

УДК 533.9

## Диагностика релятивистского плазменного сгустка по тормозному излучению

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

*Метод рентгенографической диагностики использован для определения области локализации и форм-факторов релятивистского плазменного сгустка, генерируемого в зеркальной магнитной ловушке в условиях гиромангнитного авторезонанса, с последующей оценкой плотности электронной компоненты. Анализ рентгенограмм свидетельствует о наличии частиц с энергиями масштаба сотен кэВ со средней концентрацией в диапазоне  $2\text{--}8 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ . Полученные результаты хорошо согласуются с результатами рентгеноспектральных измерений и вычислительного эксперимента на основе метода частиц в ячейке.*

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

*Ключевые слова:* гиромангнитный авторезонанс, релятивистские плазменные сгустки, зеркальная магнитная ловушка, тормозное излучение, рентгенографический анализ.

### Введение

Гиромангнитный авторезонанс (ГА) обеспечивает фазовую устойчивость движения заряженной частицы в условиях циклотронного резонанса в плавно изменяющемся во времени магнитном поле, что приводит к автоматическому поддержанию резонансных условий и увеличению средней энергии электрона по закону нарастания магнитного поля [1, 2]. В процессе ГА генерируются плазменные сгустки с высокоэнергичной электронной компонентой. Параметры сгустков зависят от амплитуды и скорости нарастания импульсного магнитного поля, напряженности электрического поля электромагнитной волны накачки, а также от стартового магнитного поля пробочной ловушки.

В работах [1, 2] было показано, что по окончании процесса ГА и стадии декомпрессии (после спада импульсного магнитного поля) формируется сгусток с квазигауссовым энергетическим распределением частиц со средней энергией порядка 0,3—

0,5 МэВ, имеющий кольцевую структуру с внутренним и внешним радиусами 2 и 4 см соответственно и осевой протяженностью порядка 3—4 мм.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментов, в которых условия гирорезонансного взаимодействия обеспечиваются путем увеличения индукции магнитного поля пробочной конфигурации, с последующим удержанием создаваемой плазмы. Использован метод рентгенографической диагностики для определения области локализации и форм-факторов релятивистского плазменного сгустка, генерируемого в зеркальной магнитной ловушке в условиях гиромангнитного авторезонанса, что позволяет провести оценку плотности электронной компоненты.

Таким образом, целью настоящей работы является рентгенографическая визуализация плазменного сгустка и последующая оценка концентрации высокоэнергичной электронной компоненты с применением методов диагностики релятивистских плазменных пучков по тормозному излучению (ТИ) электронов на атомах и ионах плазмообразующего газа.

### Экспериментальная установка и диагностики

Экспериментальная установка, схематически изображенная на рис. 1, представляет собой зеркальную магнитную ловушку протяженностью 120 мм с пробочным отношением 1,6, создаваемую электромагнитами 1. Тонкостенный вакуумированный цилиндрический резонатор 2 возбужда-

---

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

Статья поступила в редакцию 14 марта 2016 г.

---

© Андреев В. В., Новицкий А. А., Умнов А. М.,  
 Чупров Д. В., 2016

ется на основной моде колебаний  $TE_{111}$  при помощи импульсного магнетронного генератора на частоте 2,45 ГГц. Мощность в импульсе регулируется в диапазоне 0,5—2,5 кВт при длительности импульса 1,2 мс и скважностях в диапазоне 20—30. ЭЦР-плазма образуется в результате СВЧ-пробоя плазмообразующего газа (аргон) при поддержании постоянного давления в диапазоне  $10^{-5}$ — $10^{-4}$  Торр. Вариация тока электромагнитов позволяет менять конфигурацию резонансной поверхности внутри разрядной камеры и влиять на параметры развития и поддержания исходной плазмы. Для количественного описания стационарного магнитного поля удобно использовать параметр  $\delta$ , равный отношению индукции магнитного поля в геометрическом центре ловушки к значению индукции, соответствующему условиям ЭЦР.

