

УДК 533.9...15

## Исследование динамики развития релятивистских плазменных образований в длинном пробкотроне методами фотохронографии, рентгенографии и моделирования

В. В. Андреев, А. А. Новицкий, М. А. Корнеева, А. М. Умнов

*В работе представлены экспериментальные результаты, свидетельствующие о возможности реализации авторезонансного ускорения электронов плазмы в реверсном магнитном поле в протяженной ловушке пробочного типа. Показано, что в результате гиромангнитного авторезонанса образуется электронный сгусток с энергией несколько сотен кэВ, удерживаемый длительное время в пробкотроне. Методом частиц в ячейке проведено численное моделирование реверсного режима гиромангнитного авторезонанса. Полученные на численной модели результаты полностью согласуются с экспериментальными данными.*

PACS: 52.50.Sw

*Ключевые слова:* гиромангнитный авторезонанс, эффективность захвата, численное моделирование, накопление, магнитная ловушка.

### Введение

Помимо широко распространенных способов получения релятивистской плазмы (адиабатическое сжатие и его вариации [1, 2], плазменно-пучковый разряд [3]), существует возможность ее получения в условиях электронного циклотронного резонанса (ЭЦР) в адиабатически нарастающем во времени магнитном поле — эффект гиромангнитного авторезонанса (ГА) [4]. Режим гиромангнитного авторезонанса в нарастающем во времени магнитном поле пробочной конфигурации обеспечивает захват и ускорение электронной компоненты исходной холодной плазмы. В процессе увеличения во времени магнитного поля условие резонанса самоподдерживается за счет квазисинхронного с ростом магнитного поля возрастания релятивистской массы электронов. Такой процесс приводит к образованию релятивистских долгоживущих плазменных сгустков, представляющих

собой заполненное ионами облако релятивистских электронов со средней энергией электронной компоненты масштаба сотен кэВ, удерживаемых внешним магнитостатическим полем.

В работе представлены первые результаты по реализации т. н. реверсного режима ГА [5]. Целью проведенных исследований являлась экспериментальная верификация, а также развитие методов вычислительного эксперимента при изучении процессов, имеющих место при генерации и удержании энергичных плазменных сгустков в протяженной магнитной ловушке пробочного типа.

### Описание экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Цилиндрический СВЧ-резонатор (мода  $TE_{118}$ , частота  $f = 2,45$  ГГц, добротность  $Q = 620$ , мощность  $P_{in} = 2,5$  кВт) помещен в осесимметричное магнитное поле протяженной пробочной конфигурации ( $R = 1,2$  см,  $L = 80$  см) с индукцией магнитного поля в центре ловушки  $B = 1200$  Гс.

Стационарное магнитное поле создается тремя парами соосных катушек, запитываемых тремя источниками постоянного тока. Это позволяет поддерживать величину постоянного магнитного поля в средней плоскости резонатора на требуемом согласно проводимым экспериментам уровне или плавно изменять ее при сохранении или изменении аксиального профиля магнитного поля.

---

Андреев Виктор Викторович, доцент.  
 Новицкий Андрей Александрович, инженер.  
 Корнеева Мария Анатольевна, ассистент.  
 Умнов Анатолий Михайлович, доцент.  
 Российский университет дружбы народов (РУДН).  
 Россия, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6.  
 Тел. 8 (903) 733-92-75.  
 E-mail: vvandreev@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 14 марта 2016 г.*

