

УДК 533.9.08

Исследование высокоэнергетичных электронов плазмы СВЧ-разряда в конфигурации би-дипольной магнитной ловушки "Магнетор" по анализу рентгеновского излучения

Г. В. Крашевская, В. А. Курнаев, Г. Х. Салахутдинов, М. М. Цвентух

Представлены результаты исследований группы быстрых электронов плазмы СВЧ-разряда в магнитной ловушке "Магнетор". Информация о наличии и расположении данной группы электронов важна для определения полного давления плазмы с учетом проведенных ранее зондовых измерений. Установлено, что быстрые электроны локализованы внутри магнитной сепаратрисы в области удержания основной плазмы. Максимальная энергия быстрых электронов выше 25 кэВ.

PACS: 52.38.Ph

Ключевые слова: рентгеновское излучение, магнитная ловушка, плазма, термоядерный реактор, плазменное давление, электроны, детекторы.

Введение

Наиболее высокие параметры удержания горячей плазмы достигнуты в замкнутых токамаках и стеллараторных системах. Строящийся первый экспериментальный термоядерный реактор на D—T-топливе — ИТЭР является именно токамаком. Вместе с тем не решена проблема использования перспективных топливных циклов D-D и D—³He, для которых требуются более высокие параметры (в их числе значение плазменного бета $\beta \equiv 8\pi p/B^2$). При этом существенное повышение, например, величины бета, в токамаках почти невозможно. Однако есть класс магнитных ловушек с простой магнитной конфигурацией, в которых принципиально возможно достижение необходимых параметров. Удержание и МГД-устойчивость плазмы в таких магнитных конфигурациях базируются на относительно нетрадиционных для лабораторных систем принципах, опирающихся на стремление плазмы к самоорганизации, выражающейся в самосогласованном поддержании конвективно-устойчивого профиля давления. Выражение для критерия конвективно-устойчивого профиля давления плазмы было получено Б. Б. Кадомцевым [1].

Согласно этому выражению плазма устойчива даже в спадающем магнитном поле, если относительный градиент давления ∇P не выше значения, определяемого магнитной конфигурацией

$$\nabla P \nabla U < \gamma P (\nabla U)^2 / |U|,$$

где $U \equiv -\oint dl / B$ — интеграл вдоль силовой линии магнитного поля;

γ — показатель адиабаты.

Наиболее простая конфигурация магнитного поля, основанная на таком принципе, — это дипольное магнитное поле кольца с током, которое на большом расстоянии моделирует магнитосферу планет. Она легла в основу конфигурации первого дипольного реактора, предложенной Хасегавой [2, 3] на основании исследований удержания плазмы в магнитосфере планет. Главные недостатки дипольного реактора Хасегавы — значительный размер (~50 м) и необходимость магнитной левитации кольца.

Были предложены и другие проекты реакторов на основе дипольного кольца — MIRAGE [4] и реактор Теллера [5]. В них благодаря наложению внешнего поля формировалась сепаратриса, сокращающая минимальный размер реактора.

В настоящее время существует ряд зарубежных дипольных установок — СТХ [6, 7] и с левитирующим кольцом LDX [8] (США), и установки серии RT [9, 10] (Япония), программа исследований которых нацелена на изучение удержания плазмы с высоким β . В этих установках формируется плазма с высоким β за счет нагрева электронов СВЧ-полем в области электрон-циклотронного резонанса (ЭЦР), использующегося также для создания плазмы.

Крашевская Галина Витальевна, доцент.

Курнаев Валерий Александрович, заведующий кафедрой.

Салахутдинов Гаяр Харисович, доцент.

Московский инженерно-физический институт.

Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе, 31.

Тел. (495) 324-87-66. Факс (495) 324-87-66.

E-mail: galkrosh@rambler.ru

Цвентух Михаил Михайлович, мл. научный сотрудник.

Физический институт им. П. Н. Лебедева.

Россия, 119991, Москва, Ленинский проспект, 53.

Тел. (499) 135-42-64. Факс (499) 135-78-80.

E-mail: postmaster@lebedev.ru

Статья поступила в редакцию 7 июля 2009 г.