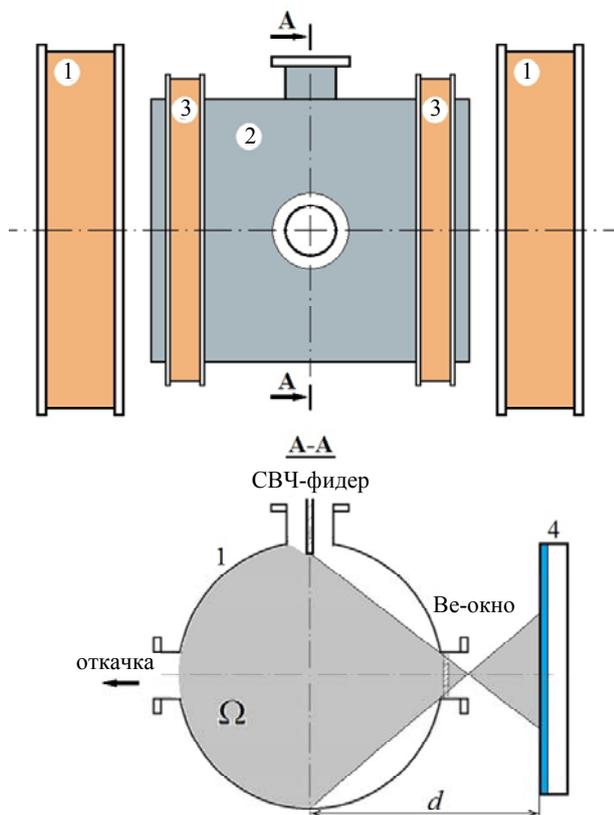


Рис. 1. Схема экспериментальной установки и средства диагностики. 1 — соленоиды электромагнита; 2 — резонатор; 3 — катушки импульсного магнитного поля; 4 — рентгенографическая кассета. Внизу — поперечное сечение установки по линии А-А.

Увеличение магнитного поля, обеспечивающее режим ГА, реализуется при наложении на стационарное магнитное поле ловушки соосного и сонаправленного импульсного магнитного поля, создаваемого катушками 3. Разработанный генератор импульсного тока позволяет увеличивать индукцию магнитного поля в области разряда на 1000 Гс за время от 50 мкс до 800 мкс. Нарастание

магнитного поля происходит по синусоидальному закону, закон спада магнитного поля близок к линейному. Более подробно установка и условия проведения экспериментов описаны в [1, 2].

Рентгеновская пленка Kodak MX-G с усиливающим экраном Ренекс ГЗ располагается в кассете 4 в плоскости, параллельной оси камеры, напротив порта вывода излучения с бериллиевым окном. Толщина бериллиевой фольги 0,5 мм. Порт представляет собой цилиндрический канал, ось которого совпадает с радиусом камеры, протяженность канала 20 мм, диаметр 22 мм. Радиус камеры 45 мм, расстояние  $d$  от оси камеры до рентгеновской пленки 110 мм. Излучение из камеры диафрагмируется портом вывода и попадает на пленку в пределах широкого телесного угла  $\Omega$  (см. рис. 1), захватывающего порт ввода СВЧ-мощности и значительную часть торцевых стенок камеры.

При помощи четырех образцовых закрытых радионуклидных гамма-источников была проведена абсолютная калибровка пленки с усиливающим экраном. Конструктивно каждый калибровочный источник представляет собой плоское алюминиевое кольцо с диаметром 25 мм и толщиной 3 мм. Активная часть в источнике термически герметизирована между двумя полиамидными пленками с общей толщиной  $100 \pm 10$  мкм. Диаметр активной части не более 3 мм. При проведении калибровки источники выкладывались непосредственно на поверхность кассеты, поэтому можно считать, что (с учетом толщины корпуса источника и кожуха кассеты) порядка 40 % испущенных источником квантов попадают на пленку. На рис. 2 приведены отпечатки излучения образцовых источников, полученные на одном снимке (разделены для компактности) при времени экспозиции 60 мин.

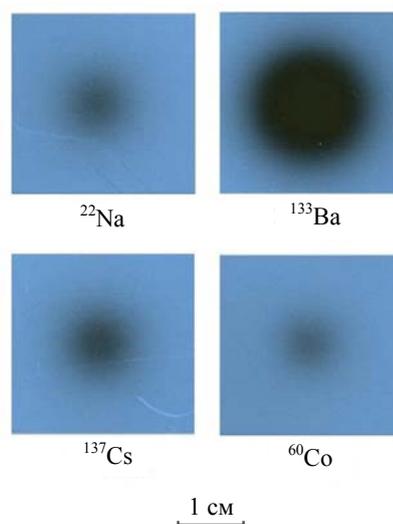


Рис. 2. Отпечатки излучения образцовых закрытых радионуклидных источников.