---

© Андреев В. В., Новицкий А. А., Корнеева М. А., Умнов А. М., 2016

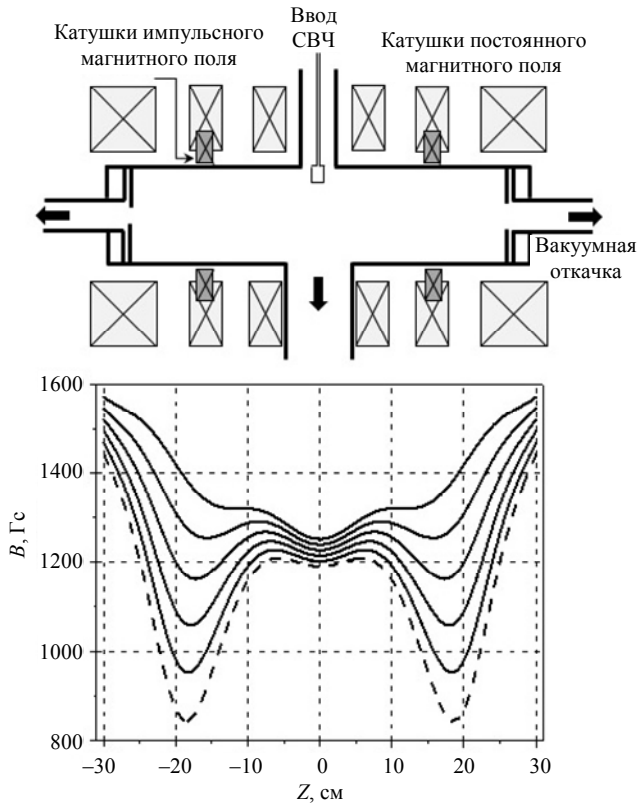


Рис. 1. Схема экспериментальной установки и временной профиль результирующего магнитного поля  $B$ . Нижняя (пунктирная) кривая соответствует моменту времени, когда импульсное магнитное поле достигает своего максимального значения, а сплошные кривые —  $B(z,0)$  приведены через равные промежутки времени.

Генератор СВЧ (магнетрон М-168, 5,0 кВт, 2450 МГц) со встроенным модулятором обеспечивал генерацию прямоугольных импульсов длительностью 1,1 мс с регулируемой частотой повторения от 1 Гц до 1 кГц.

Генерация необходимого для осуществления режима гиромангнитного авторезонанса импульсного магнитного поля осуществляется посредством импульсного тока, пропускаемого через пару катушек, осесимметричных с резонатором и катушками стационарного магнитного поля. Катушки импульсного магнитного поля размещены симметрично относительно положения минимума магнитного поля ловушки. Направление тока в импульсных катушках, расположенных во второй и седьмой пучностях электрического поля стоячей волны, обеспечивает создание магнитного поля с направлением, противоположным стационарному магнитному полю. Увеличение тока в импульсных катушках обеспечивает локальное снижение стационарного магнитного поля до уровня, соответствующего значению ЭЦР для рабочей частоты резонатора (875 Гс). Временное изменение продольного профиля результирующего магнитного поля представлено на рис. 1, где пунктирная кривая соответствует моменту времени, когда им-

пульсное магнитное поле достигает своего максимального значения, а сплошные кривые —  $B(z,0)$ , приведены через равные промежутки времени. Разработанная схема позволяет получить временные характеристики нарастания (0,9 Гс/мкс) и спада (1,5 Гс/мкс) импульсного магнитного поля, обеспечивающих устойчивый захват электронов в режим ГА [4]. Уменьшение тока приводит к восстановлению исходного профиля стационарного магнитного поля, обеспечивая, тем самым, захват и ускорение электронов образованной при ЭЦР первичной плазмы в режим ГА в двух зонах, упомянутых выше. Образованные в результате ГА взаимодействия плазменные сгустки с релятивистской электронной компонентой дрейфуют в стационарном магнитном поле с малым градиентом (11 Гс/см) к центру ловушки, где напряженность электрического поля равна нулю, а индукция магнитного поля минимальна. Величина амплитуды реверсного магнитного поля варьировалась в интервале от 375 Гс до 500 Гс, значение напряженности стационарного магнитного поля на оси системы в местах расположения катушек реверсного поля составляла 1250 Гс.

Рабочий цикл установки представляет собой импульс тока в импульсных магнитных катушках длительностью 900 мкс, синхронизированный с передним фронтом СВЧ-импульса длительностью 1,1 мс. Системы энергообеспечения позволяют реализовать импульсно-периодический режим работы установки со скважностью 35, что позволяет рассчитывать на реализацию режима накопления генерируемых плазменных сгустков. Рабочее давление плазмообразующего газа (Ar) варьировалось в пределах от  $1 \times 10^{-5}$  до  $1 \times 10^{-4}$  Торр. Рентгеновское излучение регистрировалось двумя идентичными детекторами БДЭГ2-23 на основе сцинтиллятора (NaI(Tl), размеры 40x40 мм), оснащенных коллимационными системами, а также элементами магнитной экранировки и защиты от альbedo. Измерения проводились в направлениях как ортогональном по отношению к вектору индукции магнитного поля в центральной части, так и вдоль, т. е. с торца установки.

