

РГБ УН

28 НОЯ 1994

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ РОССИЙСКОГО ФЕДЕРАЛИИ  
ПО ВЫСШЕМУ ОБРАЗОВАНИЮ

ОРДЕНА ДРУЗЬЕ НАРОДОВ  
РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ДРУЗЬЕ НАРОДОВ

*На правах рукописи*

УМНОВ Анатолий Михайлович

УДК 621.039.64

УСКОРЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ ПЛАЗМЫ В УСЛОВИЯХ  
СИНХРОТРОННОГО ГИРСМАГНИТНОГО АВТОРЕЗОНАНСА

(01.04.03 - радиофизика)

А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва-1994

Работа выполнена на кафедре экспериментальной физики  
Российского Университета дружбы народов.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор  
К.С.Головановский.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук Н.Е.Андреев,  
кандидат физико-математических наук А.С.Сахаров.

Ведущая организация:

Институт химической физики, Российский научный центр  
"Курчатовский институт", г.Москва.

Защита диссертации состоится "20" декабря 1994г. в 15 час 30 мин  
на заседании диссертационного совета К 053.22.01  
в Российском университете дружбы народов по адресу:  
117198, г.Москва, ул. Орджоникидзе, 3, зал И1.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке  
Российского университета дружбы народов по адресу:  
117198, г.Москва, ул. Мяслово-Маклая, 6.

Автореферат разослан "15" ноября 1994 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук,  
доцент

В.И.Запарованный

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Изучение резонансного взаимодействия электромагнитных волн с заряженными частицами представляет интерес как с точки зрения фундаментальных исследований, так и для решения ряда прикладных задач. Объектами исследований являются высокотемпературная плазма, а также пучки и ступки релятивистских частиц, обладающие свойствами, которые позволяют использовать их как источники частиц и электромагнитного излучения. Изучение свойств и поведения таких объектов является актуальным для физики управляемого термоядерного синтеза, для создания современных генераторов электромагнитного излучения, источников многозарядных ионов, а также для разработки новых подходов к коллективному ускорению заряженных частиц.

Изучение взаимодействия электромагнитных волн с электронами в условиях электронного циклотронного резонанса (ЭЦР) тесно связано с проблемами генерации, нагрева плазмы и ее удержания. Существуют различные способы создания и нагрева плазмы в условиях ЭЦР, нацеленные на повышение температуры плазмы. Тем не менее, уровень достижимой электронной температуры ограничен пределом, зависящим от амплитуды сверхвысокочастотного (СВЧ) поля, взаимодействующего с плазмой.

В начале 80-х годов теоретически, а затем экспериментально была показана возможность авторезонансного ускорения электронов в условиях ЭЦР в нарастающем во времени магнитном поле - синхротронный гиромагнитный авторезонанс (СГА). В случае СГА средняя энергия электронов плазмы определяется величиной магнитного поля, а предельно достижимая энергия ограничена лишь радиационными потерями.

Надежность реализации СГА в эксперименте позволяет планировать разработку и внедрение приборов, создаваемых на его основе: генераторов частиц и излучений. Теория СГА достаточно хорошо развита, однако она ограничена лишь одночастичным приближением и не учитывает условий эксперимента. Сложность проблемы заключается в необходимости учета целого ряда факторов, действующих одновременно, к которым можно отнести влияние на процесс СГА коллективных эффектов, а также прост-

ранственной структуры электромагнитной волны и конфигурации магнитного поля. Решению этих задач аналитически, а также с помощью численных методов и посвящена данная работа.

#### Цель работы

1. Изучение зависимости захвата электронов разреженной плазмы в режим синхротронного гиромагнитного авторезонанса от начальных условий.

2. Исследование влияния вихревого электрического поля на процесс синхротронного гиромагнитного авторезонанса.

3. Исследование условий аксиальной устойчивости движения электронов при СГА в магнитном поле пробочной конфигурации и электромагнитном поле с модой  $TE_{111}$ .

