

**Радиальное распределение и динамика накопления ионов примесей
в плазме стелларатора Л-2М**

А. И. Мещеряков, И. Ю. Вафин

В работе представлены результаты наблюдения за динамикой накопления ионов примесей по радиусу в поперечном сечении плазмы стелларатора Л-2М. Наблюдения проводились по четырём хордам путем измерения интенсивности мягкого рентгеновского излучения плазмы. Затем вычислялся фактор превышения рентгеновского излучения экспериментальной плазмы над тормозным излучением чистой водородной плазмы. Вычисления были произведены для двух моментов времени, а именно, в начале и в конце квазистационарной стадии импульса СВЧ-нагрева плазмы. Был сделан вывод о динамике накопления ионов примесей по радиусу поперечного сечения плазмы стелларатора.

Ключевые слова: физика плазмы, высокотемпературная плазма, стелларатор, боронизация, плазменные примеси, компьютерное моделирование, спектроскопия SXR.

Ссылка: Мещеряков А. И., Вафин И. Ю. // Прикладная физика. 2018. № 5. С. 42.

Reference: A. I. Meshcheryakov and I. Yu. Vafin, Prikl. Fiz., No. 5, 42 (2018).

Введение

Для решения проблемы управляемого термоядерного синтеза представляет интерес исследование пространственного распределения ионов примесей, а также динамики их накопления. Работы в этом направлении велись уже на самых первых тороидальных магнитных системах. Так, на токамаке ТМ-3 была обнаружена диффузия ионов углерода, причем удалось оценить скорости потоков ионов [1]; на стеллараторе Р-0 было обнаружено, что, возбуждая в плазме альфвеновскую волну, можно эффективно воздействовать на радиальный перенос примесей [2] и, таким образом, уменьшать их концентрацию. На установках следующих поколений исследования были продолжены. Исследования пространственного распределения ионов примесей и изменение его во времени были проведены на токамаке РВХ [3], где был обнаружен пикированный в центре профиль эффективного заряда плазмы. Динамика накопления ионов железа спектроскопическими методами наблюдалась на токамаке JPP T-II-U [4]. Метода-

ми численного моделирования, аналитическими расчетами было показано, что в формировании радиального профиля концентрации примеси для токамака ASDEX UPGRADE значительную роль играет аномальный диффузионный поток, а в случае его подавления, преобладает неоклассический радиальный поток [5].

Особенно остро задача минимизации примесей в плазме стоит для тороидальных ловушек стеллараторного типа, которые конструировались для работы в непрерывном режиме, что, кстати, является основным и бесспорным преимуществом этих установок. Исследования в этом направлении проводились на стеллараторах LHD и W7-AS в режимах с улучшенным удержанием, когда были найдены способы стабилизации накопления ионов примесей в плазме [6].

Поведение примесей неоднократно исследовалось и на стеллараторе Л-2М в Институте общей физики им. А. М. Прохорова РАН. При нагреве плазмы индукционным током исследование поведения ионов примесей в стеллараторе Л-2 (прежнее название стелларатора до его модернизации) велось посредством спектральных измерений в видимой области спектра и кварцевой ультрафиолетовой области в диапазоне от 200 нм до 350 нм. В ходе экспериментов наблюдались линии ионов железа (Fe^{+13} , Fe^{+15}), кислорода (O^{+3} , O^{+5}), углерода (C^{+2} , C^{+4}) [7].

С внедрением режима электронного циклотронного резонансного (ЭЦР) СВЧ-нагрева плаз-

Мещеряков Алексей Иванович, зав. лаб., к.ф.-м.н.

Вафин Ильядар Юсуфович, с.н.с., к.ф.-м.н.

Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН.

Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38.

Тел. 8(499)135-80-19.

E-mail: meshch@fpl.gpi.ru, ildar@fpl.gpi.ru

Статья поступила в редакцию 16 августа 2018 г.

