Спектроскопическая ВУФ диагностика высокотемпературной плазмы железа с использованием метода сравнения

А.П.Шевелько

Рассмотрено развитие нового метода сравнения, используемого для оценки температуры электронов T_e плазмы тяжелых элементов, а также высокотемпературной лазерной плазмы железа. Для этого при одинаковых потоках лазерного излучения на мишени исследованы две лазерные плазмы – плазма магния и плазма железа. Диагностика плазмы проводилась по рентгеновским спектрам H- и He-подобных ионов Mg. ВУФ спектры ионов Fe регистрировались в диапазоне длин волн 15–150 Å. В результате исследовано изменение структуры ВУФ спектров ионов Fe в зависимости от T_e в диапазоне 100–400 эВ. Эти данные необходимы для диагностики плазменных источников, содержащих элемент железа.

Ключевые слова: *рентгеновская и ВУФ спектроскопия и диагностика плазмы, лазерная плазма, многозарядные ионы, рентгеновские спектрометры.*

1. Введение

В последнее время большой интерес вызывает исследование плазмы тяжелых элементов, что связано, главным образом, с программой проведения управляемого термоядерного синтеза (УТС) и разработкой новых интенсивных источников рентгеновского излучения. Тяжелые элементы (элементы с большим атомным весом A_Z) представляют собой наиболее трудные для спектроскопического исследования атомные системы. Спектроскопическая диагностика, самый информативный метод исследования высокотемпературной плазмы, в этом случае сильно затруднена из-за сложной структуры спектров. Однако именно они особенно важны для научных исследований: это спектры ионов W и Bi в плазме мощных Z-пинчей (материал проволочных сборок), спектры ионов Au для инерционного лазерного УТС (материал полых цилиндрических мишеней типа hohlraum), спектры ионов Mo и W в плазме токамаков (материал диверторов), спектры ионов Sn в плазменных источниках, предназначеннных для проекционной нанолитографии (см., напр., работы [1–6] и приведенные в них ссылки). Большой интерес вызывает и исследование плазмы железа – основного элемента нержавеющей стали – конструкционного материала практически всех лабораторных установок. При проведении экспериментов необходимо учитывать различные эффекты: взаимодействие плазмы со стенками вакуумных камер, распыление материала стенок, замыкание межэлектродных промежутков и др. Обычно Fe не является основным элементом плазменных источников, поэтому требуются спектроскопические данные о плазме железа при умеренных температурах электронов (T_e < 500 эВ), т.е. в ВУФ области спектра. Получение новых экспериментальных и теоретических данных о плазме железа приобретает большое значение.

А.П.Шевелько. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53;
e-mail: apshev51@gmail.com

Поступила в редакцию 28 февраля 2022 г., после доработки – 29 марта 2022 г.

В наших работах [7–12] для исследования плазмы тяжелых элементов предложен новый метод сравнения, основанный на сравнении исследуемых спектров со спектрами хорошо диагностированной лазерной плазмы. Диагностика плазмы проводится по рентгеновским спектрам легких элементов, имеющих структуру водородо- и гелиеподобных (H- и He-подобных) ионов. Метод успешно использовался для диагностики лазерной плазмы вольфрама [7, 9] и молибдена [10, 11], плазмы железа [8]. В настоящей работе этот метод получил дальнейшее развитие и использован для диагностики высокотемпературной лазерной плазмы железа. Целью работы является исследование структуры ВУФ спектров ионов Fe в зависимости от T_e в диапазоне 100–400 эВ. Эти данные необходимы для диагностики плазменных источников, содержащих элемент Fe, который входит в состав конструкционных материалов практически всех лабораторных установок.

2. Краткое описание метода сравнения

Методы рентгеновской спектроскопии широко используются для диагностики лабораторной и астрофизической плазмы. К настоящему времени наиболее детально разработаны методы спектроскопической диагностики по спектрам H- и He-подобных многозарядных ионов. Спектры таких ионов для элементов с атомными номерами A_N = 6–30 хорошо исследованы и широко используются для измерения температуры электронов T_e в плазме от ~100 эВ до нескольких кэВ (см., напр., [13–15]).

