

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 533.9.082

МЕТОДИКА КАЛИБРОВКИ МНОГОКАНАЛЬНОГО СПЕКТРОМЕТРА-ПОЛИХРОМАТОРА ПО ДЛИНАМ ВОЛН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭТАЛОНА ФАБРИ–ПЕРО

© 2019 г. А. Ю. Шабашов^{a,*}, С. В. Серов^a, С. Н. Тугаринов^a, В. П. Ярцев^a

^a ГНЦ РФ “Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований”
Россия, 108840, Москва, Троицк, ул. Пушкиных, влад. 12

*e-mail: shabashov@phystech.edu

Поступила в редакцию 12.12.2018 г.

После доработки 12.12.2018 г.

Принята к публикации 02.02.2019 г.

Описаны диагностика плазмы “Активная спектроскопия” (CXRS — Charge eXchange Recombination Spectroscopy) и планы по ее использованию на токамаке ИТЭР. Представлена методика калибровки многоканального спектрометра-полихроматора по длинам волн с использованием эталона Фабри–Перо. Такой вариант калибровки спектрометра по длинам волн был ранее использован для диагностики CXRS на токамаке JET. Используя эту методику, была проведена калибровка трехдиапазонного спектрометра-полихроматора высокого разрешения, который был создан для диагностики “Активная спектроскопия” на установке ИТЭР. Данный спектрометр-полихроматор позволяет проводить измерения одновременно в трех спектральных диапазонах: 469–477, 529–538 и 650–661 нм. Была проведена оценка полученной погрешности калибровки по длинам волн, которая в среднем составила 0.003 нм. Полученная точность калибровки по длинам волн с запасом удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диагностике CXRS на токамаке ИТЭР.

DOI: 10.1134/S003281621904027X

ВВЕДЕНИЕ

Важной частью любого токамака является набор средств диагностики термоядерной плазмы. Диагностика “Активная спектроскопия” или CXRS (Charge eXchange Recombination Spectroscopy) позволяет измерять такие параметры плазмы, как профиль ионной температуры, профили концентрации легких примесей и профили скоростей вращения плазмы. Впервые предложение использовать метод активной корпускулярно-спектроскопической диагностики было сделано в конце 1970-х годов [1], первые эксперименты по измерению параметров плазмы токамаков с использованием активной спектроскопии были проведены в начале 1980-х годов [2–5]. С тех пор эта диагностика активно развивается и в настоящее время используется на большинстве крупнейших токамаков. В работах [6, 7] было показано, что активную спектроскопию можно будет использовать и на строящемся токамаке ИТЭР (ITER — International Thermonuclear Experimental Reactor).

Специально для диагностики “Активная спектроскопия” на ИТЭР был разработан трехдиапазонный спектрометр-полихроматор высокого разрешения [8]. Одновременно с высоким спек-

тральным разрешением спектрометр-полихроматор обладает высокой светосилой и имеет три выходных канала. Это позволяет проводить регистрацию линий излучения из плазмы, находящихся в трех спектральных диапазонах. Их центры лежат в районе следующих длин волн: 470, 530 и 656 нм.

CXRS-диагностика позволяет измерять скорость вращения плазмы по доплеровскому сдвигу спектральной линии, возникающей за счет перезарядки атомов диагностического пучка на ионах плазмы. Согласно требованиям ИТЭР [9] эта скорость должна определяться с точностью 5 км/с. А это значит, что спектрометр необходимо прокалибровать по длинам волн с точностью 0.01 нм.

К сожалению, такой точности не удастся достичь во всем рабочем спектральном диапазоне при использовании газоразрядных ламп (например, неоновой или дейтериевой), которые обычно применяются для калибровки по длинам волн. Это связано с тем, что в исследуемом диапазоне длин волн спектр лампы содержит недостаточное количество линий и они расположены слишком редко и неравномерно.