В России данный класс установок представлен би-дипольной ловушкой "Магнетор" [11], физический пуск которой был произведен в феврале 2003 г. в МИФИ. В установке реализована новая магнитная конфигурация, создаваемая двумя токовыми кольцами, токи в которых имеют противоположное направление, и вследствие чего имеющая сепаратрису — магнитную силовую линию, проходящую через нуль магнитного поля. Благодаря наличию сепаратрисы из критерия устойчивости Кадомцева следует, что давление плазмы может равняться нулю на сепаратрисе и за ней, иными словами, получается конфигурация с отрывом плазмы от стенок, и эта система может быть устойчива.

Результаты ранее проведенных работ по измерению распределения плазменного давления в магнитной конфигурации установки "Магнетор" [12] и качественное сравнение экспериментально полученных профилей плазменного давления с расчетными критическими профилями показали, что плазма обладает устойчивым профилем давления за счет более пологого экспериментального профиля. Однако в этих работах не учитывался вклад в плазменное давление быстрой электронной компоненты.

Регистрация высокоэнергетичных электронов возможна по анализу рентгеновского излучения, возникающего при взаимодействии этих электронов с элементами конструкции установки или в самой плазме при торможении на ионах.

В работе представлены результаты исследования пространственной и энергетической структур быстрой электронной компоненты по рентгеновскому излучению плазмы в установке "Магнетор".

Описание установки

Схематичный вид установки "Магнетор" представлен на рис. 1. Разрядная вакуумная камера из немагнитной нержавеющей стали представляет собой вертикальный цилиндр высотой 450 мм и внутренним диаметром 480 мм, по бокам которого расположены четыре боковых патрубка внутренним диаметром 300 мм. Откачка камеры на высокий вакуум ($< 10^{-5}$ Торр) осуществляется вакуумным постом, собранным на основе турбомолекулярного насоса ТМН-1500.

Магнитная конфигурация образована двумя размещенными внутри разрядной камеры вложенными одна в другую катушками, находящимися на одной оси и имеющими общий центр, токи в которых имеют противоположное направление. Токи в катушках в основной конфигурации магнитного поля подобраны таким образом, чтобы возникающая при этом сепаратриса находилась внутри вакуумной камеры, и токи составляли 40 и 20 кА во

внешней и внутренней катушках, соответственно. В кольцевой щели между катушками образуется магнитная пробка ($B \sim 2$ кГс), препятствующая попаданию в щель частиц, поэтому там расположены опоры внутреннего кольца. Поле в центре ловушки при этом составляет 1,2 кГс.

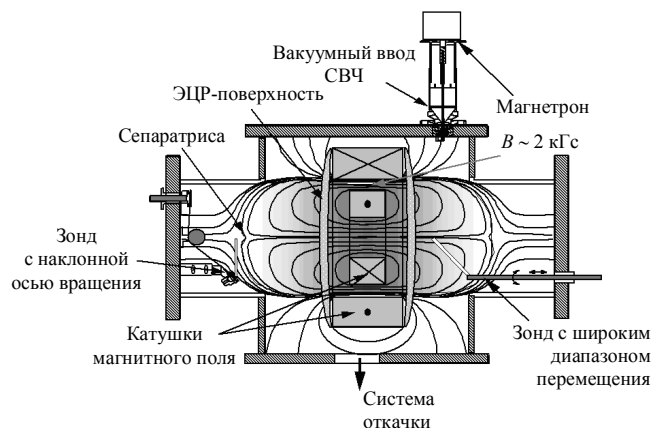


Рис. 1. Схематичный вид установки "Магнетор"

Плазма в установке создается в результате ЭЦР. Диапазон рабочих давлений газа 10^{-3} — 10^{-5} Торр. В качестве источника СВЧ-излучения используется магнетрон мощностью 1 кВт с частотой генерации 2,45 ГГц. Основной гармонике ЭЦР соответствует магнитное поле $B_{res} = 875$ Гс. Питание магнетрона производится от импульсного блока с частотой 50 Гц. Длительность импульсов генерации СВЧ составляет 10 мс. Для ввода СВЧ-мощности в объем используется разработанное специальное устройство, представляющее собой вакуумно-уплотненную антенну с петлей по магнитной связи, и коаксиальной линией, выходящей из магнетрона. При диагностике плазмы используются зондовый метод для анализа фоновой плазмы, а также камеры-обскуры с рентгеновскими фотопленками (РФ) и термолюминесцентными детекторами (ТЛД) для исследования быстрой электронной компоненты.

