ. Короткое замыкание, возникающее при протекании по транспортирующей линии токов мегаамперного диапазона, препятствует эффективной передаче энергии к основной нагрузке [5]. Интенсивное излучение и осколки, разлетающиеся из плазмы основной нагрузки, значительно затрудняют исследование А-К промежутка и происходящих в нём процессов. По этим причинам любая информация о коротком замыкании в А-К промежутке представляет значительный интерес.

В настоящее время разработана технология изготовления высокоэффективных короткопериодичных рентгеновских зеркал на основе многослойных интерференционных структур (далее - МС) (ИФМ РАН, Нижний Новгород) [6]. Использование подобных МС особенно перспективно в фокусирующих спектрометрах длинноволнового диапазона, где отсутствуют естественные кристаллы, например, в “водяном окне” (диапазон длин волн между К-краями поглощения кислорода и углерода (= 2.3 – 4.4 нм). При использовании более сложных отражающих поверхностей (сферических, тороидальных, параболических) можно будет получать не только высокое спектральное, но и пространственное, разрешение. Найдена возможность использовать фокусирующие кристаллические схемы спектрографов в спектральном диапазоне, где ранее применялись приборы на основе дифракционных решеток. Это имеет существенное значение при исследовании плазменных источников с малым выходом рентгеновского излучения, в том числе фемтосекундной лазерной плазмы.

Цель диссертационной работы

Целью диссертационной работы является разработка и применение новых методов рентгеновской и ВУФ спектроскопии для диагностики импульсных плазменных источников. В данной работе исследовались:

1) плазма, возникающая в анод-катодном промежутке магнито-изолированных вакуумных транспортирующих линий (МВТЛ);

2) многопроволочные Z-пинчи;

3)наносекундная лазерная плазма.

Научная новизна

Разработан спектральный метод ВУФ диагностики плазмы Fe позволяющий измерять электронную температуру в диапазоне T_e =100-300 эВ [7].

Измерена электронная температура плазмы T_e = (190 (60) эВ, создаваемой на заключительном участке транспортирующей линии мощного генератора тока *Z*-Machine в Национальной Лаборатории Сандиа [7].

Разработан фокусирующий спектрометр с многослойной структурой W/B_4 в качестве диспергирующего элемента, что позволило зарегистрировать спектры [H]- и [He]- подобных ионов Mg (? = 0.8 ? 1 нм) в отдельных выстрелах с интенсивностью лазерного излучения ~ 10 мДж [8].

Применение многослойной структуры Cr/Sc в качестве диспергирующего элемента позволило использовать фокусирующий рентгеновский спектрометр в области «водяного окна» (? = 24 – 43 ?). [9].

Практическая значимость

Разработанный метод определения электронной температуры по ВУФ спектрам железа позволяет получить важную информацию о плазме, возникающей в А-К зазоре МВТЛ. Кроме того, данный метод может

применяться для определения электронной температуры плазмы других тяжелых элементов, например, для диагностики плазмы многопроволочных вольфрамовых Z-пинчей.

Применение новых фокусирующих спектрометров с многослойными периодическими структурами в качестве диспергирующих элементов позволит измерять температуру электронов в диапазоне T_e~50-100 эВ, реализуемом в плазменных установках для проекционной ВУФ литографии [10] и микроскопии [11].

Положения, выносимые на защиту

1. Новый метод ВУФ диагностики Fe плазмы, позволяющий измерять электронную температуру в диапазоне T_e = 100 - 300 эВ.
2. Экспериментальные результаты измерения температуры на заключительном участке вакуумной транспортирующей линии установки Z-Machine.
3. Применение многослойных зеркал с заранее заданным межплоскостным расстоянием в качестве диспергирующего элемента в светосильном рентгеновском спектрометре для рентгеновской диагностики лазерной плазмы.
4. Экспериментальные результаты по регистрации спектров лазерной плазмы в области «водяного окна» (? = 24 – 43 ?) с помощью светосильного фокусирующего кристаллического спектрометра с многослойной структурой в качестве диспергирующего элемента. Высокая светосила спектрометра позволяет регистрировать спектры при очень низкой энергии лазерного импульса 1-10 мДж.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы прошли апробацию на 5 российских и международных конференциях:

X Ежегодный Симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника», Нижний Новгород, 2006 г.