Активности всех четырех источников примерно одинаковы и на время проведения калибровки составляли порядка 100 кБк. Нетрудно убедиться в том, что плотность потемнения пленки, вызванная источником  $^{133}\text{Ba}$ , существенно превышает потемнение от других источников. Это вызвано в основном тем, что спектральный состав его излучения содержит несколько линий в диапазонах 30—80 кэВ и 250—350 кэВ, попадающих в область спектральной чувствительности пленки. Гамма кванты, испускаемые другими источниками, имеют энергии выше 0,5 МэВ и регистрируются значительно хуже.

Важно также отметить, что результаты проведенных ранее натурных и численных экспериментов [1—3] дали представление о квазигауссовом энергетическом распределении частиц сгустка со средней энергией порядка 0,3—0,5 МэВ и шириной порядка 50 кэВ, а также о спектральном составе генерируемого сгустком ТИ. На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что источник  $^{133}\text{Ba}$  наиболее подходит для проведения абсолютной калибровки при рентгенографических исследованиях параметров плазменного сгустка в исследуемом диапазоне энергий. Следует добавить, что для корректного определения интенсивности исследуемого ТИ были обеспечены одинаковые условия обработки экспериментальных и калибровочных снимков.

Кроме того, эволюция плазмы в условиях ГА изучалась на численной модели, построенной по методу частиц в ячейке с учетом электростатических взаимодействий. 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 (поляризацией плазмы). В модели учтены основные параметры экспериментальной установки: структура магнитного поля, геометрические размеры резонатора и мода СВЧ-колебаний. Модельная плазма полностью ионизирована, ионы однозарядны. Начальная плотность плазмы варьировалась в пределах  $10^9$ — $10^{10}$  см $^{-3}$ . Уравнения движения электронов решались по схеме Бориса [5], ионов — по схеме «перешагиванием». Целью численного моделирования являлось изучение эволюции плазмы, потерь частиц на стенках камеры и штыревой антенне для сопоставления с экспериментально наблюдаемыми результатами.

### Обсуждение результатов

Типичная рентгенограмма излучения из камеры представлена на рис. 3. Для наглядности на вставке в едином масштабе приведен отпечаток

излучения источника  $^{133}\text{Ba}$ , полученный при калибровке пленки.

Можно выделить три характерных области изображения. В нижней части рентгенограммы наблюдается отпечаток, ограниченный двумя дугами окружностей и имеющий резкие края. Этот отпечаток является изображением точечного источника рентгеновского излучения, расположенного в верхней части камеры. Очевидно, что единственным точечным источником излучения в камере может являться СВЧ-фидер, представляющий собой цилиндрический латунный стержень, погруженный в резонатор на 3 мм. В процессе ускорения и удержания плазменный сгусток вращается в медианной плоскости камеры, причем высокоэнергичные частицы, импульсы которых имеют значительную азимутальную компоненту, бомбардируют преимущественно фидер и не могут достигнуть боковой стенки камеры. Такой же вывод следует и из результатов моделирования, говорящих о том, что основные потери ускоряемых в процессе ГА частиц обусловлены их высадкой на фидер.

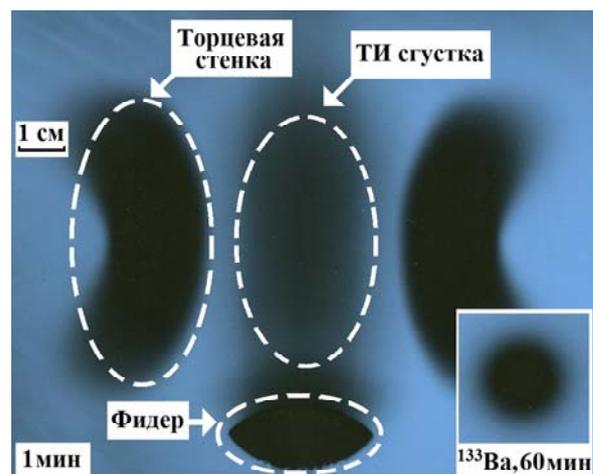


Рис. 3. Рентгенограмма излучения из камеры при параметре  $\delta = 1,05$ .

Два симметричных дугообразных отпечатка образованы излучением частиц, которые бомбардируют торцевые стенки камеры. По минимальному расстоянию между дугами отпечатков можно судить о максимальном радиусе высадки частиц. С учетом размеров камеры и диафрагмы этот радиус составляет порядка 35 мм.