Проведенные эксперименты и анализ экспериментальных данных

Наличие рентгеновского излучения в установке "Магнетор" было зафиксировано по тестовым образцам РФ, упакованным в фильтр из черной бумаги и алюминиевый фильтр толщиной 20 мкм и расположенным за экранирующей СВЧ-поле защитной сеткой в боковом патрубке вакуумной камеры, перпендикулярном плоскости катушек магнитного поля.

Эксперимент показал, что в установке есть рентгеновское излучение ≥ 3 кэВ слабой интенсивности, и источник данного излучения расположен вблизи катушек магнитного поля.

Как известно, наиболее благоприятными областями для генерации быстрых ЭЦР-электронов являются те, где магнитные силовые линии параллельны резонансным поверхностям с равной напряженностью поля [13, 14]. При этом генерация возможна не только на основной $B = B_{res}$, но и на высших гармониках ЭЦР в областях с напряженностью поля, равной $B = B_{res}/2$, $B = B_{res}/3$ и др. [13]. В нашем случае такие условия выполняются в областях вблизи внутренней катушки (рис. 2). Источником рентгеновского излучения могут являться:

согласно проведенным ранее экспериментам, соответствует максимальной плотности плазмы [12].

Результаты экспериментов (обскурограмма объекта) представлены на рис. 3, из которого видно, что источником излучения является некая кольцевая область (в общем случае усеченный полый конус). Засветка пленки по кольцу равномерная, показывающая, что взаимодействие быстрых электронов с опорами внутреннего кольца не существенно.

Для получения полной картины пространственного распределения рентгеновского излучения

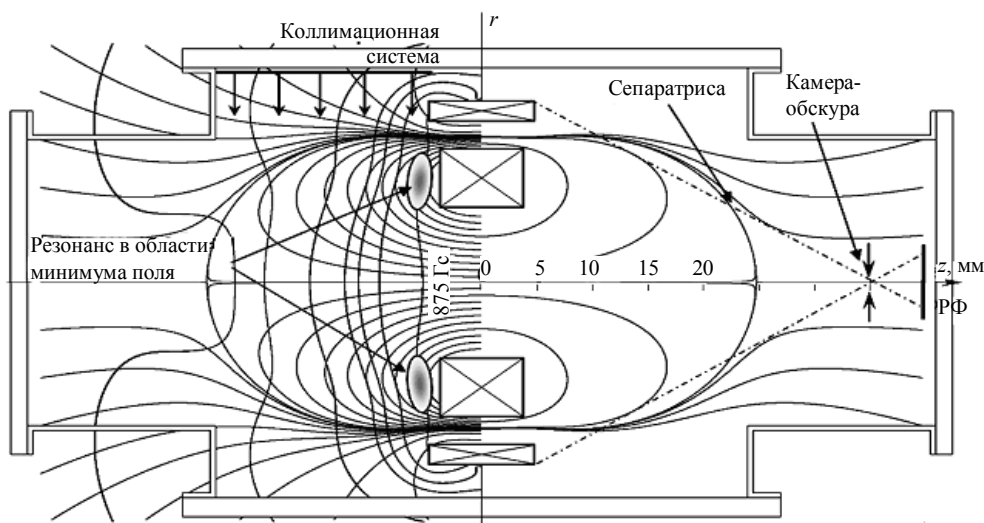


Рис. 2. Расположение диагностических устройств и возможного источника рентгеновского излучения

взаимодействие быстрых электронов с элементами конструкции установки (а именно, с банджом катушек и с опорами внутренней катушки);

взаимодействие быстрых электронов с ионами плазмы (тормозное излучение).

Для определения положения и формы источника излучения была проведена серия экспериментов с камерой-обскурой, представляющей собой экран из свинцовой пластины толщиной 2 мм с проделанным в ней отверстием. Рентгеновская фотопленка, имеющая форму квадрата со стороной 50 мм и помещенная в фильтр из черной бумаги, крепилась на расстоянии 20 мм от экранирующей пластины. Камера-обскура располагалась на оси системы параллельной плоскости токовых колец, расстояние от пленки до поверхности внутренней катушки магнитного поля составляло 280 мм для того, чтобы вся плоскость катушек была охвачена камерой и фиксировалась на пленке.