Для решения задач по наблюдению динамики изменения формы генерируемых плазменных сгустков на различных стадиях рабочего цикла установки, применялась электронно-оптическая хронографическая камера [6], сопряженная с оптической ПЗС-матрицей с термоэлектрическим модулем охлаждения. Запуск ЭОП-камеры и других диагностических систем был синхронизирован с основными системами экспериментальной установки, обеспечивающих ее рабочий цикл.

Применялась кадровая система ЭОП-фотографии с экспозицией 500 нс и частотой следования кадров  $6 \cdot 10^4$  Гц. Задержка включения

ЭОП относительно начала импульса тока в импульсных катушках определялась фазой рабочего цикла, которая представляла интерес с точки зрения проводимых экспериментов. Так, для изучения фазы формирования исходной ЭЦР-плазмы она составляла 200 мкс. Накопительный режим ПЗС-камеры для фиксированной фазы рабочего цикла составлял 5 с. ЭОП-камера ориентировалась в продольном (по отношению к магнитному полю) направлении и располагалась на расстоянии 100 см от среднего сечения резонатора. Угол обзора камеры позволяет регистрировать оптическое излучение из относительно малого плазменного объема. Такое положение камеры обеспечивало возможность регистрации в режиме кадровой развертки пространственно-временной картины процессов, имеющих место при формировании и ускорении плазменных сгустков в упомянутых выше зонах, их накопления в минимуме магнитной ловушки с временным шагом между кадрами 10 нс.

Реализация описанного диагностического сценария позволяла с высокой точностью регистрировать момент образования плазмы в стадии ЭЦР, наблюдать поведение плазменных сгустков в процессе ускорения, сброса в центр ловушки и их удержания. Синхронная регистрация изображений и осциллограмм сигналов других средств диагностики (рентгеновские детекторы, зонды) в совокупности с сигналами рабочего цикла позволяли тщательно проанализировать их, выявить корреляцию регистрируемых величин и наблюдаемых процессов. Такой подход дает возможность объяснить изменение параметров генерируемых сгустков. Для рентгенографии излучения, генерируемого сгустками, была использована камера-обскура (свинцовая диафрагма с отверстием диаметром 1,5 мм), располагаемая аналогично ЭОП-камере. Полученные с ее помощью рентгенограммы позволили определить область локализации сгустка и его линейные размеры. В настоящей работе для получения изображения плазмы в рентгеновском свете использовалась пленка Kodak MXG в стандартной кассете РЕНЕКС с усиливающим экраном. Камера-обскура располагалась на расстоянии порядка 1 м от центральной части резонатора, куда вводилась мишень.

Кроме того, изучение динамических процессов, сопровождающих образование в протяженной магнитной ловушке релятивистских плазменных сгустков, создаваемых в условиях ГА, было проведено посредством трехмерного численного моделирования.

### Численная модель

Вычислительный эксперимент был ориентирован на решение следующих задач:

- исследование условий захвата и ускорения электронов исходной плазмы в двух локальных областях, а также последующего удержания генерируемых плазменных сгустков в длинной ловушке пробочного типа;
- анализ эффективности захвата электронов от основных рабочих параметров установки (напряженности электрического СВЧ-поля, начальной плотности плазмы, темпа нарастания магнитного поля во времени);
- изучение эволюции пространственного распределения энергетических спектров электронов и ионов в процессе ускорения.

Численная модель была построена на основе метода частиц в ячейке с учетом электростатических взаимодействий. Собственное магнитное поле, генерируемое создаваемыми плазменными сгустками на различных этапах их эволюции, в модели не учитывалось, так как для рассматриваемых параметров (плотность и средняя энергия электронной компоненты) его влияние на процесс ГА пренебрежимо мало. Уравнение движения электронов решалось по схеме Бориса [7]. Модельные ионы Ag — незамагниченные и однократно заряженные. Уравнение движения ионов решалось методом «с перешагиванием».