мы, который был осуществлен с помощью необыкновенной волны на второй гармонике электронной циклотронной частоты [8], вновь встала необходимость в исследовании поведения ионов примесей, но уже в новых условиях. Измерения были проведены с использованием двух монохроматоров в диапазоне вакуумного ультрафиолетового излучения (от 15 нм до 160 нм) и кварцевого ультрафиолета (от 200 нм до 350 нм). В ходе экспериментов исследовалось распределение интенсивностей излучения линий кислорода O^{+3} , O^{+4} , O^{+5} , углерода C^{+3} , C^{+4} , железа Fe^{+15} . Было установлено, что в режиме ЭЦР-нагрева потоки примесей в установку количественно примерно такие же, что и при режиме нагрева индукционным током, но с единственным отличием: перенос ионов примесей может быть описан полностью в пределах неоклассической теории, без учета аномальных потоков [9].

С освоением процедуры боронизации внутренних стенок вакуумной камеры стелларатора Л-2М изменился состав плазмы. В результате анализа спектральных измерений в видимом и ультрафиолетовом диапазонах было обнаружено, что вклад в излучение ионов тяжелых примесей – железа, никеля и хрома – стал незначителен, а относительная концентрация примесей углерода и кислорода уменьшилась в 3–5 раз по сравнению с режимами без боронизации вакуумной камеры, при этом преобладающей примесью стал бор [10].

Целью данной работы являлась разработка и реализация нового диагностического метода, который позволял бы измерять эволюцию пространственного распределения фактора превышения рентгеновского излучения экспериментальной плазмы над тормозным излучением чистой водородной плазмы и, таким образом, количественно оценивать возможное временное и пространственное накопление примесей в плазме в течение одного импульса. Для измерений в представленной работе использовался сплошной спектр мягкого рентгеновского излучения (МРИ). Рабочий диапазон спектра начинался с энергии квантов 1 кэВ.

Условия проведения эксперимента

Эксперименты проводились в стеллараторе Л-2М [11] в режиме ЭЦР-нагрева плазмы, длительность импульса СВЧ-нагрева составляла 12 мс, а мощность нагрева 300 кВт. Детектирование интенсивности МРИ плазмы осуществлялось диагностическим комплексом «Диарен» по четырем хордам в поперечном сечении тороидальной камеры стелларатора.

В приборе «Диарен» применяются кремниевые поверхностно-барьерные диоды типа ORTEC.

В состав диагностики входит линейка детекторов, усилители и аналого-цифровой преобразователь. Детекторы и усилители размещены в едином корпусе и изолированы от вакуумной части стелларатора бериллиевой фольгой толщиной в 50 мкм. Прибор предназначен для измерения распределения по радиусу температуры электронов и интенсивности МРИ в поперечном сечении плазмы непрерывно в течение импульса. В данной работе прибор «Диарен» впервые использовался для наблюдения за временным ходом накопления ионов примесей по радиусу плазмы в стеллараторе Л-2М.

Наблюдение эволюции накопления ионов примесей по радиусу в плазме стелларатора Л-2М

Измерения и расчеты проводились по четырем хордам в поперечном сечении камеры стелларатора в начале и в конце квазистационарной стадии разряда: на 56 мс и на 60 мс соответственно. Использованные параметры плазмы были получены осреднением по 12-ти импульсам стелларатора, произведенным в одинаковых условиях. Наблюдения велись путем сравнения интенсивности МРИ плазмы, полученной в эксперименте, с расчетной интенсивностью МРИ водородной плазмы, не имеющей примесей. Значение интенсивности МРИ водородной плазмы без примесей вычислялось методом компьютерного моделирования. Из сравнения двух величин была вычислена величина фактора превышения ζ [12]:

$$\zeta = (I_{bp} + I_{rp}) / I_{bH}, \quad (1)$$

здесь I_{rp} , I_{bp} – спектральные интенсивности рекомбинационного и тормозного излучений (их сумма измеряется в эксперименте), I_{bH} – спектральная интенсивность тормозного излучения водородной плазмы без примесей.