В данной статье описана методика калибровки по длинам волн, позволяющая решить такую за-

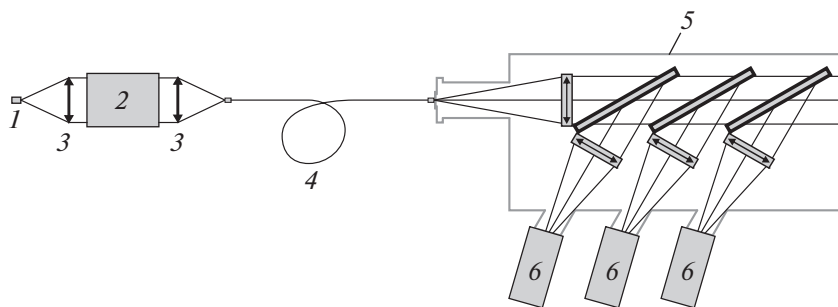


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 — светодиод; 2 — эталон Фабри–Перо; 3 — линзы; 4 — световод; 5 — спектрометр-полихроматор; 6 — п.з.с.-камеры.

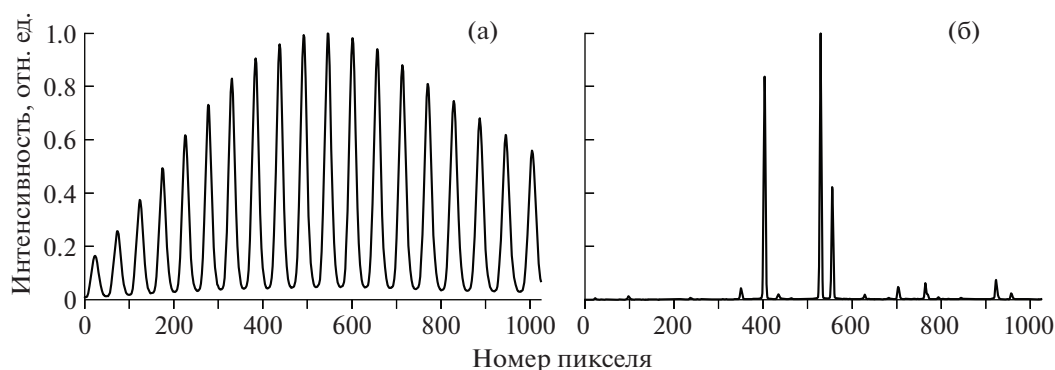


Рис. 2. Спектральные профили интерференционной картины, созданной эталоном Фабри–Перо (а), и газоразрядной неоновой лампы (б).

дачу. Для этого в дополнение к спектру газоразрядной лампы используется интерференционная картина, сформированная эталоном Фабри–Перо. При правильном выборе источника света, которым освещается эталон, пики спектра интерференционной картины, созданной эталоном, будут равномерно заполнять необходимый диапазон длин волн.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схема экспериментальной установки, собранной для отработки методики калибровки, представлена на рис. 1. В качестве источника света использован светодиод с непрерывным спектром излучения и обладающий достаточной яркостью в исследуемом диапазоне. После прохождения света через эталон Фабри–Перо в фокальной плоскости второй линзы образуется интерференционная картина от источника света с непрерывным спектром излучения.

С помощью оптического световода с малым диаметром (в данном случае 1 мм) из этой интерференционной картины выделяется небольшой участок. Второй конец световода совмещен с входной щелью спектрометра.

На рис. 2а показан спектральный профиль интерференционной картины, созданной эталоном Фабри–Перо во втором, “зеленом”, канале спектрометра-полихроматора, и зарегистрированный с помощью п.з.с.-камеры (п.з.с. — приборы с зарядовой связью).

Максимумы интерференции для двух близких длин волн окажутся в одной точке, если эти длины отличаются на величину [10]

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2tn \cos \varphi}, \quad (1)$$

где λ — меньшая из длин волн, t — расстояние между зеркалами интерферометра (в нашем случае $t = 300$ мкм), n — коэффициент преломления среды между зеркалами (в нашем случае — воздух), φ — угол между оптической осью и направлением на точку установки волновода ($\cos \varphi \approx 1$). Подобранные таким образом параметры эталона Фабри–Перо обеспечивают расстояние между пиками в интерференционной картине примерно 0.5 нм. На рис. 2б показан спектральный профиль неоновой лампы во втором, “зеленом”, канале спектрометра-полихроматора в районе длины волны 530 нм.