Вычислительный эксперимент практически полностью повторяет сценарий реального эксперимента, но (для сокращения времени расчета каждого из вариантов) время изменения импульсного магнитного поля выбиралось равным от 2 до 10 мкс. Амплитуда напряженности электрического СВЧ-поля варьировалась в интервале  $0,3 \text{ кВ/см} < E < 2,0 \text{ кВ/см}$ . Исходная плазма с плотностью  $n = (10^9 - 10^{10}) \text{ см}^{-3}$ , формируемая в зонах захвата в условиях ЭЦР, моделируется как нейтральная и однократно ионизированная низкотемпературная плазма ( $T_e \leq 20 \text{ эВ}$ ), температура ионов не превышает долей электронвольта. Как было показано ранее [8], увеличение темпа изменения магнитного поля в вычислительном эксперименте по сравнению с экспериментальными значениями в условиях существенного изменения плотности исходной плазмы не влияет на качественную картину эволюции протекаемых процессов и абсолютные значения расчетных величин.

### Результаты

Анализ зарегистрированных спектров тормозного излучения показал, что максимальная энергия электронов в генерируемых плазменных сгустках составляет  $\approx 300 \text{ кэВ}$ , что соответствует расчетным значениям для величин амплитуд импульсного реверсного магнитного поля, используемых в данных исследованиях.

В процессе проведения экспериментов на основе полученных кадровых изображений была исследована динамика формы сгустков по изменению интенсивности свечения в оптическом диапазоне, возникающего при взаимодействии плазменных сгустков с фоновым газом. Сопоставление осциллограмм рабочего цикла с кадрами ЭОП показали характер изменения формы и линейных размеров излучающих объектов в различных стадиях рабочего цикла. Типичные кадры ЭОП, соответствующие различным стадиям рабочего цикла, представлены на рис. 2 и иллюстрируют динамику изменения форм и интенсивностей свечения в различных фазах. Цвет и изменение его яркости отображают область локализации и интенсивности процессов, а именно, синий цвет — процессы ионизации и возбуждения при формировании исходной ЭЦР-плазмы, область плазменного сгустка в фазе ГА — оранжевый цвет на фоне удерживаемой плазмы, отображенной зеленым цветом. Представленные изображения плазмы соответствуют моменту достижения реверсным полем своего максимального значения — ЭЦР, а также ста-

дии ГА при формировании плазменного сгустка. Крайнее правое изображение — результат численного моделирования для стадии авторезонансного взаимодействия. Отмечено, что оптическое излучение в видимом диапазоне наблюдается и после окончания СВЧ-импульса, т. е. и в режиме удержания и накопления плазменных сгустков в минимуме магнитного поля ловушки. При этом интенсивность свечения убывает с характерным временем  $\approx 200$  мкс. Центральная область свечения в фазе ЭЦР более однородная, а в стадии ускорения излучение сосредоточено на периферии в виде компактной кольцевой священной зоны. Свечение и форма излучающего объекта, наблюдаемые в процессе ГА, совпадают с результатами, полученными на численной модели (рис. 2), где электроны обозначены красным, а ионы синим цветом в фиксированный момент времени. Анализ покадрового видеоизображения показал наличие вращательного движения регистрируемых изображений в направлении, совпадающем с вращательным движением сгустков в магнитном поле.