Превышение МРИ экспериментальной плазмы над МРИ чистой водородной плазмы обусловлено рекомбинационным и тормозным излучением ионов примесей в экспериментальной плазме. Величина ζ количественно характеризует это превышение. При моделировании МРИ чистой водородной плазмы использовался тот факт, что при поглощении детектором потока рентгеновских квантов во входной цепи усилителя прибора «Диарен» течет ток величиной

$$i = E_{hv}(t) e \eta \frac{S}{\varepsilon}, \quad (2)$$

где $E_{hv}(t)$ – плотность потока энергии рентгеновского излучения в килоэлектронвольтах в секунду,

приходящийся на квадратный сантиметр; e – заряд электрона в кулонах; η – эффективность поглощения квантов в чувствительной части детектора; S – площадь чувствительной области детектора в квадратных сантиметрах; ε – энергия, расходуемая в чувствительной области детектора на генерацию пары носителей заряда, в килоэлектронвольтах (для кремния $\varepsilon = 0,0036$ кэВ.). Величина $E_{hv}(t)$ вычислялась методом компьютерного моделирования, причём с учетом геометрии прибора. Затем по формуле (2) вычислялся ток и отвечающий этому току сигнал электрического напряжения U_H . Величина сигнала для чистой водородной плазмы u_H сравнивается с величиной, измеренного в эксперименте сигнала u_e , по формуле:

$$\zeta = \frac{U_e}{U_H}. \quad (3)$$

В расчете использовались измеренные в эксперименте для двух моментов времени пространственные распределения концентрации электронов в поперечном сечении камеры стелларатора, полученные с помощью субмиллиметрового интерферометра Майкельсона [13]. Пространственные распределения электронной температуры в поперечном сечении камеры стелларатора измерялись методом фольг с помощью диагностики «Диарен».

Пространственные распределения параметров плазмы (рассчитанные и измеренные в эксперименте) для 60-й мс представлены на рис. 1.

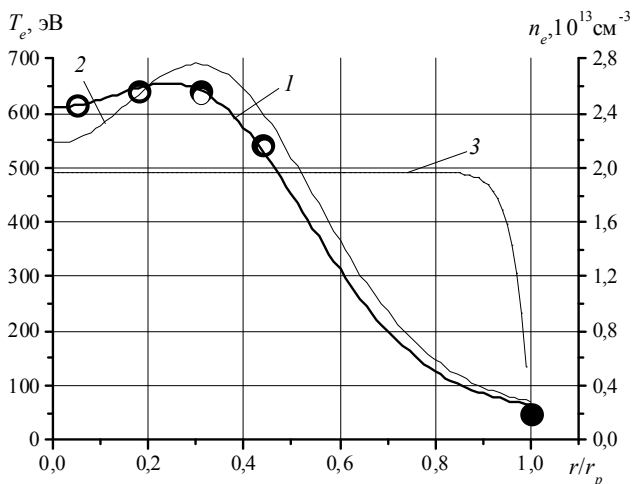


Рис. 1. Пространственное распределение измеренных в эксперименте и использованных в расчете параметров: закрашенные точки – измеренные в эксперименте значения электронной температуры, пустые точки – полученные из расчета значения электронной температуры для чистой водородной плазмы; 1 – аппроксимирующая экспериментальные точки кривая, 2 – использованное в расчете распределение электронной температуры, 3 – использованное в расчете распределение концентрации электронов.

В расчет закладывалось такое распределение электронной температуры (рис. 1, кривая 2), что при моделировании МРИ водородной плазмы рассчитанные значения электронной температуры по четырем хордам (рис. 1, пустые кружки) совпадали с измеренными в эксперименте (рис. 1, закрашенные кружки). На рис. 1 показаны также измеренные в эксперименте распределения электронной температуры (рис. 1, кривая 1) и концентрации электронов (рис. 1, кривая 3). Для 56-й мс значения температуры удерживаемой плазмы в стеллараторе и концентрации электронов отличаются, но характер кривой аналогичный. Более подробные сведения о методе расчета величины ζ представлены в [14]. Результаты измерений представлены на рис. 2.

