УДК 533.951

Особенности ионно-циклотронного резонансного нагрева плазменного потока электродно-емкостной и соленоидальной антеннами

В. И. Волосов, В. В. Деменев, А. Г. Стешов, И. Н. Чуркин
Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Ионно-циклотронный резонансный (ИЦР) нагрев, используемый для плазменного разделения изотопов тяжелых элементов (A ~120—200 а. е.), осуществляется электрическими ВЧ-полями с частотой, соответствующей частоте целевых ионов в однородном ($\Delta B/B \sim 5 \cdot 10^{-3}$) магнитном поле. Рассмотрены особенности ИЦР-нагрева "узкого" плазменного потока соленоидальной и емкостной антеннами. Численно моделируется процесс ИЦР-нагрева в "узком" плазменном потоке в одночастичном приближении. Обсуждаются проблемы сепарации ионов для рассматриваемых антенн.

Большой интерес вызывает метод разделения изотопов с помощью селективного ИЦР-нагрева плазмы [1—3]. Основное преимущество этого метода перед электромагнитным в том, что в плазме отсутствуют эффекты, связанные с объемным зарядом ионов [2]. ИЦР-метод наиболее эффективен для разделения изотопов элементов, не образующих газовой фазы, т. е. для элементов, которые невозможно разделить газодиффузионными методами [2, 3].

Проектируемая установка для плазменного разделения методом ИЦР-нагрева состоит из источника плазмы, системы высокочастотного (ВЧ) нагрева и сбора целевого изотопа. Сформированный источником плазменный поток проходит через систему ВЧ-нагрева, где осуществляется селективный ИЦР-нагрев целевого изотопа. Нагретые ионы собираются на сборники, конструкции которых зависят от типа антенны и принципа сепарации [4].

В данной работе рассматриваются особенности ИЦР-нагрева ионов электродно-емкостной и соленоидальной антеннами на первой гармонике циклотронной частоты в одночастичном приближении. Две антенны сравниваются по селективности ИЦР-нагрева в "узком" плазменном потоке, в поперечный размер R которого вписываются три-четыре ларморовских диаметра ρ ионов. Рассмотрим проблемы сепарации ионов для рассматриваемых антенн.

Поскольку рассматриваемые антенны возбуждают электрические поля, не имеющие продольной компоненты [5], то собственные колебания плазмы при этом не возбуждаются. Это позволяет устранить принципиальные трудности, возникшие при использовании антенн, возбуждающих колебания с периодической структурой в направлении магнитного поля [5].

Электродно-емкостная антенна

Известно, что равномерное электрическое поле емкостной антенны трудно ввести в плазму из-за его экранировки плазмой [2, 5, 6]. Один из

© Волосов В. И., Деменев В. В., Стешов А. Г., Чуркин И. Н., 2003

способов их ввода в плазму осуществляется за счет высокой продольной электронной проводимости с помощью торцевых электродов, как в известных системах [7, 8]. В такой электродно-емкостной антенне (рис. 1) внешние пластины 3 совместно с торцевыми электродами 4 формируют электрическое поле

$$E(t) = E_0 \cos(2\pi f_{hf} t + \varphi),$$

где f_{hf} — частота ВЧ-поля; φ — сдвиг фазы электрического поля относительно вращения иона по ларморовской орбите на входе в антенну; E_0 — амплитуда электрического ВЧ-поля.

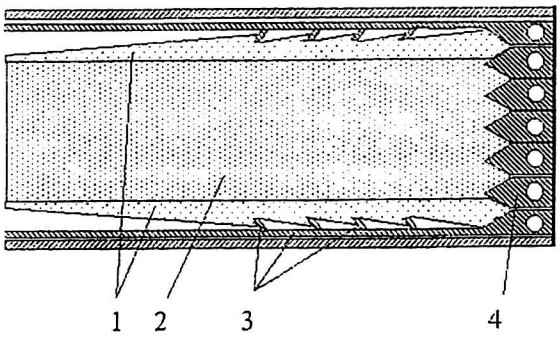


Рис. 1. Электродно-емкостная антенна:
1 — резонансные ионы; 2 — плазменный поток; 3 — внешние пластины антенны со сборниками; 4 — торцевые электроды

В электродно-емкостной антенне совмещены функции нагрева и сбора ионов. На внешних пластинах антенны установлены сборники резонансных ионов 1, выходящих за поперечные размеры плазменного потока 2. Сбор ионов целевого изотопа осуществляется по принципу "прямого" сбора, т. е. по мере нагрева резонансные ионы попадают на сборники.

