

УДК 533.9.082

НОВЫЙ МЕТОД ОБРАБОТКИ ВУФ-СПЕКТРОВ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ

Е.Д. Казаков¹, А.П. Шевелько²

¹НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

Наиболее информативными методами диагностики плазмы являются методы рентгеновской и ВУФ-спектроскопии. Однако при исследовании плазмы, содержащей тяжелые элементы (такие, как Fe, Mo, W), возникают серьезные трудности с обработкой и интерпретацией спектров. В работе представлен новый метод обработки ВУФ-спектров многозарядных ионов для диагностики высокотемпературной плазмы, а также приведен пример его реализации для обработки спектров плазмы мощных Z-пинчей на примере установки «Ангара-5-1». В нашей работе предлагается проводить сравнение экспериментальных спектров с модельными кривыми для заданных электронных температур [1, 2], учитывающими аппаратную функцию спектрографа, его расположение и чувствительность регистратора. Показано, что предложенный метод значительно упрощает обработку ВУФ-спектров при исследовании периферийной плазмы дейтерированных Z-пинчей по диагностической добавке Fe, а также способствует лучшему пониманию экспериментальных результатов, получаемых при исследовании излучения многопроволочных сборок.

Ключевые слова: ВУФ-спектроскопия, обработка спектров, диагностика плазмы.

NEW METHOD OF EUV SPECTRA PROCESSING FOR HIGH-TEMPERATURE PLASMA DIAGNOSTIC

E.D. Kazakov¹, A.P. Shevelko²

¹NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

²P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

One of the most informative methods of plasma diagnostics is X-ray and EUV spectroscopy. But there are a lot of difficulties with spectra processing and interpretation in case of high-Z materials (such as Fe, Mo, W) plasma is investigated. New method of EUV spectra processing is presented. Usage of this method was demonstrated for EUV spectra obtained on Angara-5-1 installation. In this article we suggest to compare experimental spectra with calculated curves for expected electron temperature [1, 2], spectrograph instrument function, geometry of experiment and detector sensitivity. There were demonstrated that proposed method made EUV spectra processing much simpler in the process of peripheral plasma of deuterated Z-pinch investigation. Also this method is helpful to interpret the experimental results in multi-wire Z-pinch radiation research.

Key words: EUV spectroscopy, spectra processing, plasma diagnostics.

Спектральные методы диагностики плазмы являются одними из наиболее эффективных и информативных инструментов для определения таких параметров, как электронная температура, электронная плотность, ионный состав и др. В работах [1–4] продемонстрировано, что использование методов ВУФ-спектроскопии для определения электронной температуры плазмы мощных Z-пинчей может быть достаточно эффективно как на периферии [4], так (в некоторых случаях) и в приосевой области [3].

Наибольшие трудности возникают при интерпретации непрерывных или квазинепрерывных спектров, регистрируемых на фотоплёнку. С одной стороны, фотоплёнка не чувствительна к электромагнитным наводкам и поэтому в ряде случаев незаменима при исследованиях на мощных импульсных установках. С другой стороны, характеристические кривые фотоплёнок линейны в не слишком широком диапазоне длин волн, что создаёт особые трудности при восстановлении спектра, когда в спектральном приборе возможно переналожение порядков отражения.

В стандартной постановке задачи при обработке экспериментальных результатов, полученных с помощью ВУФ-спектрографа, мы вынуждены восстанавливать спектр излучения исследуемого объекта по зарегистрированному спектру, чтобы определить параметры объекта. Чаще всего эта задача бывает некорректной и имеет решения только для частных случаев. В этом отношении наибольшие трудности возникают, когда исследуется плазма, состоящая из элементов с большим Z (таких, как Fe, W, Mo), так как даже при достаточно высоких электронных температурах мы имеем дело с набором из множества спектральных линий. Особенностью представленного в данной работе метода является то, что предлагается решать прямую задачу по прохождению модельного спектра с заданной электронной температурой

(по методу, описанному в работах [1—3], либо в рамках модели абсолютно чёрного тела) через всю оптическую систему спектрального тракта: с учётом аппаратной функции спектрографа, его расположения, геометрии оптического тракта и чувствительности регистратора. Распределения $I(\lambda)$, соответствующие спектру плазмы, задавались на основе предположений о температуре плазмы и экспериментальных измерений интегрального выхода ВУФ-излучения. Эти распределения можно сравнивать со спектрами, денситограммы которых достаточно просто получить с помощью калиброванного плёночного сканера. Учитывая, что алгоритм расчёта не слишком сложен и легко реализуем на современных ПК, для конкретных условий эксперимента может быть сформирован большой набор расчётных спектров при различных температурах и с учётом нормировок по интегральным измерениям ВУФ-излучения с помощью болометров или других детекторов.