XI Ежегодный Симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника», Нижний Новгород, 2007 г.,

XII Ежегодный Симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника», Нижний Новгород, 2008 г.,

XXXV Международная Конференция по Физике Плазмы и Управляемому Термоядерному Синтезу, Звенигород, 2008 г.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и списка литературы из 105 наименований. Работа изложена на 119 страницах и содержит 49 рисунков.

Содержание работы

Во **введении** проведена постановка задачи диссертационной работы, обоснована её актуальность и дано описание её структуры.

В **первой главе** приводится краткий обзор по истории развития мощных импульсных генераторов тока. Описывается техника использования многопроволочных Z-пинчей в качестве обострителей мощности для решения задач управляемого термоядерного синтеза (см., например, [12]). Обосновавается важность исследования плазмы возникающей в анод-катодном (А-К) зазоре магнитоизолированных вакуумных транспортирующих линий мощных импульсных генераторов тока.

Вторая глава посвящена определению электронной температуры плазмы, возникающей в анод-катодном промежутке сильноточного импульсного генератора “Z-Machine” (Национальная лаборатория Сандиа, США), методами ВУФ спектроскопии. Новый метод заключался в сравнении спектров плазмы, возникающей в А-К зазоре, со спектрами хорошо диагностируемой лазерной плазмы.

Работа включала следующие этапы:

Разработка спектрального метода ВУФ диагностики плазмы, позволяющего определять электронную температуру в диапазоне T_e =100-300 эВ.

Разработка оборудования для регистрации спектров в А-К зазоре МВТЛ на установке “Z-Machine”. К оборудованию предъявлялись жесткие и специфические требования. Приборы должны быть компактными, простыми в юстировке и устойчивыми к повреждению при взрыве основной нагрузки.

Проведение экспериментов на установке “Z-Machine”.

Проведение экспериментов с хорошо диагностируемой лазерной плазмой.

Теоретическое моделирование спектров плазмы железа при различных электронных температурах.

Для разработки метода определения T_e было использовано важное свойство лазерной плазмы: при умеренных лазерных потоках наносекундных импульсов на мишени (q~10^{11}?10^{14} Вт/см^2) электронная температура горячего ядра плазмы зависит только от лазерного потока q и не зависит от атомного номера A мишени (для $1<A<74$) (см., например, [13, 14]). Это вызвано взаимокомпенсацией двух факторов (при фиксированной T_e с увеличением A увеличиваются потери на ионизацию, но эти потери компенсируются увеличением поглощенной на один ион энергии лазерного излучения [13, 14]). Таким образом, эксперименты включали исследование двух лазерных плазм, создаваемых при одних и тех же лазерных потоках на Mg и Fe мишенях. Рентгеновские спектры [H]- и [He]-подобных ионов Mg были использованы для измерения T_e [15,16]. ВУФ спектры Fe исследовали при таких же потоках с помощью спектрографа скользящего падения в том же спектральном диапазоне (?~20-800 А), что и на установке “*Z*-Machine.” Эти эксперименты позволили приписать электронную температуру каждому спектру Fe в диапазоне температур T_e ~100?400 эВ, ожидаемых в плазме А-К промежутка установки “*Z*-Machine”. В дальнейшем, по результатам сравнения экспериментальных и теоретических спектров, полученных для лазерной плазмы, со спектрами, наблюдавшихся в экспериментах на установке “*Z*-

Machine”, этот метод позволил определить температуру электронов в А-К промежутке МВТЛ.