Численное моделирование процессов ИЦР-нагрева и сбора в такой антенне проводилось в одночастичном приближении. Изменение ларморовского радиуса (поперечной энергии) при ИЦР-нагреве для резонансного (^{157}Gd) и нерезонансного (^{158}Gd) ионов в зависимости от начальной фазы φ показаны на рис. 2, *а*, *б* при аксиальном магнитном поле B = 1 Т и оптимальных параметрах плазменного потока (равномерное поперечное распределение плотности плазмы, начальная поперечная энергия $< W_{\perp 0} >$ = 35 эВ, оптимальная продольная скорость $V = 1{,}5 \cdot 10^5$ см/с выбраны из условия селективности ИЦР-нагрева — ион делает $N = A$ оборотов, где A — массовое число иона), параметрах ВЧ-антенны (длина L = 2,5 м, напряженность электрического поля E_0 = 60 В/м).

Для рассматриваемых параметров и расстояния между внешними пластинами антенны (сборниками резонансных ионов) h = 82 мм получены оценки по "прямому" сбору ионов: эффективность сбора $Q \sim 1$ и степень разделения q = 10 при E_0 = 94 В/м и $Q \sim 0{,}86$ и $q \sim \infty$ при E_0 = 40 В/м, где $Q = \dfrac{N_{out}}{N_{in}}$ — эффективность сбора, определяемая отношением числа резонансных частиц, попавших на сборники N_{out}, к числу входящих в область ИЦР-нагрева резонансных частиц N_{in};

$q = \dfrac{C(1 - C_0)}{C_0(1 - C)}$ — степень разделения, характеризующаяся способностью системы выделять искомый изотоп;

C_0 — начальная концентрация резонансных ионов на входе в область ВЧ-нагрева;

C — концентрация резонансных ионов на сборнике.