4. Изучение влияния коллективных эффектов на захват электронов и создание плазмы с релятивистской электронной компонентой на численной модели, построенной по методу частиц.

5. Обоснование возможности практических приложений СГА.

Научная новизна и практическая ценность полученных в диссертационной работе результатов заключается в следующем:

1. Впервые проведено исследование процесса захвата электронов плазмы в режим синхротронного гиромагнитного авторезонанса, учитываяе влияние коллективных эффектов.

2. Проведен учет влияния на захват в режим СГА конечной величины начальных импульсов электронов. Показана возможность существования интервала начальных фаз электронов, в котором захват невозможен (фазовая щель).

3. Получено условие захвата в режим СГА, учитывающее расстройку стартового магнитного поля.

4. Проведен анализ влияния вихревого электрического поля на фазовую устойчивость и захват электронов.

5. Проведено исследование аксиальной устойчивости движения электронов в высокочастотном поле с модой  $TE_{111}$  и магнитном поле пробочной конфигурации в условиях СГА.

6. Проведен анализ эффективности захвата в зависимости от параметров исходной плазмы и параметров СГА.

7. Определены параметры исходной плазмы, которые являются оптимальными для создания ступиков релятивистских

электронов и плазмы с релятивистской электронной компонентой.

8. Исследована зависимость энергетического спектра захваченных электронов от параметров СГА. Получено выражение, определяющее максимально возможную ширину энергетического спектра захваченных электронов.

9. Обоснована возможность некоторых практических приложений СГА.

#### Основные результаты работы докладывались:

на III Всесоюзной школе-конференции по современным методам удержания, нагрева и диагностики плазмы (Харьков, 1982 г.); на научной сессии отделения ядерной физики АН СССР по физике высоких энергий (ИТЭФ Москва, 1982 г.); на VI Всесоюзной конференции по взаимодействию электромагнитного излучения с плазмой (Ташкент, 1985 г.); на научных семинарах кафедры физической электроники МГУ (1985 г., 1988 г.), Института физики АН Гр.ССР (Тбилиси, 1986 г.), Института общей физики РАН (1987 г.), НИИЯФ МГУ (1989 г.), Российского научного центра "Курчатовский институт" (1994 г.); на семинаре по проекту коллективного ускорителя многозарядных ионов ECRIPAC (Франция, Ганиль, 1991 г.); на международной конференции Second Int. Workshop on Strong Microwaves in Plasmas (Nizhni Novgorod, 1993); на ежегодных конференциях по физике высокотемпературной плазмы (Звенигород, 1982-1992 г.г.); на Int. Workshop on Microwave Plasma and its Applications (Zvenigorod, 1994).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 12 печатных работ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем работы 118 страниц, рисунков - 25, библиография насчитывает 101 наименование.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулирована цель диссертационной работы и, приведены поло-

жения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен краткий обзор литературы, посвященной нагреву плазмы в условиях ЭЦР и при адиабатической компрессии, а также обзор работ по синхротронному гиромагнитному авторезонансу. Проанализированы закономерности получения релятивистской плазмы. Отмечены следующие основные способы повышения температуры плазмы: а) повышение СВЧ мощности, вводимой в плазму; б) варьирование отношения  $\omega_0/\omega$  ( $\omega_0$  - ларморовская частота электрона,  $\omega$  - частота СВЧ поля). Однако, в этих случаях средняя энергия, достигаемая электронами, ограничена вследствие релятивистской расстройки резонанса. Еще одним способом получения релятивистской плазмы является ее адиабатическая компрессия. В ряде работ отмечена возможность авторезонансного ускорения электронов за счет неоднородности магнитного поля или амплитуды СВЧ поля.

Синхротронный гиромагнитный авторезонанс исследован в теоретических работах в основном в одночастичном приближении для нулевых начальных условий. В этих работах показано, что средняя энергия электронов растет по закону нарастания магнитного поля во времени -  $W(t) \sim b(t)$ , где  $W(t)$  - кинетическая энергия электрона в единицах энергии покоя,  $b(t)$  - функция, определяющая изменение магнитного поля во времени.