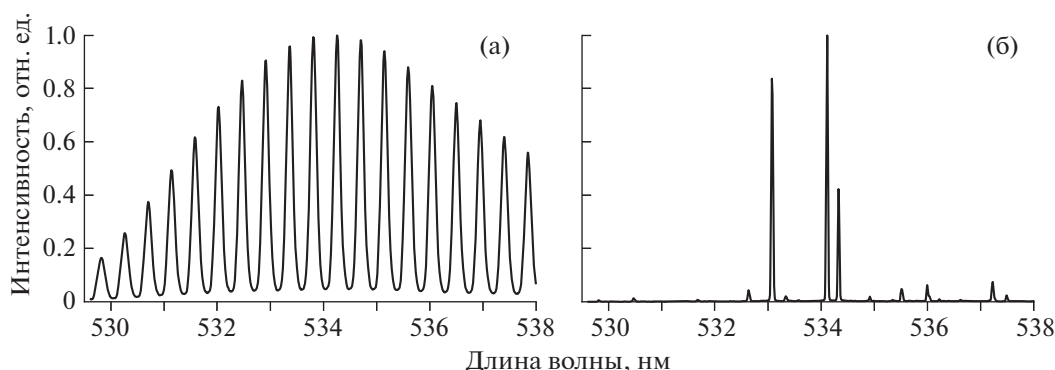


Рис. 3. Спектральные профили интерференционной картины, созданной эталоном Фабри–Перо (а), и газоразрядной неоновой лампы (б), полученные после калибровки по длинам волн.

МЕТОДИКА КАЛИБРОВКИ

Методика использования эталона Фабри–Перо для калибровки спектрометров по длинам волн была предложена в статье [11]. Она была адаптирована для использования в диагностической системе “Активная спектроскопия” ИТЭР и испытана на вышеописанном трехканальном спектрометре-полихроматоре высокого разрешения, созданном специально для этой диагностики. Для проведения калибровки одновременно используются спектры двух источников излучения: первый — газоразрядная лампа (в данном случае неоновая), в качестве второго используется элемент интерференционной картины, сформированной эталоном Фабри–Перо. Пики излучения этого элемента располагаются во всем исследуемом спектральном диапазоне и заполняют его практически равномерно (см. рис. 2), но в то же время их точное положение на шкале длин волн неизвестно. Методика калибровки предполагает получение этой информации, анализируя спектр газоразрядной неоновой лампы.

Предполагаем, что зависимость длины волны от номера пикселя п.з.с.-камеры задается многочленом. Дальнейший анализ показал, что многочлена третьей степени достаточно:

$$\lambda = ax^3 + bx^2 + cx = d. \quad (2)$$

Тогда задача калибровки сводится к определению 4 коэффициентов: a, b, c, d . Алгоритм калибровки следующий:

1. Каждый пик в спектре излучения элемента интерференционной картины эталона Фабри–Перо аппроксимируется гауссовой кривой, и находятся точные положения центров пиков x_i в дифракционной картине. Обозначим длину волны i -го пика интерференционной картины Фабри–Перо через λ_i , а расстояние между i - и $(i + 1)$ -пиком через $\Delta\lambda_i$. Как видно из соотношения (1), расстояние между двумя соседними пиками $\Delta\lambda$ про-

порционально λ^2 . Значит $\Delta\lambda_i$ можно выразить как $\Delta\lambda_i = \Delta\lambda_1(\lambda_i^2/\lambda_1^2)$. Это позволяет параметризовать длины волн для всех n пиков, используя два неизвестных: λ_1 — положение первого пика и $\Delta\lambda_1$ — расстояние между первым и вторым пиком:

$$\lambda_i = \lambda_1 + \Delta\lambda_1 C_i, \quad C_i = \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\lambda_j^2}{\lambda_1^2} \approx \sum_{j=1}^{i-1} \frac{(\lambda_{\text{нач}})_j^2}{(\lambda_{\text{нач}})_0^2}, \quad C_1 = 0. \quad (3)$$

Для вычисления значения коэффициентов C_i в первой итерации используются начальные значения $\lambda_{\text{нач}}$, полученные с помощью грубой калибровки, проведенной с использованием неоновой лампы в предположении постоянства дисперсии в зависимости от длины волны.

