

УДК 533.9

Пространственная конфигурация плазменного сгустка, полученного при гиромагнитном резонансе в пробочной магнитной ловушке

В. В. Андреев, А. А. Новицкий, А. М. Умнов, Д. В. Чупров

Экспериментально и численно изучается пространственная конфигурация релятивистских плазменных сгустков, генерируемых в процессе гиромагнитного авторезонанса и удерживаемых в зеркальной магнитной ловушке. С помощью рентгеноспектральных и рентгенорадиометрических измерений исследованы характеристики генерируемого плазменными сгустками тормозного излучения с газа и со стенок камеры, что позволило определить область локализации сгустка и проанализировать динамику его удержания.

PACS: 52.27.Ny, 52.50.Sw, 52.59.Px

Ключевые слова: гиромагнитный авторезонанс, релятивистские плазменные сгустки, зеркальная магнитная ловушка, тормозное излучение, рентгеновская спектрометрия.

Введение

Релятивистские плазменные сгустки, генерируемые в процессе гиромагнитного авторезонанса (ГА) в зеркальной магнитной ловушке, представляют большой научный и прикладной интерес [1—5]. Ранее [6] было показано, что гиорезонансное ускорение электронов имеет авторезонансный характер и обеспечивает квазисинхронный рост энергии частиц при возрастании индукции магнитного поля. Предельные энергии частиц в результате такого взаимодействия определяются амплитудой импульсного магнитного поля. В экспериментах, результаты которых обсуждаются в данной работе, условия гиорезонансного взаимодействия обеспечиваются путем увеличения индукции магнитного поля в ЭЦР-плазме, удерживаемой в ловушке пробочного типа. Уровень достижимых энергий в условиях экспериментов составлял величину порядка 0,5 МэВ. В работах, опубликованных ранее, было показано, что эффективность захвата частиц в авторезонансный режим ускорения связана как с индукцией стартового (стационарного) магнитного поля, так и со скоростью нарастания импульсного магнитного поля [5, 7].

Целью настоящей работы является определение пространственного распределения плазмен-

ного сгустка и его параметров методами рентгеновской спектрометрии и радиометрии, а также сопоставление измерений с результатами численного моделирования динамики сгустка.

Экспериментальная установка и диагностики

Экспериментальная установка (см. рис. 1) и условия проведения экспериментов, подробно описаны в [5]. Система представляет собой зеркальную магнитную ловушку протяженностью 120 мм с пробочным отношением 1,6, создаваемую электромагнитами 1. Плазма импульсного микроволнового разряда создается в цилиндрическом резонаторе 2, возбуждаемом штыревой антенной 3 на основной моде колебаний TE_{111} . Частота магнетронного генератора 2,45 ГГц, мощность в импульсе регулируется в диапазоне 0,5—2,5 кВт при длительности импульса 1,2 мс и при скважностях 20—30. Вариация тока электромагнита позволяет менять форму и пространственную локализацию резонансной поверхности внутри разрядной камеры и влиять на параметры развития и поддержания исходной ЭЦР-плазмы. Рабочие давления плазмообразующего газа (аргон) могут быть установлены в диапазоне 10^{-5} — 10^{-4} Торр.

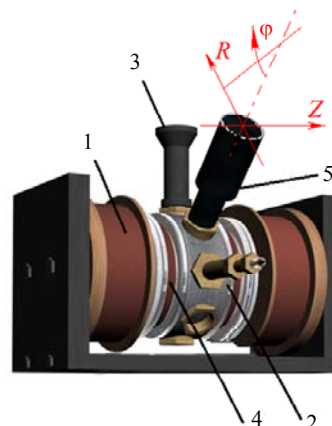


Рис. 1. Экспериментальная установка и средства диагностики. 1 — соленоиды электромагнита; 2 — резонатор; 3 — штыревой фидер; 4 — катушки импульсного магнитного поля; 5 — детекторный блок

Андреев Виктор Викторович, доцент.
Новицкий Андрей Александрович, аспирант.
Умнов Анатолий Михайлович, доцент.
Чупров Денис Викторович, старший преподаватель.
Российский университет дружбы народов.
Россия, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6.
Тел. 8 (495) 955-07-25. E-mail: chu_d@mail.ru

Статья поступила в редакцию 18 марта 2015 г.