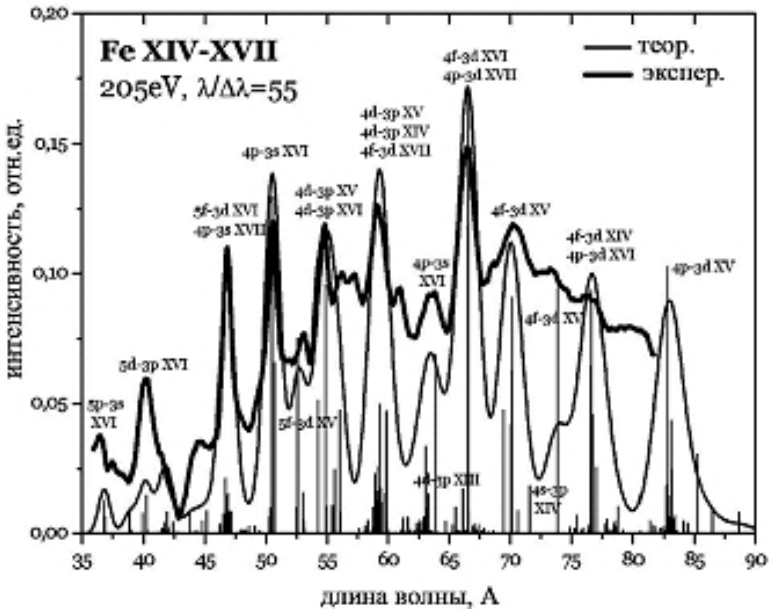

Рис.1. Сравнение экспериментального и теоретического спектров Fe при T_e=200 эВ.

Структура экспериментальных спектров и интенсивности линий хорошо соответствуют теоретическим расчетам при аналогичных электронных температурах (рис.1).

Структура спектра очень чувствительна к электронной температуре. При повышении температуры степень ионизации железа увеличивается, что наблюдается как на экспериментальных, так и на расчетных спектрах. Это приводит к сдвигу спектра в коротковолновую область. Сдвиг “центра тяжести” спектра показан на рис. 2.

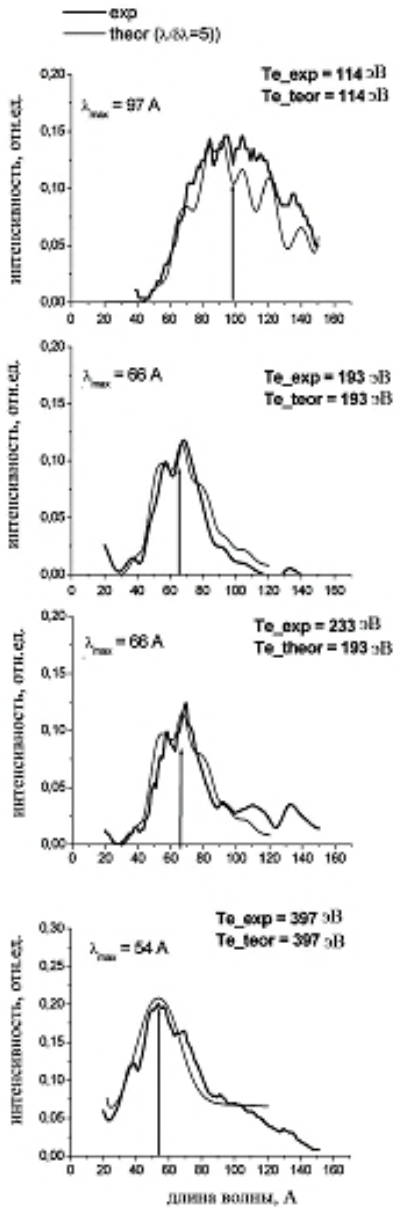

Рис.2. Сравнение экспериментальных и синтезированных теоретических спектров низкого спектрального разрешения. Температура электронов для теоретических спектров соответсвует вычислениям при условии совпадения с экспериментальными длинами волны (λ_{max} (длина волны максимальной интенсивности спектрального распределения).