Для каждого пика интерференционной картины подставляем выражение (3) в (2), таким образом получая систему из $n > 4$ уравнений и четырех неизвестных a', b', c', d' :

$$d'x_i^3 + b'x_i^2 + c'x_i + d' = C_i, \quad (4)$$

где

$$a' = \frac{a}{\Delta\lambda_1}, \quad b' = \frac{b}{\Delta\lambda_1}, \quad c' = \frac{c}{\Delta\lambda_1}, \quad d' = \frac{d - \lambda_1}{\Delta\lambda_1}. \quad (5)$$

Далее используется метод наименьших квадратов, чтобы определить значения неизвестных коэффициентов a', b', c', d' . Теперь для определения искомых коэффициентов a, b, c, d осталось найти неизвестные λ_1 и $\Delta\lambda_1$.

2. Для вычисления значений λ_1 и $\Delta\lambda_1$ используется записанный ранее спектр газоразрядной лампы. Для каждой из N линий лампы находится соответствующая ей длина волны Λ_i (из справочника) и положение в пикселях (X_i). Подставляем значения коэффициентов a', b', c', d' из (5) в (2):

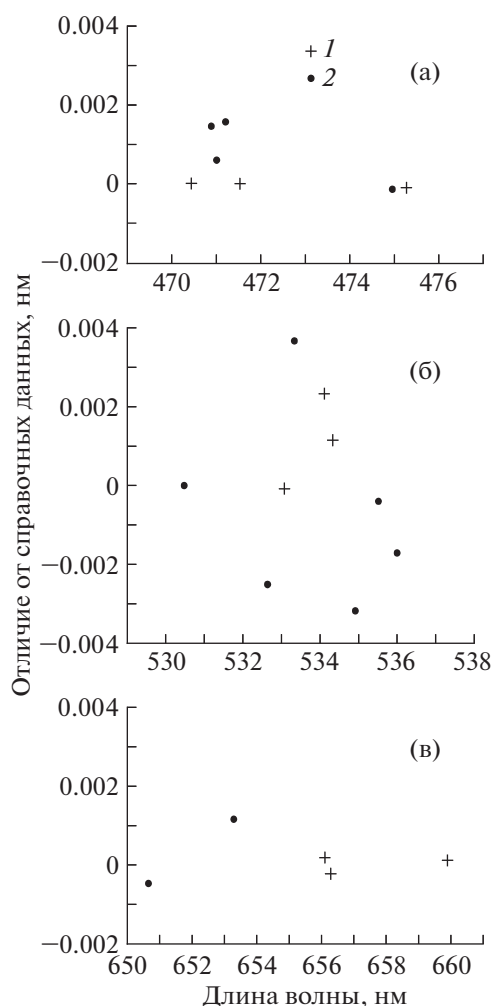


Рис. 4. Оценка точности калибровки. Показано отличие найденных после калибровки длин волн линий излучения неоновой лампы от соответствующих значений, приведенных в справочнике [12] для “синего” (а), “зеленого” (б) и “красного” (в) каналов спектрометра. 1 – линии, использованные для калибровки, 2 – остальные наблюдаемые линии.

$$a'\Delta\lambda_1 x^3 + b'\Delta\lambda_1 x^2 + c'\Delta\lambda_1 x + d'\Delta\lambda_1 + \lambda_1 = \lambda. \quad (6)$$

Для каждой линии лампы, подставляя в (6) длину волны λ_i и положение в пикселях X_i , получаем систему из N уравнений и 2 неизвестных:

$$a'\Delta\lambda_1 X_i^3 + b'\Delta\lambda_1 X_i^2 + c'\Delta\lambda_1 X_i + d'\Delta\lambda_1 + \lambda_1 = \lambda_i, \\ i = 1, 2, \dots, N.$$

Аналогично предыдущему пункту решаем ее относительно λ_1 и $\Delta\lambda_1$, что дает нам искомые коэффициенты a, b, c, d , а значит, и искомую калибровку (2).

3. Далее повторяем всю процедуру, используя для определения C_i значения $\lambda_{\text{нач}}$, посчитанные из полученной калибровки, и повторяем до тех пор,

пока $\lambda_{\text{нач}}$ и λ_i не перестанут отличаться более чем на 0.001 нм. Обычно для этого хватает 2–3 итераций.

РЕЗУЛЬТАТЫ КАЛИБРОВКИ

Калибровка проводилась для всех трех каналов спектрометра. Для каждого диапазона были подобраны светодиоды с длинами волн, примерно соответствующими серединам диапазонов: 470, 520 и 650 нм. В результате калибровки получены зависимости длины волны от номера пикселя в виде многочлена третьей степени (2): например, для “зеленого” канала $\lambda = 1.7 \cdot 10^{-6}x^3 - 0.00111x^2 + 0.3547x + 529.6173$. Распределения, полученные для “зеленого” канала спектрометра, представлены на рис. 3.