Посредством анализа уравнений СГА получено условие захвата (под захватом подразумеваются фазовые колебания электрона в интервале, обеспечивающем рост энергии электрона в соответствии с ростом магнитного поля), связывающее темп нарастания магнитного поля во времени и напряженность СВЧ поля для начальных нулевых условий. В ультрарелятивистском приближении уравнений СГА получено выражение для асимптотической фазы электрона. Показана возможность использования СГА в режиме фотонной фабрики.

Экспериментально СГА был продемонстрирован на плазменном синхротроне Жирак-О. Получены следующие параметры: средняя энергия электронов  $W \approx 400$  кэВ, плотность плазмы -  $n_e \approx 0.6 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ , время жизни  $\tau_1 \approx 40$  мс. Режим накопления релятивистской плазмы был осуществлен на плазменном синхротроне Жирак-Д. Параметры накапливаемой плазмы:  $W \approx 200$  кэВ,  $n_e \approx 0.5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ ,  $\tau_1 \approx 80$  мс.

Во второй главе посредством анализа уравнений СГА и с помощью численных расчетов исследованы условия захвата электронов в режим синхротронного гиромагнитного авторезонанса в зависимости от начальных условий. Рассматривается СГА для ансамбля невзаимодействующих частиц, что соответствует случаю разреженной плазмы.

Рассмотрено влияние на захват конечных начальных импульсов электронов. Показано, что условия захвата зависят от начальных фаз электронов. Это приводит к возникновению интервала начальных фаз, в котором захват отсутствует (фазовая щель). Ширина фазовой щели, а также величина начальной энергии электронов, при которой возникает фазовая щель, зависят от темпа нарастания магнитного поля и напряженности высокочастотного поля.

Исследовано влияние на захват расстройки магнитного поля относительно резонансного значения магнитного поля  $B_0 = m_0 c \omega / e$ , где  $m_0$  и  $e$  - соответственно, масса покоя и заряд электрона,  $c$  - скорость света в вакууме,  $\omega$  - частота СВЧ поля. Получены: максимальная величина расстройки магнитного поля, при которой возможен СГА, а также условие, накладывающее ограничение на темп нарастания магнитного поля во времени, в зависимости от напряженности СВЧ поля и величины относительной расстройки магнитного поля

$$db/dt < 1.19 g_0^{4/3} \left[ 1 - \frac{b_0}{1.89 g_0^{2/3}} \right],$$

где  $db/dt$  - темп нарастания магнитного поля,  $g_0 = eE/m_0 c \omega$  - безразмерная амплитуда СВЧ поля,  $b_0 = B(0)/B_0 - 1$  - относительная расстройка магнитного поля в момент старта СГА.

Рассмотрено влияние вихревого электрического поля (бетатронный эффект) на фазовую динамику и захват электронов. Показано, что его роль сводится к улучшению фазовой устойчивости СГА, что влечет за собой увеличение уровня предельной энергии электрона, достижимой при СГА. Влияние бетатронного эффекта на захват несущественно, поскольку его вклад в энергию частиц на начальной стадии СГА незначителен.

Изучены условия захвата и аксиальная устойчивость движения электронов в СВЧ поле с модой  $TE_{111}$  и магнитном поле

пробочной конфигурации, то есть в условиях, близких к экспериментальным. Анализ уравнений движения электрона показал, что в случае линейно поляризованного СВЧ поля при взаимодействии электронов с магнитной составляющей СВЧ поля электроны могут приобретать аксиальный импульс, который всегда направлен к торцам резонатора. В результате такого взаимодействия часть электронов выпадает на стенки резонатора, снижается эффективность захвата — отношения числа электронов, захваченных в режим СГА, к полному числу электронов. Этот эффект зависит от амплитуды СВЧ поля и наиболее выражен в стартовой стадии СГА. Подавление этого эффекта возможно за счет создания магнитного поля с высоким пробочным отношением. При СГА в правополяризованном поле эффект отсутствует.