Рентгеновские и ВУФ спектры плазмы тяжелых элементов обычно имеют сложную структуру, отличную от таковой для H- и He-подобных ионов, а переналожение в этих спектрах огромного количества линий приводит к появлению квазиконтинуума, что значительно усложняет спектроскопическую диагностику такой плазмы. Тем не менее структура и распределение интенсивностей в спектрах очень чувствительны к T_e. Это обстоятельство и используется в новом методе сравнения для оценки T_e плазмы тяжелых элементов.

В новом методе сравнения [7–12] для определения электронной температуры T_e плазмы тяжелых элементов предлагается сравнивать исследуемые спектры со спек-

трами хорошо диагностируемой лазерной плазмы. Диагностика плазмы проводится по спектрам легких элементов, имеющих структуру H- и He-подобных ионов. При этом спектры легких и тяжелых элементов исследуются при одинаковых потоках лазерного излучения на мишени. Условия применимости и ограничения метода детально рассмотрены в [7]. В частности, основными условиями являются наличие коронального равновесия и слабая или известная зависимость T_e от атомного веса A_Z материала лазерной мишени ($T_e \sim A_Z^{2/9}$, см., напр., [16, 17]).

Очевидно, что при повышении T_e в плазме тяжелых элементов увеличивается кратность ионизации. Это приводит как к изменению структуры спектров, так и к сдвигу спектра в коротковолновую область. Оба этих обстоятельства могут быть использованы для диагностики плазмы. В настоящей работе исследуется зависимость структуры спектров ионов Fe от температуры T_e. Сдвиг центра тяжести в распределении интенсивностей в спектрах ионов Fe использовался для оценки T_e в плазме, создаваемой в конечном анод-катодном промежутке сильноточного импульсного генератора Z-Machine (Sandia National Laboratories) [8].

Главное в методе сравнения – изучение зависимости структуры и распределения интенсивностей в спектрах от T_e. Это позволяет "приписать" определенную температуру каждому спектру. Сравнение таких "калиброванных" по T_e спектров со спектрами исследуемых плазменных источников позволяет оценить T_e этих источников. Заметим, что в экспериментальном методе сравнения для оценки T_e используются только особенности структуры спектров и распределения интенсивности в них. При этом не требуется ни идентификации переходов, ни знания ионизационного состава и кратности ионизации.

3. Эксперимент

Схема эксперимента по исследованию лазерной плазмы приведена на рис.1. Для создания плазмы использовался лазер на неодимовом стекле, излучение которого (λ = 0.53 мкм, E_{las} = 1 Дж, Δt = 2 нс) фокусировалось на массивную мишень из железа или магния (Fe- или Mg-мишень) линзой с фокусным расстоянием f = 300 мм. Одновременно использовались два спектрометра: рентгеновский фокусирующий кристаллический спектрометр (XRS-1) и ВУФ спектрометр скользящего падения (GIS-1).

Электронная температура лазерной плазмы варьировалась путем изменения плотности потока лазерного излучения на мишенях. Для этого изменялось расстояние ΔX между линзой и мишенью при постоянной энергии лазерных импульсов E_{las} = 1 Дж. В условиях оптимальной фокусировки диаметр пятна ϕ составлял ~20 мкм, что соответствовало плотности потока q лазерного излучения на мишени ~10^{14} Вт/см^2. При этом электронная температура лазерной плазмы T_e могла достигать ~600 эВ [18]. Для ее уменьшения необходимо было существенно уменьшать плотность потока q на мишени. Это осуществлялось за счет увеличения размеров фокального пятна на мишени при фиксированной энергии лазерного импульса E_{las} = 1 Дж. Размер фокального пятна изменялся в результате уменьшения расстояния между фокусирующей линзой и мишенью и варьировался от ~50 до ~750 мкм при смеще-