© Андреев В. В., Новицкий А. А., Умнов А. М., Чупров Д. В., 2015

Для реализации режима гиромангнитного авторезонанса на стационарное магнитное поле ловушки накладывается соосно направленное импульсное магнитное поле. Катушки импульсного магнитного поля 4 охватывают боковую стенку резонатора и создают в разрядной камере поле, близкое к конфигурации Гельмгольца. Существующие ограничения величины импульсного тока, определяемые мощностью источников питания и используемых коммутаторов, позволяют увеличивать индукцию магнитного поля в области разряда на регулируемую величину до 1000 Гс за время от 50 до 800 мкс. Нарастание магнитного поля происходит по синусоидальному закону, но закон спада магнитного поля близок к линейному.

Для рентгеновских спектрометрических и радиометрических измерений был создан тракт, состоящий из сцинтилляционного детектора БДЭГ-2-38 на основе цилиндрического кристалла NaI(Tl) и многоканального анализатора АЦП-USB8k-B. Калибровка энергетической шкалы и абсолютной эффективности регистрации спектрометрического тракта проводилась при помощи калибровочных радионуклидных источников ^{241}Am , ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{22}Na из комплекта ОСГИ-100-1р с применением экранировки фонового излучения и последующей компенсацией фоновых спектров. Мощность рентгеновского излучения из камеры измерялась путем интегрирования полученных спектров.

Пространственное распределение плазменного пучка определялось на основе измерений направленности тормозного излучения из камеры. Для этого на входе рентгеновского детектора располагался коллиматор с цилиндрическим каналом 5, апертура которого составляла 6° , а для защиты от альбедо весь детектор был экранирован свинцовым кожухом с толщиной стенки не менее 15 мм. Весь детекторный блок 5 представлен на рис. 1.

Численный эксперимент

Численная модель процесса ГА построена по методу частиц в ячейке с учетом электростатических взаимодействий [8]. Выбор модели связан с тем, что в результате быстрого увеличения гирорадиусов электронов в условиях ГА в плазме возникает сильное электрическое поле, связанное с частичным разделением зарядов (с поляризацией плазмы). В модели учтены основные параметры экспериментальной установки: структура магнитного поля, геометрические размеры резонатора и мода СВЧ-колебаний. Плазма считалась полностью ионизированной, ионы однозарядными. Процессы ионизации не учитывались. Начальная плотность плазмы варьировалась в пределах 10^9 — 10^{10} см $^{-3}$. Уравнения движения электронов реша-

лось по схеме Бориса, ионов — по схеме «с перешагиванием». Целью численного моделирования являлось изучение эволюции плазмы, определение энергетических спектров электронов и ионов, а также их потерь на стенках камеры и штыревой антенне по достижению максимальной величины магнитного поля и после спада магнитного поля.

Обсуждение результатов

Численное моделирование позволило определить основные параметры плазмы, энергетические спектры электронов и ионов, пространственную локализацию генерируемого сгустка релятивистских электронов, скорость и локализацию потерь частиц на стенках камеры и штыревой антенне. Результаты численного эксперимента показали, что по достижению максимума магнитного поля в плазме образуется релятивистский сгусток электронов, вращающийся в медианной плоскости камеры со средним радиусом порядка 2 см. Захваченные электроны составляют 50—70 % от начального количества. Незахваченные в ГА ускоренные электроны локализованы в центре ловушки. После спада магнитного поля захваченные электроны представляют собой кольцевую структуру, внутренний и внешний радиусы которой порядка 2 и 4 см соответственно. Осевая протяженность сгустка составляет не более 5—8 мм. На численной модели в процессе ускорения электронов наблюдаются существенные баунс-колебания формируемого сгустка, которые приводят к частичной высадке сгустка на торцевые стенки камеры. Наблюдаемые на численной модели эффекты нашли свое экспериментальное подтверждение.