Рассмотрим более подробно сам алгоритм и тонкости, которые необходимо учитывать при его реализации (рис. 1).

На первом этапе (см. рис. 1) необходимо задать предполагаемый спектр излучения. В целом ряде случаев наиболее близким к реальному, по-видимому, является распределение Планка. При исследовании вольфрамовой плазмы приближение чёрного тела по предварительным оценкам является достаточно

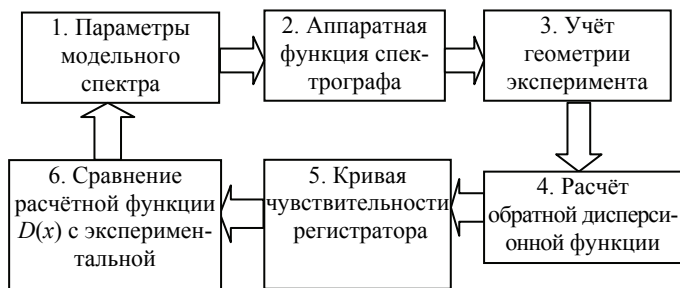


Рис. 1. Схема обработки спектров

корректным [3]. В то же время при исследовании периферийной плазмы дейтерированных Z-пинчей по спектрам диагностической добавки железа также удобно использовать планковское распределение, хотя в действительности, как показано в [1, 4], мы имеем дело с более сложной формой, которая представляет собой огибающую множества спектральных линий. В этом случае электронная температура задаётся не по модели абсолютно чёрного тела, а в соответствии с ме-

тодом, предложенным в работе [1]. Метод заключался в сравнении спектров исследуемой плазмы со спектрами хорошо диагностируемой наносекундной лазерной плазмы, а также с теоретическими спектрами, расчётными для различных электронных температур в корональном приближении. Электронная температура определялась по положению максимума спектрального распределения, состоящего из множества наложенных друг на друга линий. Если в экспериментальном спектре предполагается наличие каких-то хорошо заметных линий, то желательно задать их и на модельной кривой, хотя бы в виде δ -функций. Это значительно упростит интерпретацию спектров при обработке большого числа экспериментальных данных. На рис. 2 представлены планковские распределения: *a* — для $T_e = 125$ эВ в приближении абсолютно чёрного тела; *б* — для $T_e = 300$ эВ по методу [1] с двумя реперными линиями, соответствующими переходам в ионе FeXVI. Оба распределения нормированы на интегральный выход ВУФ-излучения 40 кДж, который является характерным для экспериментов на установке «Ангара-5-1».