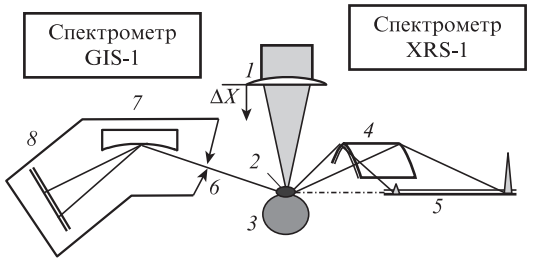

Рис.1. Схема эксперимента:
1 – фокусирующая линза; ΔX – смещение линзы относительно положения оптимальной фокусировки; *2* – лазерная плазма; *3* – Mg- или Fe-мишень; спектрометр XRS-1: *4* – цилиндрический кристалл слюды с радиусом изгиба 20 мм; *5* – детектор излучения (ПЗС-линейка); спектрометр GIS-1: *6* – входная щель; *7* – сферическая дифракционная решетка; *8* – детектор излучения (фотопленка УФ-4).

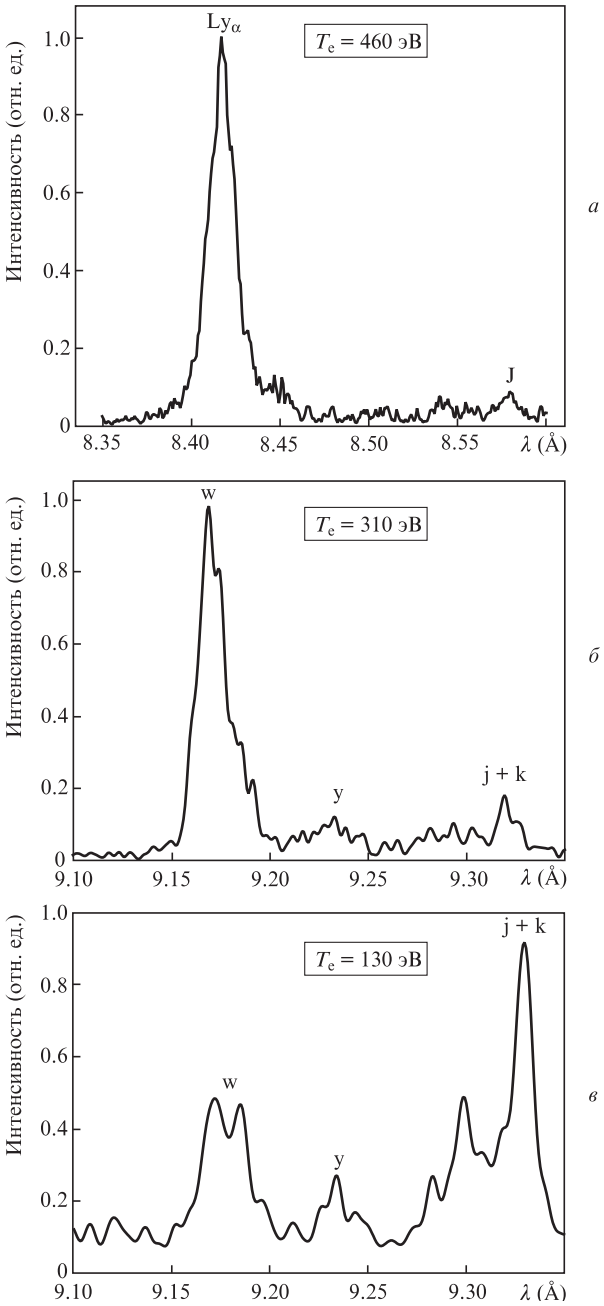

Рис.2. Примеры рентгеновских спектров ионов Mg при различных температурах T_e: *а* – в окрестности резонансной линии Ly$_\alpha$ H-подобного иона Mg при ΔX = 0.8 мм; *б*, *в* – в окрестности резонансной линии w He-подобного иона Mg при ΔX = 1.6 и 5.6 мм соответственно.