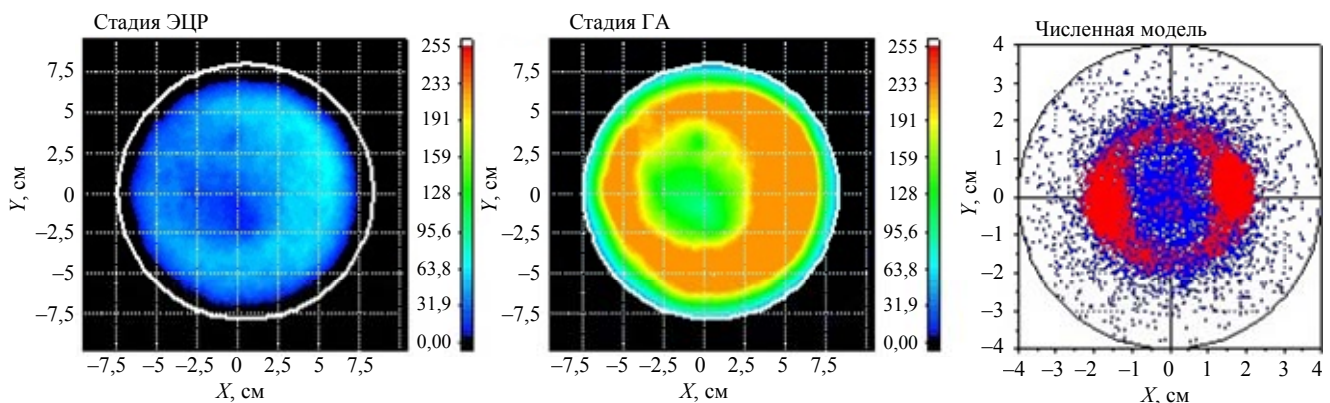


Рис. 2. Вид плазменных образований с торца резонатора, полученных экспериментально и на численной модели.

Полученные на численной модели результаты (см. рис. 2) свидетельствуют, что на этапе ГА образуются в противофазе два электронных сгустка, вращающихся в одном направлении. Средний радиус ларморовского вращения по окончании фазы ГА для средней энергии электронов 300 кэВ, локализованных в магнитном поле с индукцией 1200 Гс, составляет 1,5 см. В приосевой области находятся незахваченные электроны. Часть ионов образуют кольцевую структуру со средним радиусом, равным радиусу вращения электронных сгустков. Этот факт имеет и свое экспериментальное подтверждение, а именно, ЭОП-фотографирования в совокупности с рентгенографированием. Так, на рис. 2 (стадия ГА) наблюдается, что в объеме резонатора в области локализации релятивистских электронов сформирована четкая осесим-

метричная кольцевая структура с областью интенсивного свечения в оптическом диапазоне. Экспериментально наблюдаются существенные изменения формы, характерных линейных размеров и интенсивности излучения, которые, как показал анализ, связаны с особенностями их генерации. Отличие представленного на рис. 2 изображения по сравнению с результатами численных расчетов может быть объяснено принципом работы регистрирующей системы (накопительный кадровый режим в фиксированный момент времени) и длительностью экспозиции ЭОП-камеры (500 нс). Формируемый при ГА сгусток совершает свое вращение с частотой ускоряющего поля, т. е. один полный оборот совершается за время  $\approx 0.5$  нс. Таким образом, при указанном режиме работы системы регистрации и экспози-

ции будет происходить наложение изображений, которые могут быть получены при однокадровой съемке пространственного распределения сгустка для фиксированной фазы рабочего цикла. Данное отличие обусловлено несовершенством системы регистрации, но не противоречит общим представлениям о протекающих процессах и согласуется с результатами, полученными иными диагностическими средствами и на численной модели.

По окончании цикла ГА и полном восстановлении профиля магнитного поля, образованные в двух локальных зонах плазменные сгустки сбрасываются в область минимума магнитного поля стационарной ловушки, где накапливаются и удерживаются. Это согласуется с результатами рентгеновской спектрометрии с обзором, ограниченным малой областью взаимодействия, и рентгенографировании при погружении в рабочей объем плоской мишени-зонда по радиусу резонатора (материал мишени — Та, линейные размеры 8×5 мм) в сечении, отвечающему минимуму магнитного поля стационарной ловушки.