Видно, что длина волны (λ_{max}, соответствующая максимуму интенсивности спектрального распределения, чувствительна к электронной температуре T_e. Отметим, что экспериментальная зависимость (λ_{max} от T_e хорошо согласуется с теоретическими расчётами (рис. 3). Экспериментальные и теоретические данные могут быть аппроксимированы формулой

$$\ln(\lambda_{max},\text{A}) = A\{1/\ T_e(\text{keV})\} + B.$$

В данном методе ошибки в коэффициентах A и B определяют точность измерения T_e, например, $(_{max}$ =70 А соответствует T_e=200 эВ (30 эВ (15%).

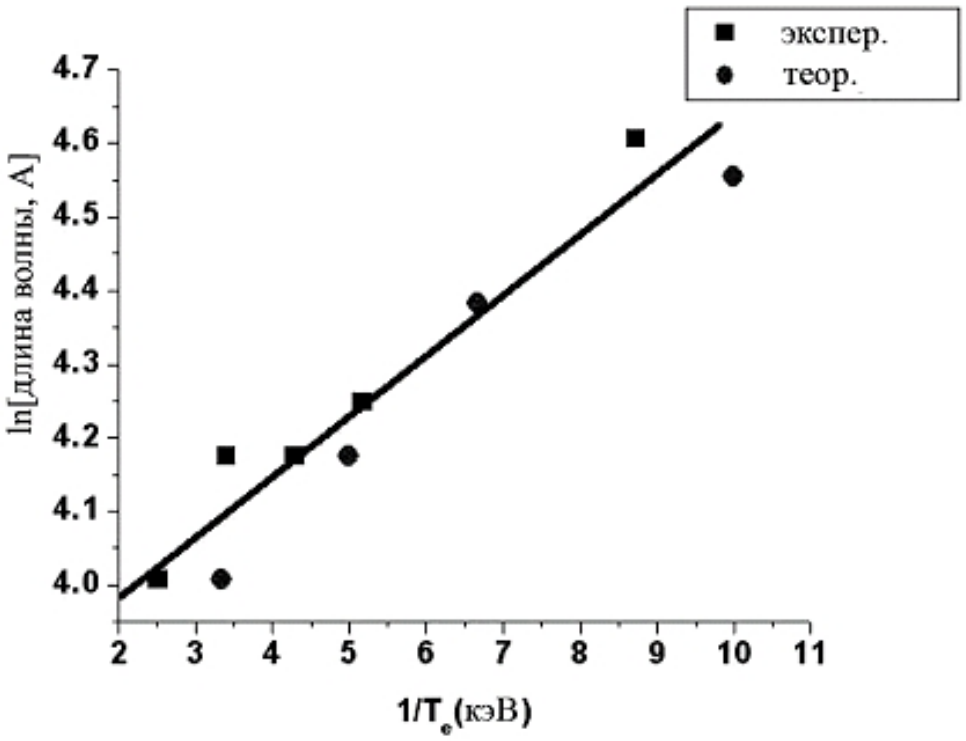

Рис.3. Экспериментальная и теоретическая зависимости $\ln((_{\max})$ от $1/T_e$.

При определении температуры плазмы, значительное внимание уделялось наблюдению ионов Fe с максимальной степенью ионизации.

Ион FeXVII является ионом с максимальной степенью ионизации, наблюдавшейся в экспериментах на установке “*Z*-Machine” (рис.4). Эта максимальная стадия ионизации может быть также использована для оценки электронной температуры. Этой стадии ионизации соответствует потенциал ионизации I=1262 эВ. В плазме с электронной температурой T_e потенциал ионизации I наиболее представленных ионов может быть оценен как I ~5?T_e для коронального и, как I ~(8(10)?T_e ? для термодинамического равновесия (см., например, [13]). Таким образом для I=1262 эВ мы имеем T_e=250 эВ и T_e=130 эВ для коронального и термодинамического равновесия, соответсвенно, или T_e=(190(60) эВ.