Эксперимент проводили в течение 50 с, меньшее время горения разряда не позволяло зарегистрировать излучение из-за уменьшения интенсивности излучения при прохождении отверстия камеры-обскуры. В качестве рабочего газа использовался воздух при давлении $2 \cdot 10^{-5}$ Торр, что,

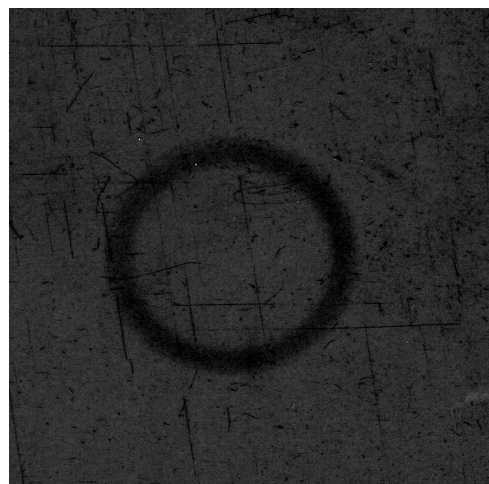


Рис. 3. Обскурограмма объекта рентгеновского излучения установки

были дополнительно проведены эксперименты с системами, коллимирующими рентгеновское излучение. Одна из них была закреплена в боковом патрубке параллельно плоскости токовых колец, другая — горизонтально под кольцами. Благодаря коллимирующей системе излучение передает реальные размеры и структуру объекта, исключая засветку рентгеновскими квантами из соседних

областей. Результаты обработки фотопленки с системой коллиматоров позволили уточнить границы источника рентгеновского излучения и совпали с результатами, полученными с помощью камеры-обскуры.

Для определения спектра излучения плазмы был использован метод "серых" фильтров [15]. В качестве детекторов в экспериментах применяли прокалиброванные РФ и ТЛД из LiF. Фильтры поглощения изготавливали из алюминия различной толщины (10—500 мкм). Детекторы располагали в боковом патрубке, перпендикулярном плоскости тонких колец, в вакуумной камере на расстоянии 35 см от центра системы (см. рис. 2). Облучение детекторов происходило так же, как и в предыдущих экспериментах, в течение 50 с при давлении остаточного газа $2 \cdot 10^{-5}$ Торр.

На рис. 4 показан восстановленный спектр рентгеновского излучения. Восстановление проводили методом эффективных энергий из измеренной кривой ослабления. Полученный спектр имеет две явно выраженные компоненты и достигает значения энергий рентгеновских квантов 25 кэВ.

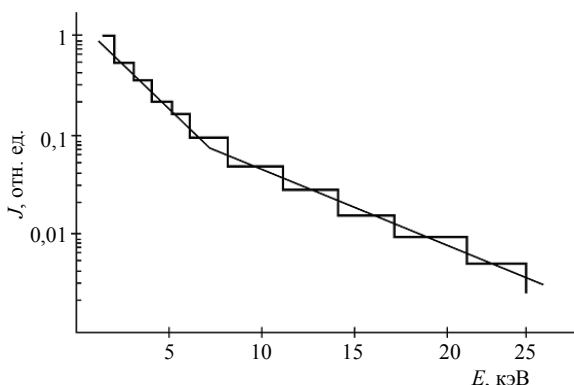


Рис. 4. Энергетический спектр рентгеновского излучения установки "Магнетор"

Как показали эксперименты, несмотря на то, что большая часть излучения возникает из-за столкновений частиц с бандажом на ряде силовых линий, проходящих через край внутренней катушки, существует второй, более слабый уровень засветки, отвечающий тормозному излучению из объема плазмы, который представляет основной интерес для изучения распределения давления быстрой электронной компоненты. Следует подчеркнуть, что пересечение частью силовых линий края внутренней катушки не препятствует ЭЦР-ускорению электронов до энергий более 25 кэВ.

Заключение

В результате проведенных экспериментов обнаружено, что основной причиной возникновения рентгеновского излучения в установке "Магнетор"

является взаимодействие быстрых электронов с бандажом внутренней катушки. Это вызвано тем, что часть силовых линий, на которых происходит интенсивная передача энергии электронам от СВЧ-поля, пересекает край бандажа внутренней катушки. Несмотря на это, энергия быстрых электронов достигает 25 кэВ.

Зарегистрированное излучение из объема плазмы позволяет говорить о возможности применения рентгеновской диагностики для восстановления пространственного распределения давления быстрой электронной компоненты в условиях ЭЦР-плазмы, удерживаемой в ловушке "Магнетор".

Работа выполнена при поддержке гранта
Президента Российской Федерации
для государственной поддержки молодых ученых
№ МК-4357.2009.2.