нии линзы от положения оптимальной фокусировки на расстояния ΔX от 0.6 до 7.6 мм. Экспериментально наблюдалась линейная зависимость $\phi \sim \Delta X$.

Электронная температура определялась методами рентгеновской спектроскопии. Рентгеновские спектры H- и He-подобных ионов Mg исследовались с помощью фокусирующего кристаллического спектрометра [19, 20], выполненного по схеме Гамоша [21]. В этой схеме кристалл изогнут в форме поверхности цилиндра, а источник рентгеновского излучения (лазерная плазма) и плоскость детектора располагаются на оси цилиндра. При отражении от изогнутого кристалла излучение на каждой длине волны фокусируется в точке на оси спектрометра (рис.1). Благодаря такой геометрии фокусировки прибор имеет высокую эффективность в широком спектральном диапазоне [19, 20]. В спектрометре диспергирующим элементом служил кристалл слюды ($2d$ = 19.84 Å) с радиусом изгиба 20 мм. Рентгеновские спектры регистрировались с помощью ПЗС-линейки (Toshiba TCD 1304 AP), состоящей из 3724 ячеек с шириной 8 мкм и высотой 200 мкм.

Рентгеновские спектры многозарядных ионов Mg регистрировались в первом порядке отражения от кристалла слюды за один лазерный импульс. Спектральная разрешающая сила $\lambda/\delta\lambda$ = 500–1000. В качестве примера на рис.2 приведены спектры ионов магния в окрестностях H- и He-подобных резонансных линий (Ly_α и w соответственно) при различных расстояниях ΔX.

ВУФ спектры ионов железа исследовались с помощью спектрометра скользящего падения GIS-1 с дифракционной решеткой 300 штрих./мм (радиус 1 м, угол скольжения 4°, покрытие W/Re) [22, 23]. В спектрометре использовалась внероуландовская схема, когда спектр регистрируется на плоскости, перпендикулярной дифрагируемым лучам (см. рис.1). Точная фокусировка осуществлялась только для центральной длины волны λ_0, которая соответствует точке пересечения плоскости регистрации с кругом Роуланда. Однако из-за малой угловой апертуры спектрометра возможна регистрация спектра в достаточно широком спектральном диапазоне, $\lambda_0 \pm \Delta\lambda$. Благодаря использованию внероуландовской схемы регистрации удалось значительно упростить установку и юстировку прибора.

В качестве детектора излучения в спектрометре GIS-1 применялась фотопленка УФ-4, которая находилась на расстоянии 90 мм от центра дифракционной решетки, что соответствовало центральной длине волны $\lambda_0 \sim 55$ Å. Между входной щелью и решеткой устанавливалась диафрагма шириной 1.5 мм. Входная щель GIS-1 шириной 15 мкм располагалась на расстоянии 20 мм от лазерной плазмы, создаваемой на поверхности Fe-мишени.

Денситометрические характеристики фотопленки УФ-4 были определены для спектрального диапазона 50–200 Å с помощью ВУФ источника на основе плазмы капиллярного разряда [24]. Зарегистрированные на фотопленке ВУФ спектры были отсканированы с помощью предварительно калиброванного сканера (Epson Perfection 4990 Photo) и оцифрованы посредствам специальной 8-битной программы (Scion Image for Windows) [25]. Перевод шкалы оптической плотности D в шкалу относительной интенсивности проводился по данным калибровки фотопленки УФ-4 для λ = 49 Å. Шкала длин волн восстанавливалась по реперным линиям H- и He-подобных