Рентгенограммы плазмы и плоской мишени в зависимости от глубины ее погружения пред-

ставлены на рис. 3 (яркость представлена в «градации серого» цвета), где помимо изображения мишени присутствуют два кольцевых образования: первое — большего диаметра — обусловлено излучением, возникающим при бомбардировке выпавшими из ускорения электронами стенок камеры, второе — меньшего диаметра — является следствием взаимодействием компактного релятивистского сгустка с мишенью и плазмообразующим газом. Это отчетливо видно на рис. 3, где присутствует область с более высокой контрастностью, что, скорее всего, связано с нагревом металла мишени и десорбцией газа с ее поверхности и последующим взаимодействием частиц металла и газа с электронным сгустком. Обработка рентгенограмм позволила определить, что радиус релятивистского электронного сгустка находится в интервале от 1,5 до 2,5 см, что совпадает с расчетным значением ларморовского радиуса электронов, а также значением, полученным исходя из максимального значения энергии, зарегистрированной в спектрах тормозного излучения, а также величины магнитного поля в минимуме ловушки.

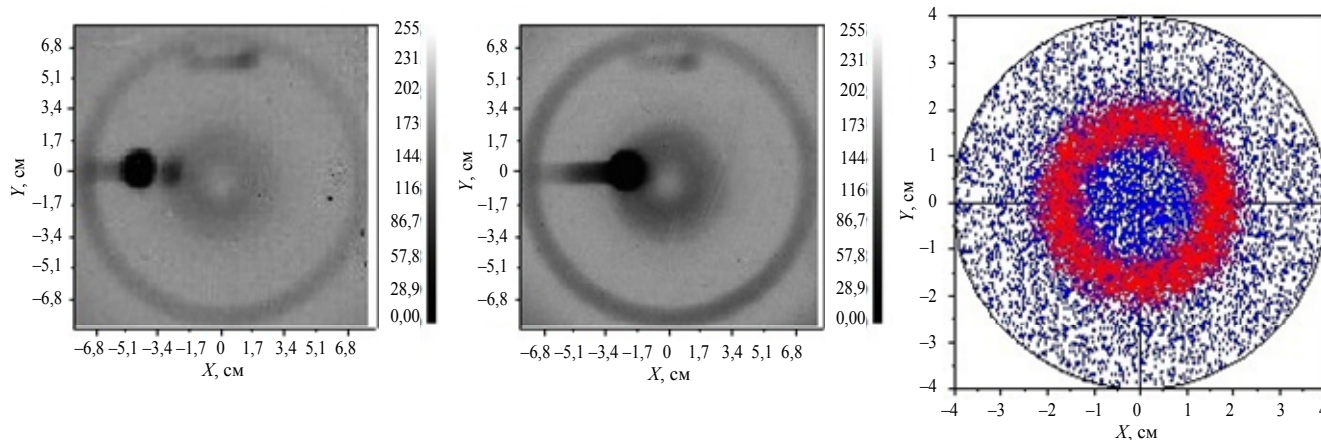


Рис. 3. Рентгенограммы XY-сечения и соответствующее пространственное распределение электронов и ионов после цикла накопления (правое изображение — моделирование).

Как показали измерения, интенсивность тормозного излучения зависит от ориентации мишени. Максимум интенсивности наблюдается при углах ориентации мишени, близких к 90° по отношению к направлению индукции магнитного поля, что говорит о направленном движении электронов в сгустке в виде кругового вращения относительно оси симметрии.

Экспериментальные результаты и численное моделирование показали, что накопленная в центральной части ловушки плазма (см. рис. 3) в результате однократного импульса ГА представляет собой цилиндрическую структуру с релятивист-

ской электронной компонентой (красный цвет на правом изображении). Ионы (синий цвет) частично рассеиваются (30—40 % от общего числа) под действием коллективных эффектов, сопровождающих сбрасывание плазмы в центральную область ловушки. Часть ионов удерживается электрическим полем захваченных электронов. Результаты вычислительного эксперимента показали, что за один цикл накопления возможно ускорение и удержание  $2 \times 10^9$  электронов со средней энергией порядка 300 кэВ. Возникающая компактная электрон-ионная структура является следствием авторезонансного ускорения электронов исход-

ной холодной плазмы и их последующего удержания в магнитном поле длинного пробкотрона.