Проведено численное решение уравнений движения электронов в условиях СГА в магнитном поле пробочной конфигурации, создаваемом осесимметричными катушками, и СВЧ поле с модой  $TE_{111}$ . Показано, что в случае аксиальной инжекции электронов в магнитную ловушку их движение может быть неустойчивым. Такая неустойчивость возникает в результате резонансной связи между фазовыми и продольными колебаниями электрона в магнитной ловушке. Поскольку частоты фазовых и продольных колебаний в случае СГА зависят от времени, их связь носит сложный характер. Для заданных напряженности СВЧ поля и пробочного отношения магнитного поля существуют интервалы энергий инжекции, при которых движение электрона устойчиво.

Третья глава посвящена исследованию захвата в режим СГА и ускорению электронов плазмы конечной плотности на математической модели. Модель построена по методу частиц и учитывает кулоновские взаимодействия. Решение уравнения Пуассона проводится методом циклической редукции с быстрым преобразованием Фурье. В начальный момент задается однородное пространственное распределение электронов и ионов в круге. Электроны могут иметь максвелловское или моноэнергетичное распределение по энергиям. Направления их импульсов задаются с помощью датчика случайных чисел. Ионы в момент старта СГА считаются неподвижными. Моделируемая плазма в начальный момент однородна и нейтральна. Уравнения движения частиц решаются методом "с перешагиванием" с использованием алгоритма



Бунемана, обобщенного на релятивистский случай.

Анализ синхротронного гиромагнитного авторезонанса на численной модели проводился при варьировании параметров исходной плазмы и параметров СГА (напряженности СВЧ поля и темпа нарастания магнитного поля). Проведенные расчеты показали, что основным фактором, влияющим на динамику частиц плазмы, является возникающее в процессе СГА собственное электрическое поле плазмы, величина которого может значительно превышать напряженность СВЧ поля. Воздействие собственного поля плазмы на СГА двояко. С одной стороны, оно приводит к снижению эффективного значения ускоряющего СВЧ поля, с другой — его воздействие эквивалентно появлению дополнительного внешнего магнитного поля. Оба этих фактора приводят к ухудшению условий захвата.

Изучена зависимость эффективности захвата от плотности исходной плазмы, ее начальных размеров и массы ионов. Вводится критерий разреженности плазмы в условиях СГА —  $\eta < 1$ , где  $\eta = E_1/E$ , отношение кулоновского поля ионной компоненты плазмы к напряженности СВЧ поля. При  $\eta \geq 1$  плазма считается плотной. Показано, что при высоком темпе нарастания магнитного поля во времени эффективность захвата снижается с повышением плотности исходной плазмы, причем существует предельное значение плотности, выше которого СГА невозможен.

Варьирование параметра  $\eta$  и отношения  $r_0/r_L$  ( $r_0$  — радиус исходной плазмы,  $r_L = c/\omega$ ) показало, что в результате СГА возможно получение как сгустка релятивистских электронов, так и плазмы с релятивистской электронной компонентой. В первом случае плотность исходной плазмы должна быть невысокой ( $\eta < 1$ ), а  $r_0/r_L < 0.5$ . При таких параметрах происходит практически полное разделение электронной и ионной компонент плазмы. Ионная компонента изотропно разлетается в радиальном направлении под воздействием собственного нескомпенсированного электрического поля, лишь небольшая часть ионов удерживается полем ускоренного электронного сгустка.

В случае  $\eta \geq 3$  плазма всегда остается нейтральной, причем повышение ее плотности приводит к увеличению ее размеров в процессе СГА, к выпадению части частиц на стенки

резонатора, в также к снижению эффективности захвата.

Расчеты, проведенные для различных отношений масс ионов и электронов  $m_1/m_e$ , показали, что в случае плазмы с  $\eta < 1$  варьирование  $m_1/m_e$  не влияет на процесс СГА. В случае плотной плазмы необходим учет массы ионов: для плазмы с ионами тяжелых элементов захват менее эффективен.