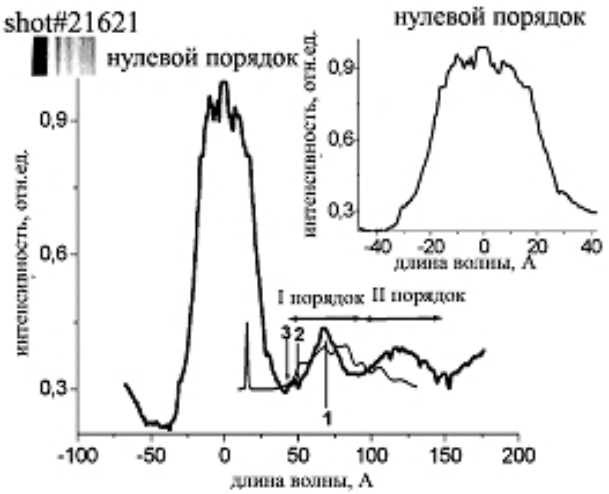

Рис.4. Идентифицированный ВУФ спектр Fe плазмы А-К промежутка (Shot # 21621 EUV, 01/11/2006). Положение максимума распределения интенсивности обозначено символом *1*. Интенсивные переходы 3*s*-4*p* иона FeXVI обозначены символом *2*. Интенсивные переходы 3*d*-5*f* в ионе FeXVI и 3*s*-4*p* в ионе FeXVII обозначены символом *3*.

В этом случае значение T_e не зависит от предположения об ионизационном равновесии: в пределах погрешности, составившей 60 эВ, значение T_e укладывается в обе модели.

Кроме того, подробно рассмотрены дополнительные факторы, которые могут оказывать влияние на результаты измерения электронной температуры (оптическая толщина плазмы, выбор модели, излучение основной нагрузки, флюоресцентное излучение стенок камеры).

В **третьей главе**, в качестве примера применения методов рентгеновской спектроскопии, приведены результаты эксперимента по определению электронной температуры и электронной плотности плазмы многопроволочных Z-пинчей по спектрам многозарядных ионов.

В эксперименте в качестве нагрузок использовали многопроволочные «звездоподобные» сборки (лайнеры). Электронную температуру определяли по отношению интенсивностей диэлектронных сателлитов и резонансных линий [H]- и [He]- подобных ионов Mg. Электронную плотность определяли из отношения интенсивностей *w* и интеркомбинационной линии Mg. В данной главе подробно описан метод измерения и обоснован выбор спектральных линий, использованных для определения параметров плазмы [15-17].

В **четвертой главе**, на основании анализа литературных источников, рассмотрены некоторые методы рентгеновской и ВУФ спектроскопии. При этом основное внимание уделялось методам определения параметров плазмы по спектрам водородоподобных и гелиеподобных ионов.

В **пятой главе** проведено описание разработки нового светосильного спектрографа на основе цилиндрического многослойного зеркала. Проведён сравнительный анализ ранее разработанных методов регистрации спектров в

рентгеновском и ВУФ диапазонах. Обоснована актуальность использования многослойных структур в фокусирующих схемах рентгеновских спектрографов. Разработана конструкция нового фокусирующего спектрографа на основе схемы Гамоша с многослойной структурой W/B_4C в качестве диспергирующего элемента.

В **шестой главе** представлены результаты экспериментов по регистрации спектров лазерной плазмы с помощью разработанного фокусирующего спектрометра на основе схемы Гамоша с многослойной структурой в качестве диспергирующего элемента.

Проведено сравнение коэффициентов отражения многослойной структуры и кристалла слюды. Для этого кристалл слюды с многослойным зеркалом устанавливался в спектрометре таким образом, чтобы многослойное зеркало (W/B_4C) занимало половину действующей апертуры спектрометра. Спектры от многослойной структуры и от кристалла слюды формировались одновременно на оси спектрометра и регистрировались одним и тем же ПЗС детектором. Примеры спектров приведены на рис.5. Так как многослойная структура (МС) и кристалл слюды имеют разные межплоскостные периоды *2d* (24 А и 19,88 А соответственно), приведены две шкалы длин волн. Используя интегральные интенсивности линий, можно оценить отношение интегральных коэффициентов отражения, которое составило для (=8,4 А (резонансная линия $Ly_($ [H]-подобного иона Mg)

((МС)/((слюда)=1.3(0,14 ((11%).