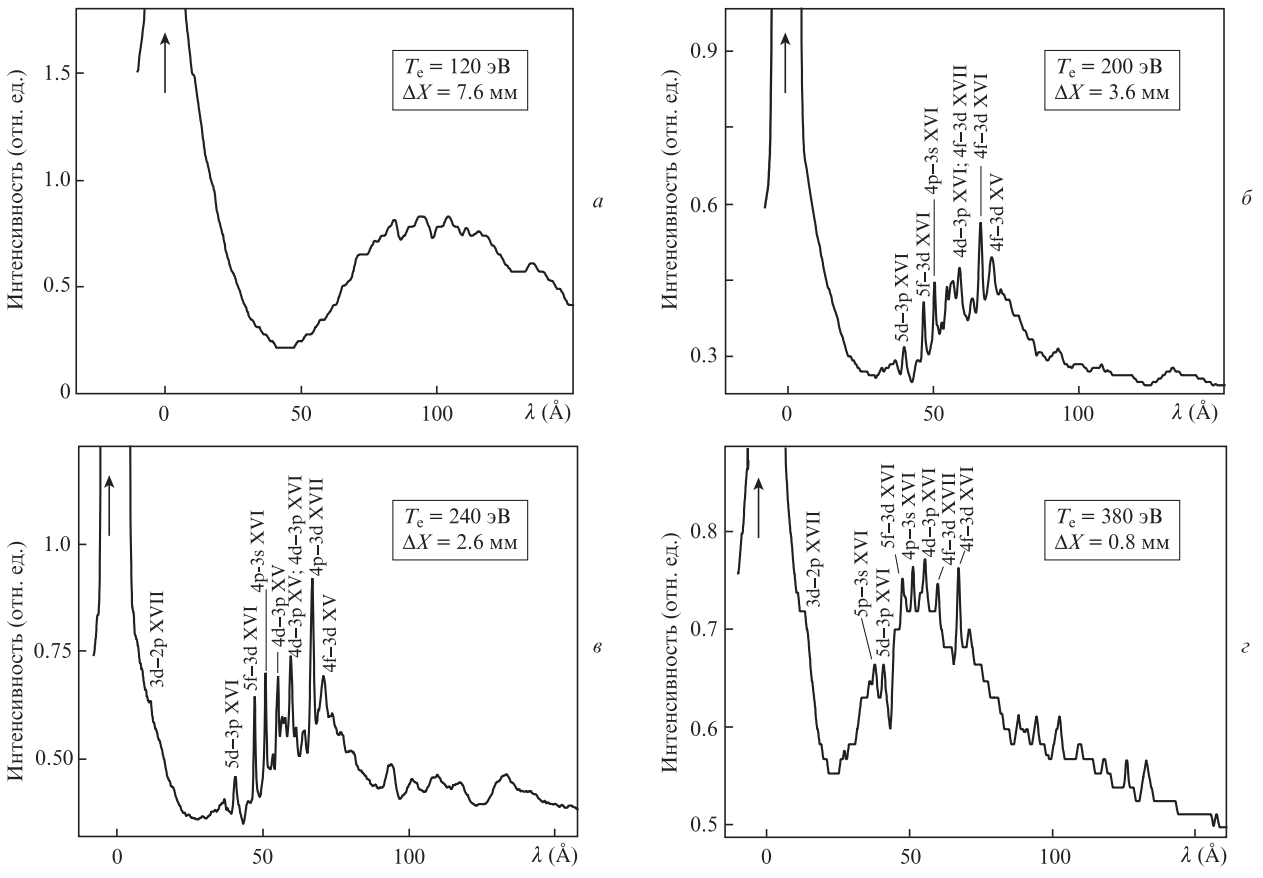

Рис.3. ВУФ спектры лазерной плазмы железа при различных положениях фокусирующей линзы ΔX и различных температурах электронов T_e. Положения нулевого порядка (λ = 0) отмечены вертикальными стрелками.

ионов углерода (в этом случае использовалась полиэтиленовая CH_2-мишень). Оцифрованные ВУФ спектры ионов Fe при различных положениях ΔX фокусирующей линзы представлены на рис.3.