### Заключение

Важно отметить, что полученные экспериментальные данные убедительно свидетельствуют о возможности реализации авторезонансного формирования, последующего накопления и удержания плазменных образований с высокоэнергичной электронной компонентой масштаба нескольких сотен кэВ в режиме реверсного магнитного поля в протяженной магнитной ловушке пробочного типа. Примененные электронно-оптические и рентгенографические диагностики в сочетании с другими методами исследований показали свою эффективность и позволили получить более детальную информацию о форм-факторах и динамических характеристиках генерируемых в условиях ГА плазменных сгустков с энергичной электронной компонентой.

Зарегистрированные различными диагностическими средствами и методами значения предельно достижимых энергий, изменение пространственных конфигураций генерируемых сгустков согласуются с теоретически ожидаемыми значениями. Дальнейшие эксперименты будут направ-

лены на детальное изучение формирования плазменных образований, получаемых при авторезонансном взаимодействии с плазмой, формируемой внешним инжектором, и последующего их накопления и удержания.

*Работа частично поддержана грантом РФФИ № 16-02-00640\16.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Закатов Л. П., Иванов А. А., Плахов А. Г., Шанкин В. В.* // Письма в ЖЭТФ. 1972. Т. 15. № 1. С. 16.
2. *Alexeff I., Harris J. G., and Murphy C.* // Phys. Rev. Lett. 1974. Vol. 32. No. 19. P. 1035.
3. *Иванов А. А.* Физика сильнонеравновесной плазмы. — М., Атомиздат, 1977.
4. *Андреев В. В., Новицкий А. А., Умнов А. М., Чупров Д. В.* // ПТЭ. 2012. № 3. С. 5.
5. *Андреев В. В., Новицкий А. А., Умнов А. М.* / Тезисы докладов XLI Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (Звенигород, 2014).
6. *Лудиков В. В., Подвизников В. А., Чевокин В. К.* // ПТЭ. 2008. № 6. С. 138.
7. *Birdsall C. K., Langdon A. B.* // Plasma Physics via Computer Simulation. 1995. P. 305.
8. *Andreev V. V. and Umnov A. M.* // Phys. Scripta 1991. Vol. 43. No. 5. P. 490.

## Photochronological, radiographic, and modeling studies of dynamics of the development of relativistic plasma formations in the length mirror cells

*V. V. Andreev, A. A. Novitsky, M. A. Korneeva, and A. M. Umnov*

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

*Received March 14, 2016*

*The work presents experimental results showing the feasibility of autoresonance acceleration in the reverse magnetic field in an extended trapped in the mirror type. It has been shown that electron bunches are formed as a result of the gyromagnetic autoresonance. They have an average energy of several hundred keV and trapped for a long time in the mirror. The results obtained by a computer simulation of the GA reverse mode agree completely with the experimental data.*

PACS: 52.50.Sw

*Keywords:* gyromagnetic autoresonance, trapping efficiency, magnetic trap, acceleration, computer simulation.

**REFERENCES**

1. L. P. Zakatov, A. A. Ivanov, A. G. Plakhov, and V. V. Shapkin, *Sov. ZhETP Lett.* **15**, 16 (1972).
2. I. Alexeff, J. G. Harris, and C. Murphy, *Phys. Rev. Lett.* **32**, 1035 (1974).
3. A. A. Ivanov, *The Physics of Strongly Nonequilibrium Plasma*. (Atomizdat, Moscow, 1977) [in Russian].
4. V. V. Andreev, A. A. Novitsky, A. M. Umnov, and D. V. Chuprov, *Instrum. Exp. Tech.*, No. 3, 5 (2012).
5. V. V. Andreev, A. A. Novitsky, and A. M. Umnov, in *Proc. XLI International (Zvenigorod) Conference on Plasma Physics and Controlled Thermonuclear Fusion* (Zvenigorod, Russia, 2014).
6. V. V. Ludikov, V. A. Podvyaznikov, and V. K. Chevokin, *Instrum. Exp. Tech.*, No. 6, 138 (2008).
7. C. K. Birdsall and A. B. Langdon, *Plasma Physics via Computer Simulation* 305 (1995).
8. V. V. Andreev and A. M. Umnov, *Phys. Scripta* **43**, 490 (1991).