Изучено влияние параметров исходной плазмы на энергетический спектр захваченных электронов. Энергетическое распределение захваченных электронов имеет вид близкий к распределению Гаусса и формируется к окончанию процесса захвата. Ширина энергетического спектра зависит от параметров СГА и плотности исходной плазмы. При фиксированных параметрах СГА энергетический спектр уширяется с увеличением начальной плотности плазмы. С помощью решения уравнений СГА в ультрарелятивистском приближении при линейной аппроксимации изменения энергии электрона, получено выражение, позволяющее оценить максимально возможную при СГА ширину энергетического спектра:

$$\Delta W_{\max}^* (\text{кэВ}) \approx 64 \left[ \varepsilon_{\text{с}}^* (\text{кэВ}) \varepsilon_0 \right]^{1/2},$$

где  $\Delta W_{\max}^*$  и  $\varepsilon_{\text{с}}^*$  - максимальная ширина энергетического спектра захваченных электронов и средняя полная энергия электронов, измеряемая в кэВ.

Четвертая глава посвящена возможным приложениям синхротронного гиромагнитного авторезонанса. Получено выражение, позволяющее оценить плотность плазмы, при которой для заданных значений напряженности, частоты высокочастотного поля и начального поперечного размера плазмы условия для захвата и ускорения ступки релятивистских электронов оптимальны:

$$n_{\text{OC}} (\text{см}^{-3}) \approx 0.23 \cdot 10^9 E (\text{кВ/см}) f (\text{ГГц}) r_{\text{L}} / r_0.$$

В случае создания релятивистской плазмы максимальная величина ее плотности в 2+4 раза больше приведенной выше оценки.

Проведен анализ возможности использования плазмы, получаемой в результате СГА, как источника многозарядных ионов. Основными процессами, протекающими в источнике многозарядных ионов, являются ступенчатая ионизация, Оже-процесс и перезарядка ионов на нейтральных атомах. Решение уравнений

баланса, представленных в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений, учитывающих эти процессы, проводилось для различных условий по методу Рунге-Кутты четвертого порядка. В качестве фонового газа был выбран аргон. Рассматривались следующие возможности генерации многозарядных ионов:

а) непосредственно на фоновом газе; б) в случае импульсной инжекции в СГА-плазму нейтралов или пучка ионов с целью повышения его зарядового состояния.

Рассчитывалось зарядовое состояние ионов, генерируемых в СГА плазме для различных параметров плазмы. Расчеты показали, что в плазменном синхротроне накопителе ЖИРАК-Д, при параметрах накапливаемой плазмы  $W \approx 200$  кэВ,  $n_0 \approx 5 \cdot 10^9$  см<sup>-3</sup> и давлении рабочего газа  $p \approx 1 \cdot 10^{-5}$  в основном парабатываются ионы с  $Z=+1$  и  $Z=+2$ . Для получения ионов с более высоким  $Z$  необходимо повышение плотности накапливаемой плазмы, что достигается путем увеличения напряженности электрического СВЧ поля и (или) переходе к более высоким частотам СВЧ генератора, а также улучшением вакуумных условий.

Плазма, получаемая в результате СГА в условиях высокого вакуума, может служить средой для генерации ионов в случае импульсного напуска нейтрального газа в камеру. В этом случае зарядовое состояние ионов зависит от длительности импульса и его интенсивности. Так, например, при импульсной инжекции нейтрального газа в СГА-плазму с параметрами  $W \approx 500$  кэВ,  $n_0 \approx 2 \cdot 10^{11}$  см<sup>-3</sup>, длительности импульса 5 мс и интенсивности  $\Gamma_0 \approx 1 \cdot 10^{13}$  с<sup>-1</sup> см<sup>-3</sup>, концентрация ионов с  $Z = +5$  составляет  $n_{z=5} \approx 1 \cdot 10^{10}$  см<sup>-3</sup>.