4. Результаты и их обсуждение

Для измерения электронной температуры использовались рентгеновские спектры ионов Mg (см. рис.2). Электронная температура He-подобных ионов $T_{e\,He}$ измерялась по отношению интенсивностей диэлектронных сателлитов j + k и резонансной линии w (обозначения взяты из [13–15]), температура H-подобных ионов $T_{e\,H}$ – по отношению интенсивностей диэлектронного сателлита J и резонансной линии Ly_α. В обоих случаях для нахождения T_e использовались данные теоретических расчетов [15]. Концентрация электронов N_e определялась по отношению интенсивностей интеркомбинационной (y) и резонансной (w) линий He-подобного иона Mg [26]. Измеренные зависимости $1/T_{e\,H}$ и $1/T_{e\,He}$ от положения ΔX фокусирующей линзы приведены на рис.4. Они хорошо аппроксимируются линейной функцией

$$1/T_e = a + b(\Delta X), \qquad (1)$$

где $a = 1.92 \pm 0.13$, $b = 0.87 \pm 0.05$ (рис.4); T_e измеряется в кэВ, ΔX – в мм. Ошибка в определении коэффициентов a и b (~6% по среднеквадратичному разбросу) определяла точность измерения температуры T_e примерно в 6%. Концентрация электронов N_e, измеренная по отношению интенсивностей резонансной и интеркомбинационной линий He-подобных ионов Mg [26] (см. рис.2), равнялась $(1–2) \times 10^{20}$ см$^{-3}$ при всех значениях ΔX.

Метод изменения плотности потока q лазерного излучения на мишени путем его расфокусировки при фиксированной энергии лазерного импульса ($E_{las} = 1$ Дж) обладает рядом преимуществ. Линейная аппроксимация (1) при больших значениях ΔX хорошо согласуется с канонической зависимостью $T_e \sim q^{4/9}$ [16]:

$$1/T_e \sim 1/q^{4/9} \sim \phi^{8/9} \sim \Delta X^{8/9}. \qquad (2)$$

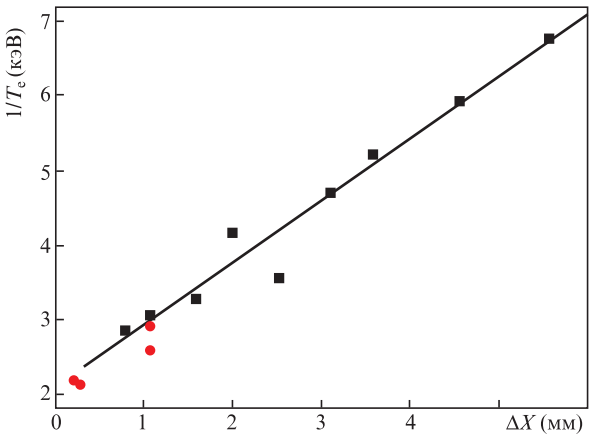

Рис.4. Измеренные значения $1/T_e$ для He-подобных (квадраты) и H-подобных (кружки) ионов Mg в зависимости от положения ΔX фокусирующей линзы. Прямая линия – результат аппроксимации $1/T_e = a + b(\Delta X)$.

Это показывает, что при таком методе изменения плотности потока q влияние расходимости лазерного излучения и разлета плазмы на q можно свести к минимуму, как это наблюдалось в [12, 19]. Измерение зависимости $T_e(\Delta X)$ в широком диапазоне ΔX позволяет, в конечном счете, повысить точность экспериментальных данных.

ВУФ спектры железа регистрировались при различных положениях ΔX фокусирующей линзы и, следовательно, при различных температурах T_e. Электронная температура для каждого значения ΔX определялась по измерениям в рентгеновском диапазоне спектра (рис.4, формула (1)). ВУФ спектры лазерной плазмы железа в широком диапазоне длин волн и для T_e = 120–380 эВ представлены на рис.3. При увеличении T_e наблюдались изменение структуры спектра и сдвиг области максимальной интенсивности в коротковолновую область спектра. Как указывалось в разд.2, в экспериментальном методе сравнения для оценки T_e можно использовать только особенности структуры и распределения интенсивностей спектров. При этом не требуется ни идентификации переходов, ни знания ионизационного состава и кратности ионизации. Тем не менее для установления ограничений метода в случае исследования плазмы железа идентификация спектральных линий в спектре была проведена. При этом использовались данные работ [8, 27].