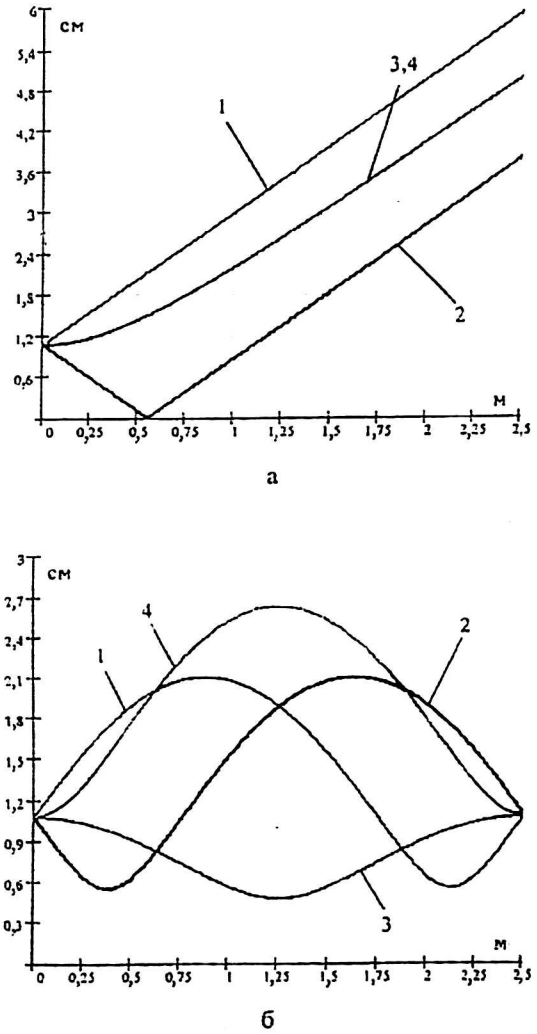


Рис. 2. Изменение ларморовского радиуса:
а — резонансных ионов Gd^{157}; *б* — нерезонансных ионов Gd^{158} вдоль антенны ($W_{\parallel}$ = 1,96 эВ; $< W_{\perp 0} >$ = 35 эВ; E_0 = 60 В/м); фазы ионов относительно фазы ВЧ-поля: 1 — 0°; 2 — 180°; 3 — 90°; 4 — 270°

С ростом амплитуды ВЧ-поля степень разделения q существенно падает и эффективность сбора Q слабо растет. Ограничение "снизу" на амплитуду связано с эффективностью сбора резонансных ионов, так как часть резонансных ионов будет теряться ($Q < 1$).

"Прямой" сбор может быть использован только в случае плазменного потока малого поперечного размера ("узких" поток), для широкого потока потребуется длинная антенна и ухудшится сепарация изотопов.

При возникновении пространственной неоднородности ВЧ-поля искажаются расчетные параметры нагрева и сбора изотопов. Причинами появления градиентных полей могут быть разбаланс электронных и ионных потоков, падающих на принимающие элементы; пространственный градиент электронной температуры в объеме плазмы; плазменные колебания; взаимодействие полей источника плазменного потока и ВЧ-антенны. При продольном (вдоль плазменного потока) распределении потенциалов, в том числе и высокочастотных, ионы приобретают/теряют продольную энергию. При градиентных поперечных полях появляются радиальный и азимутальный дрейфы ионов, ухудшающие эффективность ЦПР-нагрева. С другой стороны, формируя область высокого поля вблизи центральной плоскости емкостной антенны, можно улучшить выход резонансных ионов из плазменного потока.

При использовании электродно-емкостной антенны ограничена мощность, которая может быть введена в плазму для нагрева целевого изотопа, что ограничивает максимальное содержание этого изотопа в плазменном потоке. Использование системы нагрева с модуляцией формы ВЧ-импульса позволяет снять это ограничение.

Соленоидальная антенна

При низкой продольной электронной проводимости плазмы или большом содержании целевого изотопа более удобно использовать соленоидальную антенну [5, 9—13], которая имеет ряд преимуществ: простота конструкции; достаточно малые значения $k_{||}$, что позволяет вести нагрев ионов без выхода частиц из резонанса; возбуждаемые электрические поля не имеют продольной компоненты [5].

Соленоидальная антенна (рис. 3) создает вихревое азимутальное электрическое ВЧ-поле, пропорциональное радиусу:

$$E_\varphi(r) = -\frac{r}{2} B_a \, 2\pi f_{hf} \cos(2\pi f_{hf} t) =$$

$$= -r G_0 \cos(2\pi f_{hf} t),$$

где B_a — амплитуда ВЧ-магнитного поля соленоидальной антенны; $G_0 = \pi B_a f_{hf}$ — градиент вихревого электрического поля соленоидальной антенны, не зависящей от радиуса.

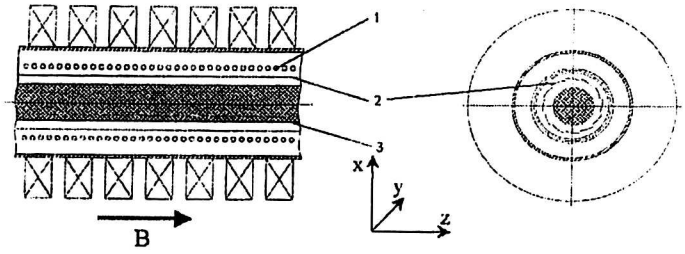


Рис. 3. Соленоидальная антенна:
1 — катушка соленоидального типа; 2 — экран; 3 — плазменный поток

В градиентном поле соленоидальной антенны возникают азимутальные и радиальные дрейфовые движения ионов.