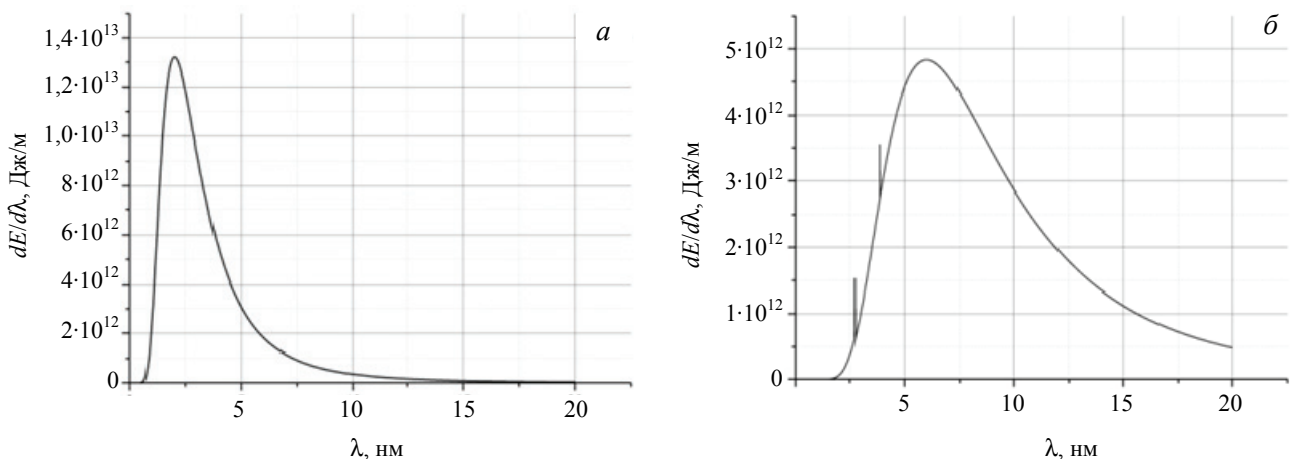


Рис. 2. Модельные спектры

На втором этапе (см. рис. 1) необходимо задать аппаратную функцию спектрографа. На установке «Ангара-5-1» для регистрации ВУФ-спектров используется спектрограф GIS-1 с дифракционной решёткой скользящего падения (радиус $R = 1$ м, угол скольжения 4° , 600 штр./мм, покрытие W/Re). На длинах волн 4—15 нм коэффициент отражения для такой решётки можно считать достаточно равномерным — $\sim 0,3$ в первом порядке и $\sim 0,03$ в третьем. Однако при меньших длинах волн коэффициент отражения решётки достаточно резко падает, что может приводить к значительным искажениям спектров при исследовании высокотемпературной плазмы. В этом случае положение максимума может заметно смещаться (рис. 3), что, в свою очередь, будет приводить к возникновению серьёзных ошибок при определении «цветовой» температуры.

При бóльшей температуре искажение может быть ещё более значительным, так как при длине волны порядка 1 нм отражающая способность решётки падает практически до нуля. В связи с этим такой метод определения электронной температуры для приосевой плазмы вольфрамовых лайнеров является скорее оценкой снизу, а для точного измерения электронной температуры требуется применение рентгеновских методов.

На третьем этапе (см. рис. 1) необходимо учесть геометрическое расположение спектрографа относительно источника излучения. Для спектрографа GIS-1 было показано [5], что освещённость I в фокальной плоскости, т.е. на фотоплёнке, не зависит от размеров источника и определяется только полным числом фотонов, излучаемых в 4π стерадиан, и геометрией прибора. Приведём здесь лишь конечную формулу:

$$Id\lambda = k \frac{E}{4\pi} \frac{1}{Z^2} sD \left[\frac{\text{фотон}}{\text{см}^2} \right],$$

где Z — расстояние источник—входная щель; E — количество излучаемых источником фотонов; k — коэффициент отражения решётки (в нашем случае коэффициент учитывался отдельным действием); s — ширина щели; D — дисперсия решётки.

Расположение спектрографа на установке «Ангара-5-1» показано на рис. 4 [2, 4]. В нашем случае также необходимо учитывать дополнительно установленную пространственную щель. В «геометрическом» коэффициенте также необходимо учитывать устанавливаемые на пути излучения фильтры. Кроме того, в этот коэффициент желательно включить подгонку по абсолютному значению выхода ВУФ-излучения. Это связано с тем, что нормировка спектра по экспериментальным значениям полной энергии не всегда оказывается достаточно корректной, а в ряде случаев просто невозможна. В нашем случае подгонка была необходима, так как для расчётных спектров использовалось среднее значение интегрального выхода ВУФ-излучения, взятое из работы [3].



Рис. 4. Схема расположения спектрографа. Расстояние от решётки до плёнки 101 мм, от спектральной щели до решётки 70 мм, от оси до спектральной щели 1391 мм, от оси пинча до пространственной щели 1118 мм, от пространственной до спектральной щели 273 мм, размер решётки 20×30 мм

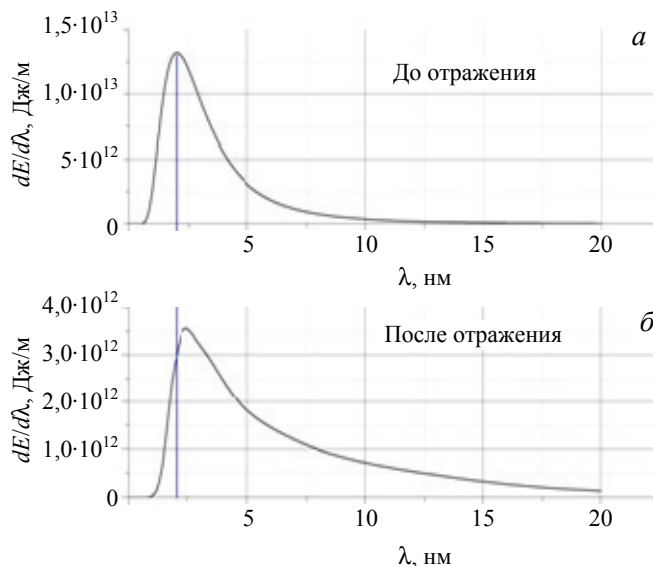


Рис. 3. Искажение спектра при отражении от решётки: а — планковское распределение, соответствующее рис. 2, а; б — результирующий спектр после отражения излучения от дифракционной решётки