Третья характерная область на полученных рентгенограммах, расположенная в центральной части картины, обусловлена ТИ электронов сгустка, рассеивающихся на ионах и атомах плазмообразующего газа (см. рис. 3). Можно с уверенностью утверждать, что противоположная порту боковая стенка камеры не дает вклада в образова-

ние этой области рентгенограммы. Действительно, во-первых, диаметрально порту вывода излучения расположен порт откачки, который внес бы значительную неоднородность в рентгенограмму, чего на опыте не наблюдается. Во-вторых, степень потемнения пленки в областях отпечатков излучения с торцов камеры и фидера практически полная и в широких пределах не зависит от условий эксперимента. Это обусловлено существенно большей интенсивностью излучения с твердых мишеней по сравнению с ТИ, образующимся при рассеянии на газе. Следовательно, центральная часть рентгенограммы несет информацию о мощности ТИ из плазменного объема и может быть использована для оценки концентрации «горячих» электронов сгустка.

Рентгенограммы, полученные при различных величинах параметра  $\delta$ , были обработаны с применением выше описанной калибровки степени потемнения пленки, что позволило оценить мощность излучения из плазмы  $W_{ТИ}$ , которая в предположении изотропности пространственного распределения ТИ лежит в интервале 0,1—1 мкВт. Условия эксперимента: давление аргона в камере  $6 \cdot 10^{-5}$  Торр; СВЧ-мощность в импульсе длительностью 1,2 мс — 2,5 кВт; период повторения импульсов 35 мс, амплитудное значение индукции импульсного магнитного поля 1,0 кГс при времени нарастания 0,6 мс. Мощность ТИ рассчитывалась исходя из типичного значения времени регистрации рентгеновского излучения, полученного при осциллографировании сигнала детектора рентгена [1, 2] и составляющего 6 мс.

Согласно методике, описанной в работе [4], усредненная концентрация релятивистских электронов  $n_e$  связана с мощностью ТИ из плазменного объема  $V$  соотношением:

$$n_e = \sqrt{\frac{W_{ТИ}}{\bar{E}_0 \bar{v} V \Phi_{ТИ}}},$$

где  $\bar{E}_0$  — средняя энергия «горячих» электронов,  $\bar{v}$  — соответствующая ей средняя скорость, а величина  $\Phi_{ТИ} = Z^2 \cdot 3,1 \cdot 10^{-27} \text{ см}^2$  слабо изменяется в диапазоне энергий ниже 1 МэВ ( $Z$  — заряд ядра атомов плазмообразующего газа).

На рис. 4 представлены зависимости рассчитанных значений  $n_e$  от величины расстройки стартового магнитного поля  $\delta$ . Кривые 1 и 2 соответствуют границам диапазона 0,3—0,5 МэВ оценки средней энергии частиц плазменного сгустка, полученной по результатам спектрометрических измерений и численного моделирования в работах [1, 2].

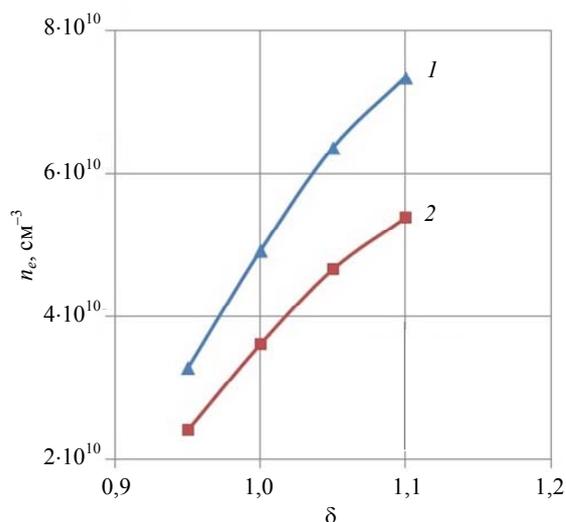


Рис. 4. Зависимость средней концентрации высокоэнергичных электронов от расстройки стартового магнитного поля  $\delta$  для значений средней энергии 0,3 МэВ (кривая 1) и 0,5 МэВ (кривая 2).

Приведенные результаты подтверждают тенденцию роста числа высокоэнергичных частиц с увеличением  $\delta$ , соответствующую улучшению эффективности захвата электронов исходной ЭЦР-плазмы в режим ГА. С ростом  $\delta$  площадь той части резонансной поверхности, которая находится в области, где величина напряженности высокочастотного поля обеспечивает надежный захват, увеличивается, что приводит к росту числа частиц, вовлеченных в процесс ГА.