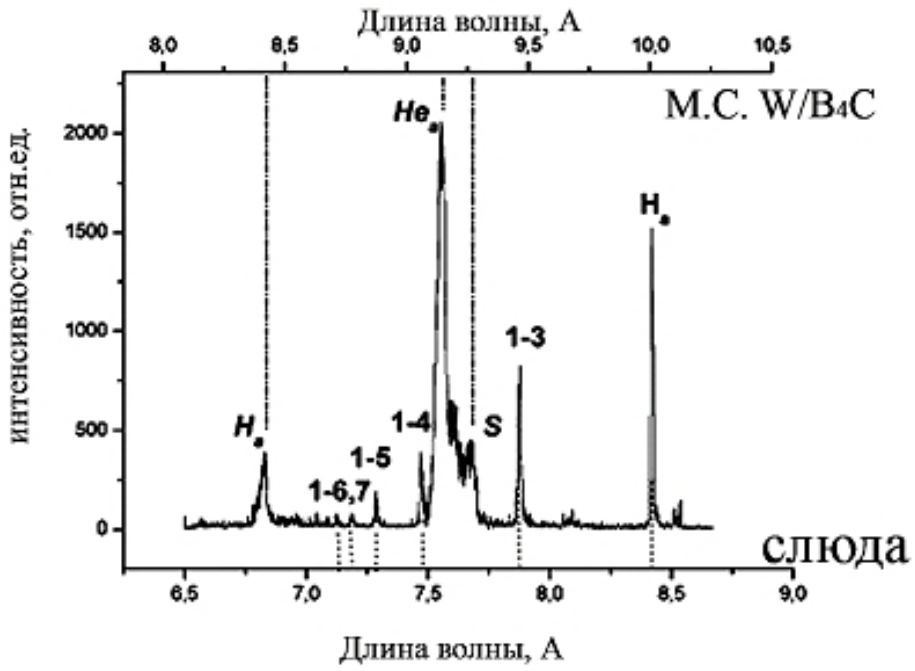

Рис.5. Рентгеновский спектр Mg лазерной плазмы (28.09.06 №8), зарегистрированный одновременно с помощью многослойной структуры (верхняя шкала) и кристалла слюды (нижняя шкала). Отмечены резонансные линии H_a и He_a водородоподобного ([H]-) и гелиеподобного ([He]-) ионов Mg, сателлитные линии (*S*) и линии главной серии в [He]-поодобном ионе.

Для регистрации спектров в диапазоне 30-40 А в качестве диспергирующего элемента применялось многослойное рентгеновское зеркало, состоящее из 130 пар слоев Cr и Sc с периодом d = 3.75 нм (зеркало изготовлено в ИФМ РАН, Нижний Новгород).

В качестве детектора излучения использовалась ПЗС линейка Toshiba TCD 1304AP, имеющая 3724 элемента шириной 8 мкм и 200 мкм высотой каждый. Для расширения спектрального диапазона детектора (вплоть до ? = 30 – 40 ?) активная область ПЗС детектора соединялась с волоконной шайбой, на которую наносился тонкий слой (~10 мкм) люминофора. Фокусирующая геометрия спектрометра наряду с высокой эффективностью ПЗС детектора обеспечивают высокую чувствительность прибора. Это позволяло регистрировать рентгеновские спектры в этих экспериментах при малых энергиях лазерного импульса (вплоть до 1 мДж).

На рис. 6 приведен спектр излучения плазмы углерода, зарегистрированный с помощью Cr/Sc многослойного зеркала в качестве дисперсионного элемента. Спектральное разрешение (/((~ 100 позволило наблюдать резонансные линии [H]- и [He]- подобных ионов и переход (1-3) в [He]-подобном ионе.