Результаты численного моделирования для ИЦР-нагрева для резонансного ^{157}Gd и нерезонансного ^{158}Gd ионов при параметрах "узкого" плазменного потока как в электродно-емкостной антенне (см. выше), начальном радиальном положении влетающей частицы от оси антенны r = 1 см и градиенте вихревого электрического поля G_0 = 2500 В/см^2 приведены на рис. 4.

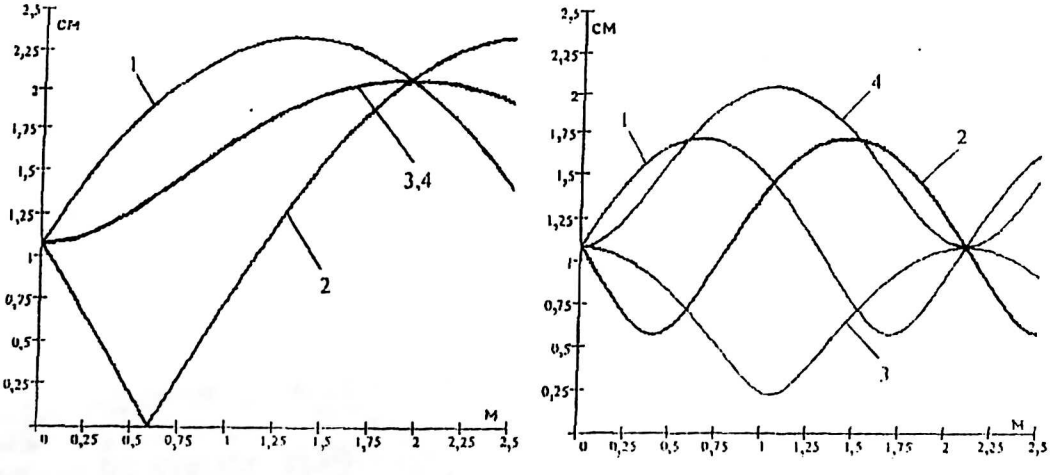


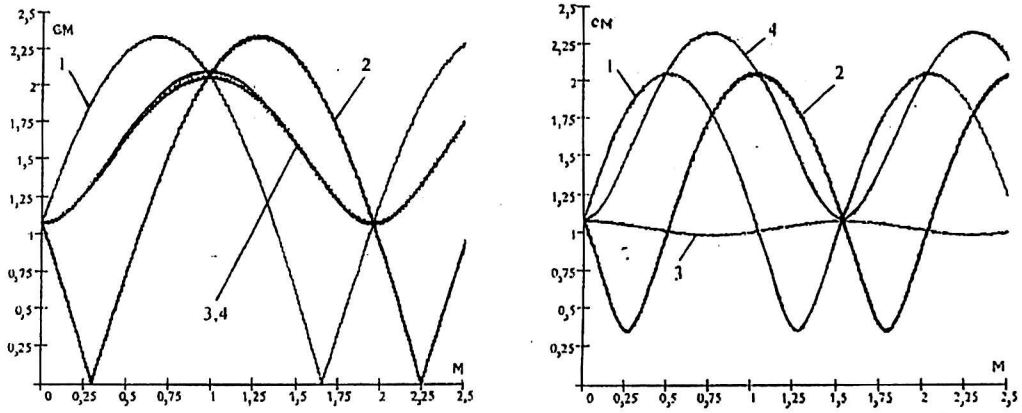
Рис. 4. Изменение ларморовского радиуса ионов вдоль антенны (r = 1 см; $W_{||}$ = 1,96 эВ; $< W_{\perp 0} > = 35$ эВ; $G_0 = 2500$ В/м^2), фазы ионов относительно фазы ВЧ-поля:
1 — 0°; 2 — 180°; 3 — 90°; 4 — 270°; *а* — резонансных ионов ^{157}Gd; *б* — нерезонансных — ^{158}Gd

Изменение амплитуды ВЧ-поля приводит к изменению частоты колебаний набираемой энергии вдоль антенны (см. рис. 4 и 5). Набираемая энергия вдоль оси антенны сильно зависит от начальной фазы и места влета иона в зону нагрева и носит колебательный характер (см. рис. 4—6). Зависимость набираемой энергии от места влета частицы в зону нагрева видна на рис. 5 и 6, в одном случае начальное положение частицы находится на расстоянии 1 см от оси антенны, в другом — на расстоянии 3 см.