На следующем, четвёртом этапе (см. рис. 1) необходимо учитывать чувствительность регистратора. В некоторых случаях в качестве регистратора может применяться ПЗС-линейка либо ПЗС-матрица с люминофором [6], однако на мощных генераторах тока использование электронных регистраторов сильно затруднено [7]. В связи с этим в наших экспериментах использовалась плёнка УФ-4. Калибровка этой плёнки для

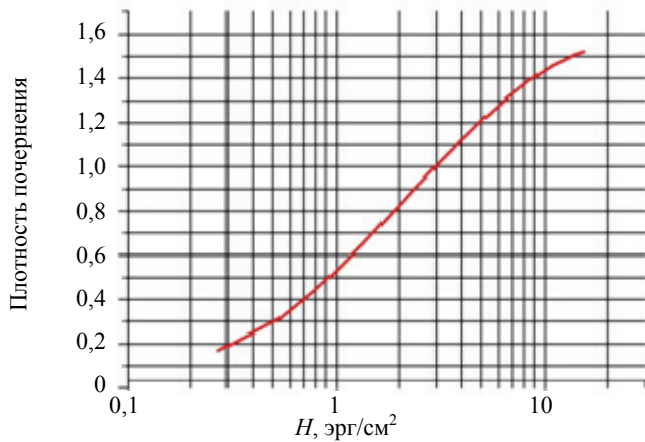


Рис. 5. Характеристическая кривая фотоплёнки УФ-4 для $\lambda = 97,5 \text{ \AA}$

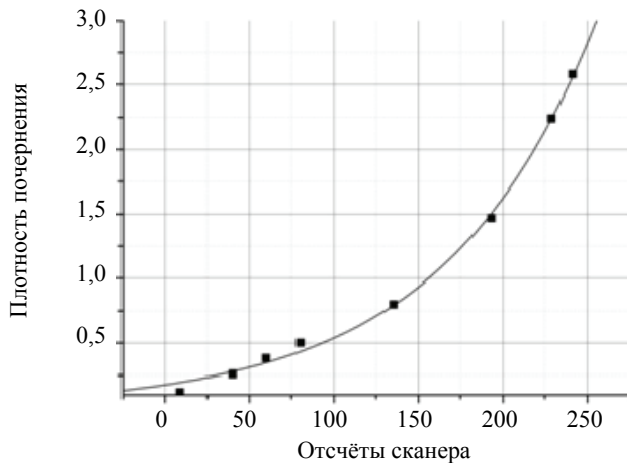


Рис. 6. Характеристическая кривая сканера

Далее, сравнивая расчётные спектры с экспериментальными спектрами и варьируя параметры расчёта, можно получить наилучшее соответствие в плотностях почернения фотоплёнки (рис. 7).

На рис. 7, а наблюдается хорошее совпадение переднего фронта, максимума и реперных линий. Раз-