Спектральные линии, наблюдавшиеся в диапазоне λ = 35–85 Å, были идентифицированы как переходы с изменением главных квантовых чисел 4 → 3 и 5 → 3 в ионах FeXIV–FeXVII (см. рис.3). При повышении температуры кратность ионизации ионов железа увеличивается, что приводит к сдвигу экспериментальных спектров в коротковолновую область. Длина волны λ_{max}, соответствующая максимуму интенсивности спектра, также чувствительна к электронной температуре T_e. Это обстоятельство было использовано для оценки T_e в плазме железа, создаваемой в конечном анод-катодном промежутке сильноточного импульсного генератора Z-Machine (Sandia National Laboratories) [8]. Другой отличительной особенностью ВУФ спектров ионов Fe является структура нулевого порядка дифракции. При низких температурах нулевой порядок представляет собой гладкий пик. При $T_e \geqslant 250$ эВ в структуре нулевого порядка появляется особенность вблизи $\lambda \sim 15$ Å. Эта длина волны может соответствовать резонансному переходу в Ne-подобном ионе FeXVII. Наличие излучения этих ионов накладывает ограничение на метод сравнения в ВУФ области спектра – применение этого метода для ВУФ диагностики плазмы, вероятно, ограничено температурой $T_e \leqslant 300$ эВ. При более высоких температурах наблюдалось резкое увеличение выхода мягкого рентгеновского излучения в районе λ = 10 Å. Этот спектральный диапазон соответствует L-спектрам ионов железа. Спектральные линии основных серий этих ионов заполняют диапазон 6–15 Å. В этом случае спектр представляет собой суперпозицию огромного числа линий. Более эффективная диагностика может быть основана на методах рентгеновской спектроскопии.

Таким образом, в результате экспериментальных исследований лазерной плазмы железа можно выделить три особенности спектра, чувствительные к температуре T_e (рис.5): структура спектра (спектральный диапазон $\lambda \sim 30–90$ Å), длина волны λ_{max} максимума распределения интенсивности, а также структура нулевого порядка. Последняя используется для нахождения отраничений на

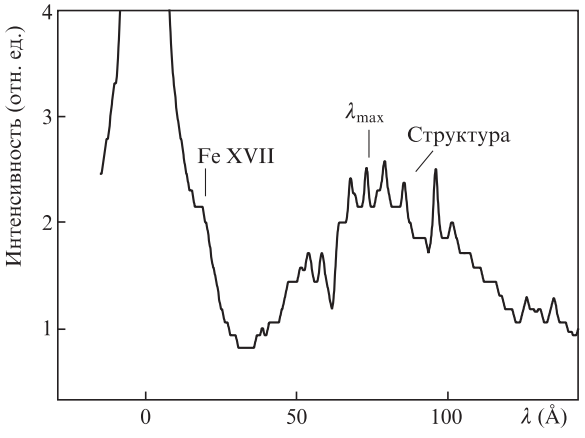

Рис.5. Особенности ВУФ спектра ионов Fe, чувствительные к температуре T_e.

применение метода со стороны высоких температур. Структура спектра (настоящая работа) и длина волны λ_{max} [8] могут быть использованы для диагностики плазмы железа.

5. Выводы

С использованием метода сравнения проведена оценка температуры электронов высокотемпературной плазмы Fe. Эксперименты включали исследование двух лазерных плазм, создаваемых при одинаковых потоках лазерного излучения на Mg- и Fe-мишенях. Рентгеновские спектры H- и He-подобных ионов Mg использовались для измерения T_e. Спектры в диапазоне $\lambda = 8-10$ Å регистрировались с помощью рентгеновского кристаллического фокусирующего спектрометра, ВУФ спектры Fe в области $\lambda \leqslant 150$ Å – с помощью спектрометра скользящего падения. В результате исследовано изменение структуры ВУФ спектров ионов Fe в зависимости от T_e, что позволило оценить электронную температуру для каждого спектра в диапазоне 100–400 эВ.