Траектории ионов в ВЧ-поле соленоидальной антенны представляют собой сложные кривые из-за возникающего дрейфа (рис. 7).

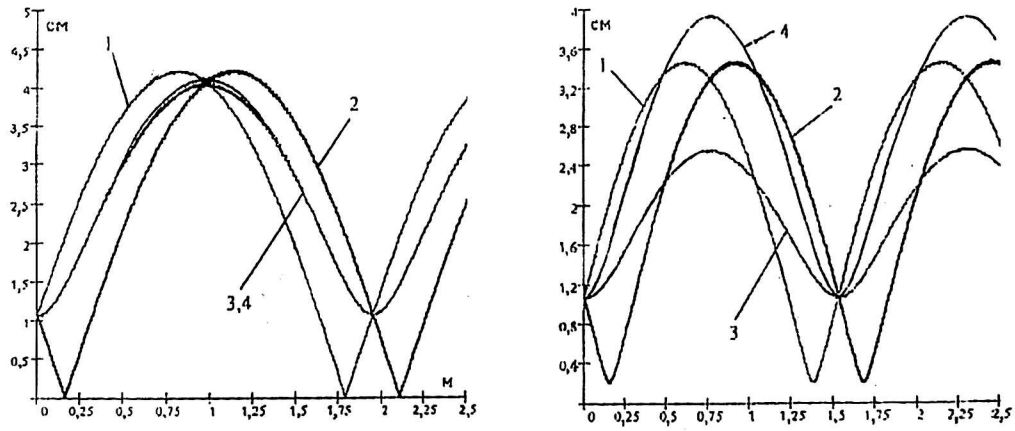
Хотя резонансные ионы в среднем нагреваются до больших энергий, чем нерезонансные, но возникающее пространственное и. энергетическое перемешивание ухудшает сепарацию ионов (см. рис. 4—7). Следовательно, в соленоидальной антенне сложно совместить ИЦР-нагрев и сепарацию, основанную на принципе "прямого" сбора.

Реализация известного принципа разделения ионов в криволинейном магнитном поле [9, 14] потребует создания дополнительной области магнитного поля, мощных электронных потоков для нейтрализации ионного потока, который выдрейфовывает из основного плазменного потока. Кроме того, в радиальном градиентном магнитном поле условия на разделение ионов неравномерны по сечению плазменного потока. Эти проблемы усложняют практическую реализацию такого метода сепарации.



а б

Рис. 5. Изменение ларморовского радиуса ионов вдоль антенны (r = 1 см; $W_{\parallel}$ = 1,96 эВ, $< W_{\perp 0} >$ = 35 эВ, G_0 = 5000 В/м), фазы ионов относительно фазы ВЧ-поля:
1 — 0°; 2 — 180°; 3 — 90°; 4 — 270°: *а* — резонансных ионов ^{157}Gd; *б* — нерезонансных ^{158}Gd



а б

Рис. 6. Изменение ларморовского радиуса ионов вдоль антенны (r = 3 см; $W_{\parallel}$ = 1,96 эВ, $< W_{\perp 0} >$ = 35 эВ, G_0 = 5000 В/м), фазы ионов относительно фазы ВЧ-поля:
1 — 0°; 2 — 180°; 3 — 90°; 4 — 270°: *а* — резонансных ионов ^{157}Gd; *б* — нерезонансных ^{158}Gd