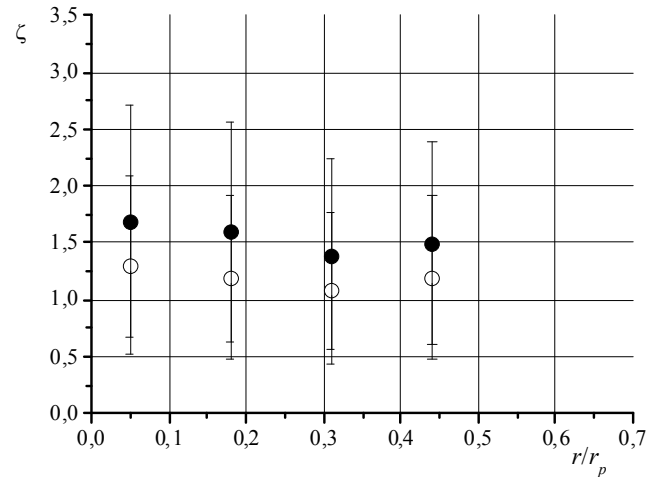


Рис. 2. Радиальное распределение фактора превышения: пустые точки – значения фактора превышения на 56-й мс, закрашенные точки – значения фактора превышения на 60-й мс.

Относительная погрешность измерений составляет $\pm 60\%$. Относительная погрешность формируется из относительных погрешностей отдельных измерений, а именно: радиального распределения концентрации электронов – 20% (интенсивность рентгеновского излучения, по которой измеряется фактор превышения, пропорциональна квадрату концентрации электронов); распределения электронной температуры – 10% и измерений интенсивности мягкого рентгеновского излучения – 10%. Точность метода значительно улучшается при уменьшении относительной погрешности измерений концентрации электронов и их температуры.

Из рис. 2 видно, что с учетом погрешности измерений фактор превышения практически не меняется в течение квазистационарной стадии разряда.

Выводы

В работе на основе многохордовой диагностики мягкого рентгеновского излучения высокотемпературной плазмы в стеллараторе создан диагностический метод, который позволяет измерять эволюцию пространственного распределения фактора превышения рентгеновского излучения экспериментальной плазмы над тормозным излучением чистой водородной плазмы и, таким образом, количественно оценивать возможное накопление примесей в плазме. Проведенные измерения фактора превышения показали, что в режиме ЭЦР-нагрева плазмы значительного накопления ионов примесей в течение квазистационарной стадии разряда в стеллараторе L-2M не происходит как во времени, так и в пространстве.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гервидс В. И., Крупин В. А. // Письма в ЖЭТФ. 1973. Т. 18. Вып. 2. С. 106.
2. Демирханов Р. А., Киров А. Г., Ручко Л. Ф., Сукачев А. В. // Письма в ЖЭТФ. 1983. Т. 37. Вып. 8. С. 381.
3. Ida K., Fonck R. J., Sesnic S., Hulse R. A., LeBlanc B. // Physical Review Letters. 1987. Vol. 58. No. 2. P. 116.
4. Sato K., Toi K., Watari T., Ogawa I., Kawahata K., Ando R., Kawasumi Y., Noda N., Tanahashi S. // Physical Review A. V. 1986. Vol. 34. No. 2. P. 1328.
5. Кавеева Е. Г., Бекхейт А. Х., Воскобойников С. П., Рожанский В. А., Костер Д., Боннин К., Шнейдер Р. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. Вып. 5. С. 87.
6. Burhenn R., Feng Y., Ida K., Maassberg H., McCarthy K. J., Kalinina D., Kobayashi M., Morita S., Nakamura Y., Nozato H., Okamura S., Sudo S., Suzuki C., Tamura N., Weller A., Yoshinuma M., Zurro B. // Nucl. Fusion. 2009. Vol. 49. No. 6. P. 065005.

7. Блох М. А., Смирнова А. Д., Парамонов А. В., Ларионова Н. Ф., Колесников В. Н., Кладов С. В., Илюхин Б. И., Донская Н. П., Гиптус Е. Ф., Воронов Г. С., Штигель И. С. Препринт АН СССР. Физ. ин-т им. П. Н. Лебедева. Физика и химия плазмы. 1986. № 39.

8. Андрюхина Э. Д., Агапов Л. Н., Батанов Г. М., Бережецкий М. С., Блох М. А., Богданов С. Д., Воронов Т. С., Гиптус Е. Ф., Донская Н. П., Дябилин К. С., Ларионова Н. Ф., Литвак А. Г., Кладов С. В., Илюхин Б. И., Курбатов В. И., Коврижных Л. М., Колесников В. Н., Колик Л. В., Новикова А. В., Парамонов А. В., Попов С. Н., Сапожников А. В., Сарксян К. А., Сбитникова И. С., Смолякова О. Б., Смирнова А. Д., Суворов Е. В., Суходольский В. Н., Мецерыков А. Е., Петров А. Е., Федянин О. И., Фрайман А. А., Хольнов Ю. В., Штигель И. С. // Письма в ЖЭТФ. 1984. Т. 40. С. 377.