Автор выражает глубокую благодарность Е.Д.Казакову (НИЦ "Курчатовский институт") за помощь при обработке экспериментальных данных.

1. Matzen M.Keith., Sweeney M.A., Adams R.G., et al. *Phys. Plasmas,* **12**, 055503 (2005).
2. Grabovski E.V., Sasorov P.V., Shevelko A.P., et al. *Matter Radiat. Extrem.*, **2**, 129 (2017).
3. Александров В.В., Волков Г.С., Грабовский Е.В и др. *Физика плазмы*, **42**, 978 (2016).
4. Campbell E.M., Goncharov V.N., Sangster T.C., et al. *Matter Radiat. Extrem.*, **2**, 37 (2017).
5. Chowdhuri M.B., Morita S., Goto M., et al. *Plasma Fus. Res.*, **2**, S1060 (2007).
6. Bakshi V. (Ed.) *EUV Sources for Lithography* (Billingham: USA SPIE Press, 2006).
7. Шевелько А.П. *Квантовая электроника*, **41**, 726 (2011) [*Quantum Electron.*, **41**, 726 (2011)].
8. Шевелько А.П., Блисс Д.Е., Казаков Е.Д. и др. *Физика плазмы*, **34**, 1021 (2008).
9. Andreev S.N., Shevelko A.P., Tolstikhina I.Yu., et al. *EPJ Web Conf.*, **132**, 02022 (2017).
10. Shevelko A.P., Yakushev O.F., Vainshtein L.A., et al. *Phys. Plasmas*, **25**, 073306 (2018).
11. Shevelko A.P., Andreev S.N., Tolstikhina I.Yu. *JQSRT*, **265**, 107565 (2021).
12. Шевелько А.П. *Квантовая электроника*, **51**, 453 (2021) [*Quantum Electron.*, **51**, 453 (2021)].
13. Gabriel A.H. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **160**, 99 (1972).
14. Пресняков Л.П. *УФН*, **19**, 49 (1976) [*Sov. Phys. Usp.*, **19**, 387 (1976)].
15. Вайнштейн Л.А., Сафронова У.И., Урнов А.М. *Труды ФИАН*, **119**, 13 (1980) [*Proc. Lebedev Phys. Inst.*, **119**, 13 (1980)].
16. Ананьин О.Б., Афанасьев Ю.В., Быковский Ю.А., Крохин О.Н. *Лазерная плазма. Физика и применение* (М.: изд-е МИФИ, 2003).
17. Быковский Ю.А., Дегтяренко Н.Н. и др. *ЖЭТФ*, **60**, 1306 (1971) [*JETP*, **33**, 706 (1971)].
18. Шевелько А.П. *Квантовая электроника*, **49**, 839 (2019) [*Quantum Electron.*, **49**, 839 (2019)].
19. Shevelko A.P. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3406**, 91 (1998).
20. Shevelko A.P., Kasyanov Yu.S., Yakushev O.F., Knight L.V. *Rev. Sci. Instrum.*, **73**, 3458 (2002).
21. Von Hámos L. *Ann. Phys.*, **17**, 716 (1933).
22. Shevelko A.P. *IOP Conf. Ser.: J. Phys.: Conf. Ser.,* **1115**, 022042 (2018).
23. Шевелько А.П., Якушев О.Ф. *Поверхность*, № 2, 51 (2003).
24. Казаков Е.Д., Шевелько А.П., Якушев О.Ф. *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, **40**, 63 (2017).
25. Казаков Е.Д., Шевелько А.П. *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, **37**, 71 (2014).
26. Виноградов А.В., Скобелев И.Ю., Юков Е.А. *Квантовая электроника* **2**, 1165 (1975) [*Quantum Electron.*, **5**, 630 (1975)].
27. Kelly R.L. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, **16**, Suppl. 1 (1987).