Экспериментально было обнаружено, что тормозное излучение, генерируемое создаваемыми сгустками, имеет явную пространственную анизотропию, характер которой свидетельствует в пользу пространственной конфигурации сгустка, получаемой на численной модели.

Анализ спектрального состава и радиометрия тормозного излучения, генерируемого плазменным сгустком при взаимодействии с атомами и ионами плазмообразующего газа с применением приемника с узкой диаграммой направленности, позволил определить конфигурацию и локализацию плазменного сгустка.

Была проведена серия экспериментов, в которой варьировались осевое — Z и радиальное положение — R , а также угловая ориентация детектора относительно камеры — φ . На рис. 1 схематически изображены направления отсчета этих координат и углов. Спектры тормозного излучения из камеры, полученные при перемещении детекторного блока вдоль оси Z , представлены на рис. 2. Ось коллиматора совпадает с продолжени-

ем радиуса камеры, геометрический центр кристалла детектора расположен на расстоянии 30 см от оси камеры. Амплитуда импульсного магнитного поля $B_{имп}$ составляла 800 Гс при стационарном поле $B_{стац} = 840$ Гс, подводимой импульсной СВЧ-мощности 2,5 кВт и давлении аргона $1,5 \cdot 10^{-5}$ Торр.

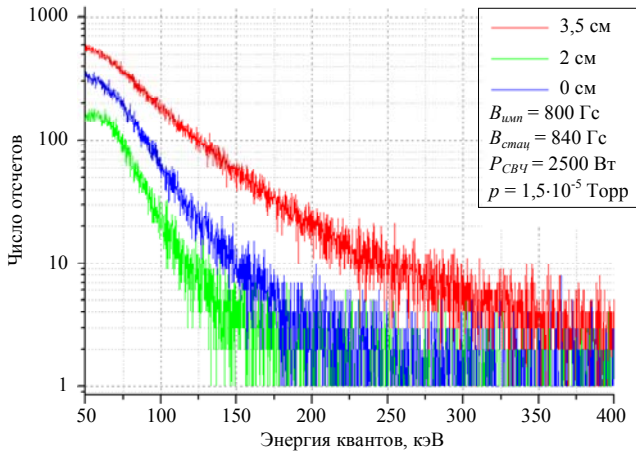


Рис. 2. Измеренные спектры тормозного излучения из камеры при перемещении детекторного блока вдоль оси Z

На рис. 3, а представлены кривые зависимости числа зарегистрированных квантов тормозного излучения при вариации амплитуды импульсного магнитного поля, полученные в результате обработки спектров, приведенных на рис. 2. Прочие параметры эксперимента те же, что на рис. 2. Кривые поглощенной мощности излучения качественно повторяют ход приведенных на рис. 3, а зависимостей с максимальными значениями порядка 30 МэВ/с.

На основе представленных зависимостей можно сделать вывод о том, что в эксперименте присутствовали как минимум три области генерации рентгеновского излучения. Первая располагалась в центральной части резонатора, ей соответствует максимум на приведенных кривых в области $Z = 0$. Детекторный блок при таком положении находился напротив бериллиевое окна в боковой стенке резонатора. На противоположной стенке резонатора расположен порт вакуумной откачки. Таким образом, в телесный угол регистрации излучения попадал только малый плазменный объем, следовательно, излучение возникало при взаимодействии частиц плазменного сгустка с атомами и ионами рабочего газа. При сопоставлении спектрограммы рис. 2 и распределения квантового выхода рис. 3, а можно увидеть, что излучение в медианной плоскости камеры (при $Z = 0$) характеризовалось как относительно мягкое и менее интенсивное по сравнению с излучением из второй и третьей областей. Эти области находились вблизи торцов резонатора, где тормозное излучение возникало в результате взаимодействия

быстрых частиц с металлической стенкой и характеризовалось существенно большей интенсивностью и энергиями квантов излучения. Характеристическое излучение из торцевых областей резонатора практически полностью поглощалось материалом его стенок и катушками импульсного поля.