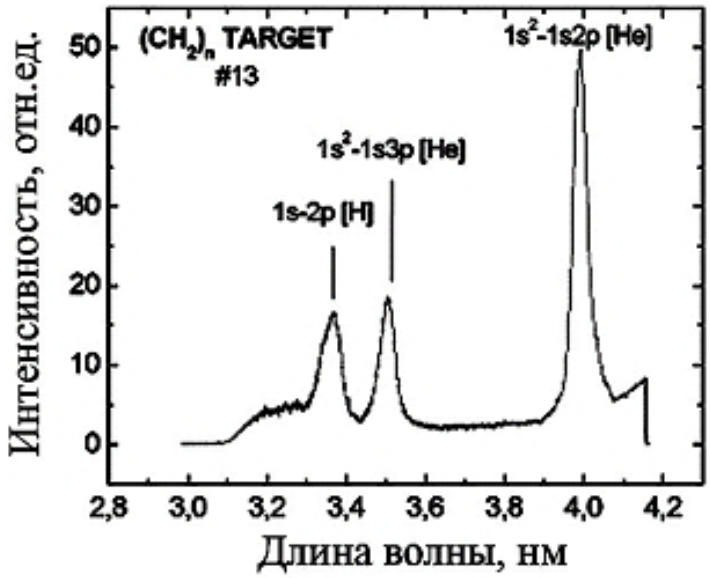

Рис.6. ВУФ спектр CVI-CV ионов углерода. Отмечены резонансные линии водородоподобного ([H]-) и гелиеподобного ([He]-) ионов углерода и переход 1-3 в [He]-ионе.

Таким образом продемонстрирована возможность регистрации спектров плазмы в «водяном окне». Проведенные исследования показали перспективность применения МС в фокусирующих спектрометрах.

Заключение

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе:

1. Разработан спектроскопический метод для измерения электронной температуры T_e лазерной плазмы Fe и плазмы Fe в A-K промежутке установки "Z-Machine". Этот метод основан на сравнении ВУФ спектров, зарегистрированных в A-K промежутке со спектрами хорошо диагностируемой лазерной плазмы и теоретическими расчётами. Разработанный спектральный метод ВУФ диагностики Fe плазмы позволяет измерять электронную температуру в широком диапазоне T_e =50-300 эВ. Этот метод может применяться не только для диагностики плазмы Fe, но так же для плазм других тяжелых элементов.

2. Получено значение электронной температуры плазмы, создаваемой в A-K зазоре T_e=(200 (30) эВ. Это значение было получено по результатам анализа спектров лазерной плазмы, теоретических расчетов, а так же данных, полученных в экспериментах на установке "Z-Machine", в результате наблюдения положения максимума спектрального распределения ($(_{max}$) в диапазоне $($~50-70 A в предположении коронального ионизационного равновесия. Так же, в результате наблюдения максимальной степени ионизации FeXVII была получена оценка электронной температуры T_e = = (190(60) эВ. При этом значение не зависит от типа ионизационного равновесия.

3. Впервые в качестве диспергирующего элемента в фокусирующих рентгеновских спектрометрах были применены короткопериодные многослойные структуры (МС), нанесенные на кристалл слюды. Многослойная структура W/B_4C с периодом d = 12 ? нанесена на плоскую поверхность кристалла слюды с последующим изгибом на радиус R=20 мм. С использованием разработанного нового фокусирующего спектрометра на основе схемы Гамоша с многослойной структурой в качестве диспергирующего элемента зарегистрированы спектры [H]- и [He]- подобных ионов Mg в лазерной плазме со спектральным разрешением (/((~200.

4.Впервые зарегистрированы спектры лазерной плазмы в ВУФ области спектра (30 - 40 A) с использованием новых фокусирующих многослойных структур. Благодаря высокой чувствительности спектрометра спектры регистрировались за одну вспышку лазера при очень низкой энергии лазерного импульса: 1-10 мДж. Применение новых спектрометров позволит измерять температуру электронов в диапазоне T_e~50-100 эВ, реализуемом в плазменных установках для проекционной ВУФ литографии и микроскопии.

Литература

Б. Эдлен, *УФН* **89** (3), 483-510 (1966).