Литература

1. Кадомцев Б. Б.// Магнитные ловушки для плазмы. Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций. — М.: Изд-во АН СССР, 1958. Т. 4. С. 353.
2. Hasegawa A. A Dipole Field Fusion Reactor// Comments Plasma Phys. And Controlled Fusion. 1987. V. 11. P. 147.
3. Hasegawa A., Chen L., Mauel M. E. A D-³He fusion-reactor based on a dipole magnetic-field// Nucl. Fusion. 1990. V. 30. P. 2405.
4. Morozov A. I., Pastukhov V. P., Sokolov A. Yu.: Proc. Workshop on D-³He Based Reactor Studies. — Moscow: Kurchatov Atomic Energy Institute, 1991.
5. Teller E., Glass A., Fowler T. K., Santarius J.// Fusion Technology. 1992. No. 22. P. 82.
6. Levitt B., Maslovsky D., Mauel M. E. Measurement of the global structure of interchange modes driven by energetic electrons trapped in a magnetic dipole// Phys. Plasmas. 2002. V. 1. No. 9. P. 2507.
7. Levitt B., Maslovsky D., Mauel M. E.// PRL. 2005. No. 94. P. 175002.
8. Garnier D.T., Hansen A., Mauel M. E., Ortiz E., Boxer A. C., Ellsworth J., Karim I., Kesner J., Mahar S., Roach A.// Phys. Plasmas. 2006. No. 13. P. 056111; <http://psfcww2.psfc.mit.edu/idx/pubs.html>.
9. Yoshida Z., Ogawa Y., Morikawa J., Furukawa M., Saitoh H., Hirota M., Hori D., Shiraiishi J., Watanabe S., Yano Y. Magnetosphere-like Plasma Produced by Ring Trap 1 (RT-1) 21st IAEA Fusion Energy Conference 16—21 October Chengdu, China. Paper ic_p7-14 (http://www-pub.iaea.org/MTCD/Meetings/FEC2006/ic_p7-14.pdf).
10. Takaya Goto, Eiichi Yatsuka, Junji Morikawa, Yuichi Ogawa. Plasma Production by Electron Cyclotron Heating on the Internal Coil Device Mini-RT// Japanese Journal of Applied Physics. 2006. V. 45. No. 6A. P. 5197—5202.
11. Бердникова М. М., Вайтонене А. М., Вайтонис В. В. и др. Установка для удержания плазмы полем двух кольцевых катушек с током// ВАИТ. Сер. Термоядерный синтез. 2003. Вып. 1. С. 22—27.
12. Krashevskaya G. V., Kurnaev V. A., Tsventoukh M. M. Plasma parameters distribution in the experimental model of the compact-dipole magnetic confinement device// Proceeding of 28th International Conference on Phenomena in Ionized Gases, July 15—20, 2007, Prague, Czech Republic. P. 393—396.
13. Ikegami H., Ikezi H., Hosokawa M., Tanaka Sh. Takayama K.// Phys. Rev. Lett. 1967. V. 19. P. 778.

14. Levitt B., Maslovsky D., Mauel M. E., Waksman J.// Physics of plasmas. 2005. V. 12. P. 055703.

15. Стрэттон Т. Рентгеновская спектроскопия/ Под ред. Р. Хаддлстоуна, С. Леонарда — М.: Мир, 1967. С. 297.

Investigations of high-energy electrons of the microwave discharge plasma in bi-dipole magnetic trap "Magnetor" by x-ray analysis

G. V. Krashevskaya, V. A. Kurnaev, G. H. Salakhutdinov
The Moscow Engineering-Physical Institute (The State University),
31, Kashirsky highway, Moscow, Russia
E-mail: galkrosh@rambler.ru

M. M. Tsvetoukh
Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences,
53, the Lenin avenue, Moscow, Russia
E-mail: postmaster@lebedev.ru

The results of investigation of the microwave plasma fast electrons in a magnetic trap "Magnetor" are presented. The information on presence and location of such group of electrons is important for estimation of a total plasma pressure with taking into account previous probe measurements. It was obtained that fast-electrons fraction is localized within the magnetic separatrix at the main plasma confinement region. The maximal measured fast-electrons energy is higher than 25 keV.

PACS:52.38.Ph

Keywords: microwave discharge, dipole magnetic trap, x-ray radiation, plasma pressure, convective stability, thermonuclear reactor.

Bibliography — 15 references.

Received 7 July 2009