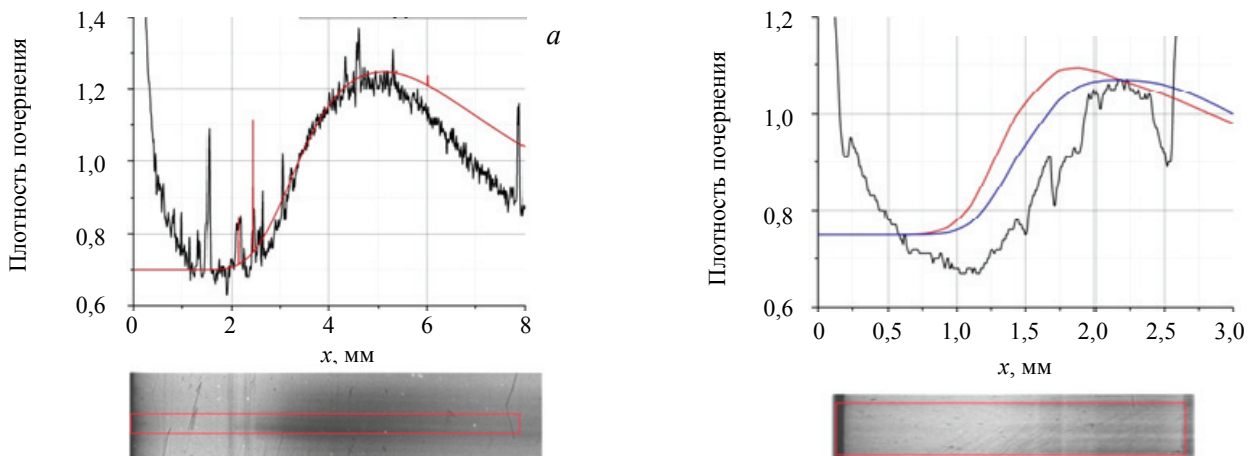


Рис. 7. Сравнение расчётных кривых с экспериментальными спектрами: а — спектр железа в периферийной плазме дейтерированного Z-пинча (— — экспериментальный спектр Fe; — — 300 эВ [1]); б — спектр вольфрама в экспериментах с многопроволочными сборками (— — экспериментальный спектр W; — — 125 эВ (АЧЧ); — — 100 эВ (АЧЧ)). Также представлены изображения соответствующих спектров на фотоплёнке [1, 3]. Красной рамкой помечена область фотометрирования. Средняя дисперсия на представленных спектрах составляла $\Delta x/\Delta \lambda \approx 0,8 \text{ мм/нм}$

личие кривых в длинноволновой области связано в первую очередь с тем, что экспериментальный спектр не является планковским и, как показали теоретические расчёты в [1], обычно имеет достаточно резкую длинноволновую границу. Не слишком хорошее соответствие расчётных кривых экспериментальным спектрам на рис. 7, б может быть обусловлено целым рядом причин. Во-первых, как было показано, спектр в коротковолновой области может достаточно сильно искажаться за счёт аппаратной функции решётки. К тому же, имея дело с интегральной по времени регистрацией спектра, мы наблюдаем одновременно различные стадии сжатия, а следовательно заметно различные температуры, что в случае вольфрама может сильно влиять на искажение длинноволнового спектра. Это подтверждает необходимость расширения спектральных диагностик в рентгеновский диапазон как для лайнерных экспериментов, так и для исследования горячих точек в экспериментах с дейтерированными нагрузками. Стоит отметить, что предложенный метод обработки ВУФ-спектров значительно упростил анализ и интерпретацию экспериментальных результатов, получаемых с помощью ВУФ-диагностик на установке «Ангара-5-1».

Авторы выражают благодарность Е.В. Грабовскому за помощь в постановке задачи и рекомендации по реализации предложенного метода.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 12-02-00522-а и 12-02-00369-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шевелько А.П., Блисс Д.Е., Казаков Е.Д. и др. — Физика плазмы, 2008, т. 34, № 11, с. 1021—1032.
2. Шевелько А.П. — Квантовая электроника, 2011, т. 41, № 8, с. 726—728.
3. Митрофанов К.Н., Грабовский Е.В., Грицук А.Н. и др. — Физика плазмы, 2013, т. 39, № 1, с. 71—96.
4. Александров В.В., Грабовский Е.В., Грицук А.Н. и др. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2013, т. 36, вып. 4, с. 68—73.
5. Лопатин А.Я., Лучин В.И., Салащенко Н.Н. и др. — Журнал технической физики, 2010, т. 80, № 7, с. 105—110.
6. Бороздин Ю.Э., Казаков Е.Д., Лучин В.И. и др. — Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики, 2008, т. 87, № 1, с. 33—35.
7. Ананьев С.С. Регистрация полутонных изображений на импульсных сильноточных установках в условиях сильных электромагнитных полей: Препринт ИАЭ-6440/7. М., 2006. 15 с.
8. Собельман И.И., Шевелько А.П., Якушев О.Ф. и др. — Квантовая электроника, 2003, вып. 33 (1), с. 3—6.



Евгений Давидович Казаков, начальник лаборатории, к.ф.-м.н.; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
kazakoved82@gmail.com



Александр Петрович Шевелько, ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н.; Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991 Москва, Ленинский проспект 53, Россия
apshev51@gmail.com

Статья поступила в редакцию 30 сентября 2014 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2014, т. 37, вып. 4, с. 71—75.