СГА-плазма может также служить средой для дополнительной обдири инжектируемого в нее потока ионов. Например, концентрация ядер аргона при инжекции в плазму пучка ионов с  $Z=+12$  достигает  $n_{z=12} \approx 1 \cdot 10^6$  см<sup>-3</sup> или  $0.8 \cdot 10^5$  ядер за импульс.

Проведенный анализ показывает, что для улучшения зарядового состояния ионов в СГА-плазме, накапливаемой в плазменном синхротроне Жирак-Д, необходимо: а) осуществление внешней инжекции электронов; б) улучшение вакуумных условий; в) внешний импульсный напуск нейтрального газа.

Естественными приложениями синхротронного гиромангнитно-

го авторезонанса ввиду возможности ускорения электронов до энергий в десятки МэВ могут быть генерация синхротронного и тормозного излучений. В работе ставится цель: определить такие параметры процесса СГА, при которых конверсия энергии электронов в энергию тормозного излучения была бы наиболее эффективной; решается задача оптимизации процесса вывода электронного сгустка на мишень.

Проведенные расчеты показали, что при напряженности СВЧ поля  $E \approx 2.6$  кВ/см и создании оптимальных условий для захвата возможно получение компактного электронного сгустка с общим числом частиц  $N_e \approx 1 \cdot 10^{10}$  и средней энергией 1 МэВ. Проанализирована возможность управления движением сгустка релятивистских электронов. Рассмотрены различные способы вывода сгустка на мишень.

Показано, что в случае радиального вывода за счет спада магнитного поля во времени время высадки электронов на мишень, полученное на математической модели, почти на порядок превышает величину, полученную с помощью аналитической оценки. Это происходит вследствие того, что электроны по окончании СГА имеют радиальные составляющие скоростей, разброс по которым приводит к существенному увеличению времени высадки на мишень. Таким образом, радиальный вывод электронов за счет лишь спада магнитного поля во времени не является перспективным.

Изучены условия аксиального вывода электронных сгустков на мишень, расположенную на торце резонатора, за счет создания аксиального градиента магнитного поля. Показано, что возможно создание таких конфигураций магнитного поля, при которых высадка сгустка на мишень производится за время одного-двух циклотронных оборотов. В этом случае мощность тормозного излучения при коэффициенте конверсии кинетической энергии частиц в энергию тормозного излучения  $k=0.05$  составляет  $5 \cdot 10^{17}$  МэВ/с или 80 киловатт в импульсе.

В заключении представлены основные выводы, следующие из материалов диссертационной работы:

Аналитически и численными методами исследованы условия захвата и ускорения электронов плазмы для различных начальных условий.

Показана возможность существования интервала начальных фаз электронов, в котором захват отсутствует (фазовая щель). Получено условие захвата при расстройке стартового значения магнитного поля, накладывающее ограничение на темп нарастания магнитного поля во времени, в зависимости от напряженности СВЧ поля.

Исследовано влияние бетатронного эффекта на захват и фазовую устойчивость СГА. Показано, что влияние бетатронного эффекта заключается в улучшении фазовой устойчивости и расширении диапазона энергий, достижимых при СГА.

Показана возможность возникновения аксиальной неустойчивости СГА в электромагнитном поле с модой  $TE_{111}$  и магнитном поле пробочной конфигурации вследствие взаимодействия электронов с радиальной составляющей магнитной компоненты высокочастотного поля и резонанса между фазовыми и продольными колебаниями электрона.

С помощью численной модели, построенной на основе метода частиц, исследовано влияние коллективных эффектов на захват электронов плазмы конечной плотности. Показано, что эффективность захвата и параметры плазмы, возникающей в результате СГА, зависят от начальной плотности плазмы, ее размеров и массы ионов, а также напряженности электрического СВЧ поля и темпа нарастания магнитного поля.

Исследован энергетический спектр захваченных электронов, изучена его зависимость от параметров исходной плазмы и параметров СГА. Получена оценка максимально возможной ширины энергетического спектра электронов в условиях СГА.

Проведены расчеты, обосновывающие возможность использования синхротронного гиромагнитного авторезонанса для генерации многозарядных ионов, а также управления движением создаваемых ступков релятивистских электронов с целью генерации импульсного тормозного излучения.