Была проведена оценка точности проделанной калибровки. Для этого сравнивались длины волн спектральных линий, полученные с помощью калибровки, с длинами волн этих же линий, приведенных в справочнике [12]. Результат такого сравнения для всех трех каналов спектрометра показан на рис. 4. В “синем” канале спектрометра максимальное отклонение составило 0.002 нм, в “зеленом” – 0.004 нм, в “красном” – 0.002 нм. Такая неопределенность приводит к ошибке в определении скорости движения плазмы не более 2 км/с, что с запасом удовлетворяет требованиям ИТЭР. Несмотря на это, в будущем будут предприняты попытки повысить точность калибровки по длинам волн, варьируя параметры установки и обработки данных.

ВЫВОДЫ

В статье рассмотрена диагностика “Активная спектроскопия” на установке ИТЭР. Для эффективного использования этой диагностики необходимо располагать точной калибровкой спектрометра по длинам волн. Описана методика калибровки с использованием эталона Фабри–Перо, впервые использованная для диагностики CXRS на токамаке JET. Она была отработана на трехдиапазонном спектрометре-полихроматоре высокого разрешения, созданном специально для диагностики “Активная спектроскопия” ИТЭР. Калибровка проведена во всех трех каналах спектрометра. Также была проведена оценка точности калибровки. В результате проведенной работы можно сделать вывод, что описанная методика позволит проводить калибровку спектрометров по длинам волн с точностью на уровне 0.003 нм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афросимов В.В., Гордеев Ю.С., Зиновьев А.Н. // Письма в ЖТФ. 1977. Т. 3. С. 97.

2. Зиновьев А.Н., Коротков А.А., Кржижановский Е.Р., Афросимов В.В., Гордеев Ю.С. // Письма ЖЭТФ. 1980. Т. 32. Вып. 9. С. 557.
3. Березовский Е.Л., Березовская М.М., Извозищikov А.Б., Крупин В.А. // Письма в ЖТФ. 1982. Т. 8. С. 1382.
4. Fonck R.J., Darrow D.S., Jaehnig K.P. // Phys. Rev. A. 1984. V. 29. P. 6. doi 10.1103/PhysRevA.29.3288
5. Isler R.C. // Plasma Phys. Control. Fusion. 1994. V. 36. P. 171. doi 10.1088/0741-3335/36/2/001
6. Тугаринов С.Н., Бейгман И.Л., Вайнштейн Л.А., Докука В.Н., Красильников А.В., Наumenко Н.Н., Толстихина И.Ю., Хайрутдинов Р.Р. // Физика плазмы. 2004. Т. 30. № 2. С. 147.
7. Серов С.В., Тугаринов С.Н., Von Hellermann M. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2018. Т. 41. Вып. 2. С. 89. doi 10.21517/0202-3822-2018-41-2-89-94
8. Тугаринов С.Н., Белокопытов А.А., Кулаков Д.М., Лукин А.В., Наumenко Н.Н., Саттаров Ф.А., Серов В.В., Усольцева М.А., Хабанов Ф.О., Шигапова Н.М., Ярцев В.П. // ПТЭ. 2016. № 1. С. 102. doi 10.7868/S0032816216010158
9. Donné A.J.H., Costley A.E., Barnsley R., Bindslev H., Boivin R., Conway G., Fisher R., Giannella R., Hartfuss H., Von Hellermann M.G., Hodgson E., Ingesson L.C., Itami K., Johnson D., Kawano Y. et al. // Nucl. Fusion. 2007. V. 47. P. S343. doi 10.1088/0029-5515/47/6/S07
10. Зайдель А.Н., Островская Г.В., Островский Ю.И. Техника и практика спектроскопии. М.: Физматлит, 1972. С. 163–164.
11. Delabie E., Hawkes N., Biewer T.M., O'Mullane M.G., and JET Contributors // Rev. Scient. Instrum. 2016. V. 87. P. 11E525. doi 10.1063/1.4960306
12. Стриганов А.Р., Одинцова Г.А. Таблицы спектральных линий атомов и ионов: Справочник. М.: Энергоиздат, 1982.