Г. Грим, Спектроскопия плазмы. Атомиздат, М., 1969.
Диагностика плазмы. Под ред. Р. Хаддлстоуна и С. Леонарда. “Мир,” М., 1967.
Методы исследования плазмы. Под ред. В. Лохте-Хольтревена. “Мир,” М., 1971.
W. A. Stygar, H. C. Ives, D. L. Fehl, et al, *Phys. Rev.* E 69, 046403 (2004)
M.S. Bibishkin, N.I. Chkhalo, A.A. Fraerman et al., *Nucl. Instrum. and Methods A* 543, 333, (2005).
А.П. Шевелько, Д.Е. Блисс, Е.Д. Казаков и др., , *Физика Плазмы*, Т.34, № 11, с.1-12 (2008)
М.С. Бибишкин, Е.Д. Казаков, В.И. Лучини др., *Квантовая Электроника*, Т. 38, № 2, с. 169-171 (2008).
Ю.Э.Бороздин, Е.Д. Казаков, В.И. Лучин и др. *Письма в ЖЭТФ*, Т.87, вып.1, с. 33-35 (2008).
Vivek Bakshi, EUV Sources for lithography, Ed. SPIE Press, Bellingham, Washington, USA, 2006
Рентгеновская оптика и микроскопия./ Под ред. Г. Шмаля, Д. Рудольфа. М.: Мир, 1987
Л. И. Рудаков, М. В. Бабыкин, А. В. Гордеев и др. Генерация и фокусировка сильноточных релятивистких электронных пучков. М.: Энергоатомиздат, 1990.
Бойко В.А., Крохин О.Н., Склизков Г.В. // *Труды ФИАН.* 1974. Т.76. С.186.
Ананьин О. Б., Афанасьев Ю. В., Быковский Ю. А., Крохин О. Н., «Лазерная плазма.», М.: МИФИ, 2003.
Л. П. Пресняков. *УФН* 119, 49 – 74 (1976).
Вайнштейн Л.А., Сафронова У.И., Урнов А.М. // *Труды ФИАН.* 1980. Т.119. С.13.
Виноградов А.В., Скобелев И.Ю., Юков Е.А. // *Квантовая электроника*. 1975. Т.2. С.1146

Публикации автора по теме диссертации

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 4 журналах, включенных ВАК РФ в перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий:

М.С. Бибишкин, Е.Д. Казаков, В.И. Лучин, Н.Н. Салащенко, В.В. Чернов, Н.И. Чхало, А.П. Шевелько, «Новые фокусирующие многослойные структуры для рентгеновской спектроскопии плазмы.», *Квантовая Электроника*, Т. 38, № 2, с. 169-171 (2008),

Ю.Э.Бороздин, Е.Д. Казаков, В.И. Лучин, Н.Н. Салащенко, И. Ю. Толстихина, В.В. Чернов, Н.И. Чхало, А.П. Шевелько, О. Ф. Якушев, «Рентгеновская и ВУФ спектроскопия плазмы с использованием новых фокусирующих многослойных структур.» *Письма в ЖЭТФ*, Т.87, вып.1, с. 33-35 (2008),

V. V. Ivanov, V. I. Sotnikov, A. Haboub, A.P. Shevelko, A.L. Astanovitskiy, A. Morozov, E. D. Kazakov, and S.D. Altemara, «Mitigation of the Plasma-Implosion Inhomogeneity in Starlike Wire-Array *Z* Pinches.», *Phys. Rev. Lett.* , 100, 025004 (2008)

А.П. Шевелько, Д.Е. Блисс, Е.Д. Казаков, М.Г. Мазаракис, Д.С. МакГарн, Л.В. Найт, К.В. Струве, И.Ю. Толстихина, Т. Уикс, «ВУФ спектроскопия плазмы, создаваемой в конечном анод-катодном промежутке сильноточного импульсного генератора "Z-Machine" (SNL).», *Физика Плазмы*, Т.34, № 11, с.1-12 (2008)