Основные результаты диссертации изложены в 12 работах.

1. Умнов А.М. Авторезонансное ускорение электронов при ЭПР в нарастающем во времени магнитном поле // В сб. Материалы III Всесоюзной школы-конференции. Современные методы магнитного удержания и нагрева плазмы. Харьков. -1982. -ч.2. -С.42-45.
2. Умнов А.М. Динамика плазмы при синхротронном гиромагнитном

авторезонансе // IV Всесоюзная конференция "Взаимодействие электромагнитных излучений с плазмой", Тезисы докладов, Ташкент, 8-10 окт. -1985 г. -С.183-184.

3. Андреев В.В., Головановский К.С., Умнов А.М. Об эффекте гиромагнитного авторезонанса и нагреве на его основе плазмы до релятивистских температур // Новости термоядерных исследований. -1986. -Вып.3(41). -С.9-10.

4. Туриков В.А., Умнов А.М. Влияние кулоновского поля на захват пучка электронов в режим гиромагнитного авторезонанса // ЖТФ. -1986. -Т.56. -Вып. 4. -С.762-765.

5. Andreev V.V., Golovanivsky K.S., Colunga S. and Umnov A.M. Parameters of a plasma produced at gyromagnetic autoresonance in plasma synchrotron Gyrao-0 // Proc. VII Intern. conf. on plasma, Kiev, USSR. -1987. -V.2. -P.228-230.

6. Андреев В.В., Умнов А.М., Апраксин А.А. Накопление релятивистской плазмы в плазменном синхротроне Жирак-Д-С // VI Всес.конф. Взаимодействие электромагнитных излучений с плазмой, Душанбе. -1991. -С.49.

7. Umnov A.M. Simulation of plasma under synchrotron gyromagnetic autoresonance // Contributing Papers of the ICRIG XX, Pisa, Italy. -1991. -P.1293-1294.

8. Андреев В.В., Умнов А.М. Релятивистская плазма, создаваемая при гиромагнитном авторезонансе в плазменном синхротроне ЖИРАК-Д // Материалы XI Всесоюзного семинара "Интенсивные источники ионов и ионных пучков", Киев. -1991. -С.27.

9. Andreev V.V. and Umnov A.M. Experiments with relativistic plasma produced by a microwave discharge in a time-dependent magnetic field // Physica Scripta. -1991. -V.43. -P.490-494.

10. Dougar-Jabon V.D. and Umnov A.M. Project of an ECR source with a stripping stage // Rev. Sci. Instrum. -1992. -V.63(4). -P.2869-2871.

11. Andreev V.V., Apraksin A.A. and Umnov A.M. Gyrao-D-0 relativistic plasma accumulator and ion accelerator // Rev. Sci. Instr. -1992. -V.63(4). -P.2907-2909.

12. Andreev V.V. and Umnov A.M. Plasma Synchrotrons Gyrao: relativistic plasma generators, plasma accumulators and sources of radiation // Second Int. Workshop on Strong Microwaves in Plasmas, Nizhni Novgorod. -1993. -P.D28.

Umov Anatoli Michhilovich

Acceleration of plasma electrons under synchrotron  
gyromagnetic autoresonance

Results of investigation of synchrotron gyromagnetic autoresonance (SGA) in a plasma analytically and by means of numerical simulation are presented.

The influence of initial plasma parameters and parameters of SGA on trapment and acceleration of plasma electrons in SGA-regime has been studied. It is shown the possibility of obtaining under SGA both relativistic plasma and controlled relativistic electron bunches with parameters which may be varied in wide intervals.

It is found necessary conditions depending on initial plasma parameters for trapment and acceleration of plasma electrons. It is shown the possibility of a multicharged ion source as well as X-ray source to be created with the use of SGA.

4. II. 94 г.      Объем 0,75 п. л.      Тир. 100      Зак. 460

Тел. ЕУДН, Орджоникидзе, 3