9. Блох М. А., Воронов Г. С., Гиптус Е. Ф., Донская Н. П., Илюхин Б. И., Кладов С. В., Колесников В. Н., Ларионова Н. Ф., Парамонов А. В., Смирнова А. Д., Штигель И. С. // Физика плазмы. 1988. Т. 14. Вып. 4. С. 421.

10. Мецерыков А. И., Акулина Д. К., Батанов Г. М., Бережецкий М. С., Воронов Г. С., Gladkov G. A., Гребенчиков С. Е., Гринчук В. А., Гришина И. А., Колин Л. В., Ларионова Н. Ф., Летунов А. А., Логвиненко В. П., Петров А. Е., Пшеничников А. А., Рябенко Г. А., Сарксян К. А., Скворцова Н. Н., Федянин О. И., Харчев Н. К., Хальнов Ю. В., Шаранов В. М. // Физика плазмы. 2005. Т. 31. № 6. С. 496.

11. Abrakov V. V., Akulina D. K., Andryukhina E. D., Batanov G. M., Berezhetskij M. S., Danilkin I. S., Donskaya N. P., Fedyanin O. I., Gladkov G. A., Grebenschikov S. E., Harris J. H., Kharchev N. K., Kholnov Yu. V., Kolik L. V., Kovrizhnykh L. M., Larionova N. F., Letunov A. A., Likin K. M., Lyon J. F., Meshcheryakov A. I., Nechaev Yu. I., Petrov A. E., Sarksyayn K. A., Sbitnikova I. S. // Nuclear Fusion. 1997. Vol. 37. P. 233.

12. von Goeler, Stodiek W., Eubank H., Fishman H., Grebenschikov S., Hinnov E. // Nuclear Fusion. 1975. Vol. 15. P. 301.

13. Князев А. В., Летунов А. А., Логвиненко В. П. // Приборы и техника эксперимента. 2004. № 2. С. 105.

14. Вафин И. Ю. Исследование параметров плазмы по излучению в мягкой рентгеновской области при мощном электронном циклотронном нагреве на стеллараторе L-2M. Диссертация канд. физ.-мат. наук. РАН ИОФ им. А. М. Прохорова, Москва, 2013.

PACS: 52.50.-b

Spatial distribution and dynamics of impurities accumulation in the L-2M stellarator plasma

A. I. Meshcheryakov and I. Yu. Vafin

Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences
38 Vavilov str., Moscow, 119991, Russia
E-mail: meshch@fpl.gpi.ru; meshch@fpl.gpi.ru

Received August 16, 2018

Consideration is given to results of monitoring spatial distribution and dynamics of impurity ions accumulation in the L-2M stellarator plasma. The observations were carried out on four chords by measuring the intensity of the soft x-ray radiation of the plasma and then calculating the enhancement factor of the X-ray radiation of the experimental plasma over the bremsstrahlung radiation of the pure hydrogen plasma. Calculations were made for two time moments: at the beginning and at the end of the

quasi-stationary phase of the microwave pulse of plasma heating. It was concluded that the dynamics of the accumulation of impurity ions along the cross-sectional radius of the stellarator plasma.

Keywords: plasma physics, high-temperature plasma, stellarator, boronization, plasma impurities, computer simulations, SXR spectrometry.