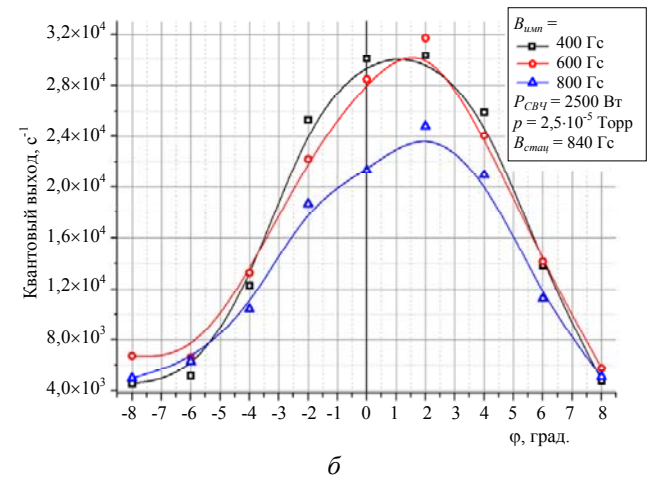
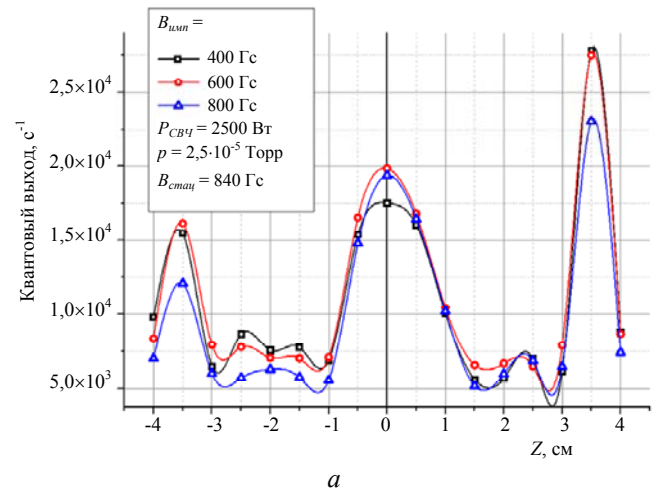


Рис. 3. Число квантов тормозного излучения из камеры: а — при перемещении детекторного блока вдоль оси Z, б — при вариации угла ϕ

Выявлено, что излучение в торцевой области камеры имеет характерное угловое распределение. На рис. 3, б приведены кривые квантового выхода излучения, полученные при вариации угла ϕ между осью детектора и продолжением радиуса камеры. Геометрический центр кристалла детектора в этом эксперименте оставался в той же осевой плоскости, что и в предыдущей серии экспериментов (рис. 2 и 3, а при $Z = 3,5$ см). Максимум полученной кривой смещен относительно положения $\phi = 0$, при котором детектор ориентирован вдоль радиуса. Важно отметить, что приведенное на рис. 3, б угловое распределение тормозного излучения не может быть объяснено неоднородностью торцевой стенки камеры и боковой стенки

вблизи торца и, как следствие, различным поглощением излучения на пути к детектору. Конструкция резонатора осесимметрична, поэтому при учете поглощения направления, соответствующие положительным и отрицательным значениям φ полностью равнозначны. Кроме того, была проведена контрольная серия экспериментов с перемещением детектора вдоль радиуса камеры в плоскости ее торцевой стенки. При перемещении сохранялся перпендикуляр между этим радиусом и осью детектора. Измерения показали симметричное распределение интенсивности тормозного излучения с максимумом в области, соответствующей $\varphi = 0$ на рис. 3, б. Это может свидетельствовать о наличии преимущественного азимутального направления движения частиц, бомбардирующих торцевую стенку камеры.

Заключение

Радиометрические измерения тормозного излучения с применением коллимированного тракта с узкой диаграммой направленности выявляют наличие преимущественного азимутального направления движения частиц. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами численного моделирования динамики плазменного сгустка, а также предыдущими экспериментами и расчетами [5, 7] и позволяют утверждать, что сгусток вращается в медианной плоскости ловушки на фоне ионной компоненты.