Следует отметить, что полученные результаты не выявляют предсказанного при моделировании и полученного при интегрировании спектров ТИ оптимального значения расстройки стартового магнитного поля, соответствующего наилучшему захвату. Вероятнее всего, это обусловлено тем, что при увеличении числа захваченных частиц растет и число частиц, бомбардирующих СВЧ-фидер. Материал фидера (латунь) испаряется в камеру и образует облако атомов металлов, что несколько увеличивает выход ТИ из камеры [6]. Такое предположение подтверждается наличием на рентгенограммах, полученных при больших значениях параметра  $\delta$ , дополнительной области потемнения вблизи изображения фидера. При меньших значениях  $\delta$  указанный артефакт изображения проявляется очень слабо, что дает основания считать результаты рентгенографического анализа неискаженными.

### Заключение

Рентгенографические исследования излучения из плазменного объема подтвердили полученные ранее основные представления о пространственном распределении и преимущественно азиму-

тальном характере движения плазменного сгустка, возникшего в пробочной магнитной ловушке при гиромагнитном авторезонансе. Получены дополнительные свидетельства об основных механизмах потерь высокоэнергичных частиц на СВЧ-фидере и торцевых стенках камеры.

На основании проведенной абсолютной калибровки пленки с усиливающим экраном была сделана оценка мощности тормозного излучения из плазменного объема, которая при различных стартовых условиях составила 0,1—1 мкВт.

Полученные значения концентрации релятивистской электронной компоненты плазмы в интервале  $(2—8) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$  совпадают с ранее проведенными оценками. Поведение концентрации при изменении стартового магнитного поля находится в согласии с результатами численного моделирования и рентгеноспектральных измерений и подтверждает высокую эффективность захвата частиц исходной ЭЦР-плазмы в режим ГА.

Работа выполнена в рамках планов по гранту РФФ № 16-12-10409 и частично поддержана грантом РФФИ № 16-02-00640\16.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев В. В., Новицкий А. А., Умнов А. М., Чупров Д. В. // ПТЭ. 2012. № 3. С. 15.
2. Андреев В. В., Новицкий А. А., Умнов А. М., Чупров Д. В. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2013. Т. 36. Вып. 1. С. 86.
3. Андреев В. В., Новицкий А. А., Умнов А. М., Чупров Д. В. // Прикладная физика. 2015. № 3. С. 35.
4. Горожанин И. В., Иванов Б. И. // Препринт ХФТИ. 1986. Харьков: ХФТИ АН УССР.
5. Birdsall C. K., Langdon A. B. *Plasma Physics via Computer Simulation*. — Bristol, Philadelphia: IOP Publishing Ltd, 1995.
6. Atomic Data and Nuclear Data Tables. 1972. Vol. 4. P. 1-127.

## Roentgenographic investigations of a relativistic plasma bunch produced under gyromagnetic autoresonance

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

Peoples' Friendship University of Russia  
6 Miklukho-Maklaya str., Moscow, 117198, Russia  
E-mail: chu\_d@mail.ru

Received March 14, 2016

*A reliable method of roentgenography diagnostics has been employed to determine the localization, form-factor and density of the relativistic plasma bunch generated under gyromagnetic autoresonance in a mirror magnetic trap. The analysis of roentgenograms showed that a density of the bunch electron component reached  $8 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$  with average energy of electrons — hundreds of keV. The results obtained are in a good agreement with earlier experimentally and computer simulation (PIC-method) results.*

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

*Keywords:* gyromagnetic autoresonance, relativistic plasma bunch, mirror magnetic trap, bremsstrahlung, X-ray image.

#### REFERENCES

1. V. V. Andreev, A. A. Novitsky, A. M. Umnov, and D. V. Chuprov, *Instrum. Exp. Tech.*, No. 3, 15 (2012).
2. V. V. Andreev, A. A. Novitsky, A. M. Umnov, and D. V. Chuprov, *Vopr. Atomn. Nauk. Techn.* **36** (1), 86 (2013).
3. V. V. Andreev, A. A. Novitsky, A. M. Umnov, and D. V. Chuprov, *Prikladnaya Fizika*, No. 3, 35 (2015).
4. I. V. Gorozhanin and B. I. Ivanov, Preprint KFTI (KFTI, Kharkov, 1986).
5. C. K. Birdsall and A. B. Langdon, *Plasma Physics via Computer Simulation*. (Bristol, Philadelphia: IOP Publishing Ltd, 1995).
6. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, Vol. 4. (1972). P. 1-127.