REFERENCES

1. V. I. Gervids and V. A. Krupin, JETP Letters (USSR) **18** (2), 106 (1973).
2. R. A. Demirhanov, A. G. Kirov, L. F. Ruchko, and A. V. Sukachev, JETP Letters (USSR) **37** (8), 381 (1983).
3. K. Ida, R. J. Fonck, S. Sesnic, R. A. Hulse, and B. LeBlanc, Physical Review Letters **58** (2), 116 (1987).
4. K. Sato, K. Toi, T. Watari, I. Ogawa, K. Kawahata, R. Ando, Y. Kawasumi, N. Noda, and S. Tanahashi, Physical Review A **34** (2), 1328 (1986).
5. Y. G. Kaveeva, A. H. Bekheit, S. P. Voskoboynikov, V. A. Rojanskiy, D. Koster, K. Bonnin, and R. Schneider, Tech. Phys. Letters **29** (5), 87 (2003).
6. R. Burhenn, Y. Feng, K. Ida, H. Maassberg, K. J. McCarthy, D. Kalinina, M. Kobayashi, S. Morita, Y. Nakamura, H. Nozato, S. Okamura, S. Sudo, C. Suzuki, N. Tamura, A. Weller, M. Yoshinuma, and B. Zurro, Nucl. Fusion **49** (6), 065005 (2009).
7. M. A. Bloch, A. D. Smirnova, A. V. Paramonov, N. F. Larionova, V. N. Kolesnikov, S. V. Kladov, B. I. Ilyukhin, N. P. Don, E. F. Gippius, G. S. Voronov, and I. S. Spiegel, Preprint on Physics and Chemistry of Plasma, No. 39 (Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, 1986).
8. D. E. Andruhina, L. N. Agapov, G. M. Batanov, M. S. Berezhetskij, M. A. Bloch, S. D. Bogdanov, G. S. Voronov, E. F. Gippius, N. P. Donskaya, K. S. Dyabilin, N. F. Larionova, A. G. Litvak, S. V. Kladov, B. I. Ilukhin, V. I. Kurbatov, L. M. Kovrizhnykh, V. N. Kolesnikov, L. V. Kolik, A. V. Novikov, A. V. Paramonov, S. N. Popov, A. V. Sapozhnikov, K. A. Sarksyian, I. S. Sitnikov, O. B. Smolyakova, A. D. Smirnov, E. V. Suvorov, V. N. Sukhodolsky, A. I. Meshcheryakov, A. Ye. Petrov, O. I. Fedyanin, A. A. Freimann, Yu. V. Holnow, and I. S. Shpigel, Letters to the JTF (USSR) **40**, 377 (1984).
9. M. A. Bloch, G. S. Voronov, E. F. Gippius, N. P. Donskaya, B. I. Ilukhin, S. V. Kladov, V. N. Kolesnikov, N. F. Larionova, A. V. Paramonov, A. D. Smirnova, and I. S. Spiegel, Plasma Physics Reports **14** (4), 421 (1988).
10. A. I. Meshcheryakov, D. K. Akulina, G. M. Batanov, M. S. Berezhetskij, G. S. Voronov, G. A. Gladkov, S. E. Grebenshchikov, V. A. Grinchuk, I. A. Grishina, L. V. Kolik, N. F. Larionova, A. A. Letunov, V. P. Logvinenko, A. E. Petrov, A. A. Pshenichnikov, G. A. Ryabenko, K. A. Sarksyian, N. N. Skvortsova, O. I. Fedyanin, N. K. Kharchev, Yu. V. Kholnov, and V. M. Sharapov, Plasma Physics Reports **31** (6), 452 (2005).
11. V. V. Abrakov, D. K. Akulina, E. D. Andryukhina, G. M. Batanov, M. S. Berezhetskij, I. S. Danilkin, N. P. Donskaya, O. I. Fedyanin, G. A. Gladkov, S. E. Grebenshchikov, J. H. Harris, N. K. Kharchev, Yu. V. Kholnov, L. V. Kolik, L. M. Kovrizhnykh, N. F. Larionova, A. A. Letunov, K. M. Likin, J. F. Lyon, A. I. Meshcheryakov, Yu. I. Nechaev, A. E. Petrov, K. A. Sarksyian, and I. S. Sbitnikova, Nuclear Fusion **37**, 233 (1997).
12. von Goeler, W. Stodiek, H. Eubank, H. Fishman, S. Grebenshchikov, and E. Hinnov, Nuclear Fusion **15**, 301 (1975).
13. A. V. Knyazev, A. A. Letunov, and V. P. Logvinenko, Instruments and Experimental Techniques **47** (2), 230 (2004).
14. I. Yu. Vafin, *Investigation of plasma parameters by radiation in the soft X-ray region at high-power electron cyclotron heating on the L-2M stellarator*. (PhD dissertation. Prokhorov General Physics Institute Russian Academy of Science. Moscow. 2013).