Основные потери частиц происходят при высадке на штыревую антенну, запитывающую СВЧ-резонатор, и на торцевые стенки камеры, что подтверждается более интенсивным тормозным излучением из этих областей. Потери частиц на торцевых стенках обусловлены значительной амплитудой баунс-колебаний, предсказанных при моделировании.

Дальнейшее уточнение параметров пространственной локализации и конфигурации полученных релятивистских плазменных сгустков планируется проводить на основе сопоставления ранее полученных экспериментальных и расчетных результатов с результатами рентгенографического анализа тормозного излучения из плазменного объема.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нейшадт А. И., Тимофеев А. В. // ЖЭТФ, 1987. Т. 93. № 5 (11). С. 1706.
2. Милантьев В. П. // УФН, 2013. Т. 183. № 8. С. 875.
3. Gal O. // IEEE Transactions on Plasma Science, 1989. V. 17. No. 4. P. 622.
4. Inoue T., Hattori T., Sugimoto S., et al. // Review of Scientific Instruments. 2014. V. 85. P. 02A958.
5. Андреев В. В., Новицкий А. А., Умнов А. М., Чупров Д. В. // ПТЭ, 2012. № 3. С. 15.
6. Andreev V. V., Golovanivsky K. S. // Phys. Letters. 1984. No. 100A. P. 357.
7. Андреев В. В., Новицкий А. А., Умнов А. М. и др. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2013. Т. 36. Вып. 1. С. 86.
8. Birdsall C. K., Langdon A. B. Plasma Physics via Computer Simulation. — Bristol, Philadelphia: IOP Publishing Ltd, 1995.

Spatial distribution of a plasma vortex obtained under gyromagnetic resonance in the mirror magnetic trap

V. V. Andreev, A. A. Novitsky, A. M. Umnov, and D. V. Chuprov

Peoples' Friendship University of Russia (PFUR)
6 Miklukho-Maklaya str., Moscow, 117198, Russia
E-mail: chu_d@mail.ru

Received March 18, 2015

The spatial configuration of a plasma vortex with the middle relativistic electron component produced under the gyromagnetic autoresonance and confined in the mirror magnetic trap have been studied experimentally and by numerical modeling using a particle in the cell method. Characteristics of bremsstrahlung generated by the plasma vortex on gas and chamber walls were investigated by the X-ray spectrometry and radiometry methods. Obtained results and their analysis have allowed to define the vortex localization and dynamics. The sizes of the bunch: the radius is 2 cm; the size along the axis is about 0.5 cm. The number of electrons trapped in gyromagnetic autoresonance mode is 50—70 percent of the number of electrons in the initial plasma.

PACS: 52.27.Ny, 52.50.Sw, 52.59.Px

Keywords: gyromagnetic autoresonance, relativistic plasma vortex, mirror magnetic trap, bremsstrahlung, X-ray spectrometry.

REFERENCES

1. A. I. Neishadt and A. V. Timofeev, *J. Exp. Theor. Phys.* **93**, 1706 (1987).
2. V. P. Milant'ev, *Phys. Usp.* **183**, 875 (2013).
3. O. Gal, *IEEE Transactions on Plasma Science* **17**, 622 (1989).
4. T. Inoue, T. Hattori, S. Sugimoto, et al., *Review of Scientific Instruments* **85**, 02A958. (2014).
5. V. V. Andreev, A. A. Nivitsky, A. M. Umnov, et al., *Instrum. Exp. Tech.*, No. 3, 15 (2012).
6. V. V. Andreev and K. S. Golovanivsky, *Phys. Letters*, No. 100A, 357 (1984).
7. V. V. Andreev, A. A. Nivitsky, A. M. Umnov, et al., *VANT. Ser. Termoyad. Sintez* **36**, 86 (2013).
8. C. K. Birdsall and A. B. Langdon, *Plasma Physics via Computer Simulation*. (Bristol, Philadelphia: IOP Publishing Ltd, 1995).