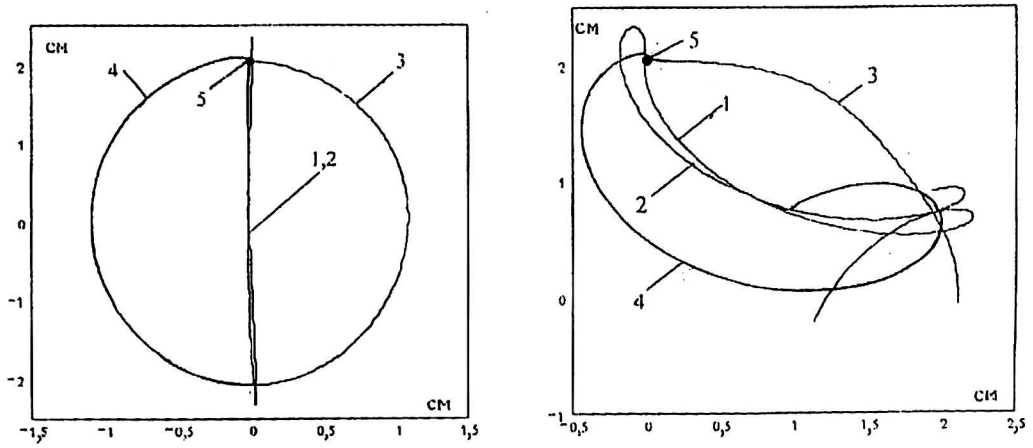


Рис. 7. Смещение центров ларморовских траекторий резонансного ^{157}Gd и нерезонансного ^{158}Gd ионов вдоль оси антенны, фазы ионов относительно фазы ВЧ-поля:
1 — 0°; 2 — 180°; 3 — 90°; 4 — 270°; 5 — положение центра ларморовской траектории на входе в антенну

Для рассматриваемой антенны целесообразно использовать коллимационный сборник (рис. 8), расположенный на выходе соленоидальной антенны [2, 3]. Сепарация ионов происходит благодаря разнице в средней набираемой энергии (ларморовского радиуса) резонансных и нерезонансных ионов. Но такая система не может эффективно работать с "узким" плазменным потоком, так как требуемые для хорошей сепарации размеры D_2 и D_1 соизмеримы с поперечными размерами потока (см. рис. 8).

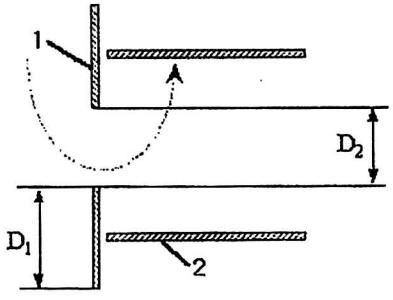


Рис. 8. Коллимационный сборник:
1 — входная диафрагма; 2 — сборник резонансных ионов

Соленоидальная антенна имеет ряд других существенных недостатков: высокая добротность антенны ухудшает ввод ВЧ-мощности в плазму [5]; неравномерный нагрев ионов по сечению плазменного потока; из ИЦР-нагрева "выпадает" центральная область плазменного потока. Смещение плазменного потока относительно оси антенны для более равномерного нагрева приводит к значительному возрастанию размеров антенны, области магнитного поля, а следовательно, и размеров установки в целом. Кроме того, в этом случае ввод в плазму ВЧ-мощности усложняется из-за экранировки полей плазмой.

Энергетическое и пространственное "перемешивание" ионов из-за возникающих дрейфов в градиентном вихревом ВЧ-поле не позволяет пространственно развести резонансные и нерезонансные ионы (как в системе с "прямым" сбором).

Возникающая "переполюсовка" электрического поля при наличии плотной плазмы ($n \sim 10^{12}$ см$^{-3}$) уменьшает или вообще исключает селективный нагрев при неоптимальном расположени источника плазменного потока и системы сбора относительно антенны в установке [11].

Сдвиг ионно-циклотронной частоты из-за возбуждения собственного магнитного поля соленоидальной антенны (до 10 мТ и выше) при невысоком магнитном моле ($B \sim 1$ Т) близок к разнице между частотами соседних ионов, особенно для тяжелых масс, и приводит к прекращению нагрева резонансных ионов так, как частота ВЧ-поля не совпадает с их собственной частотой — резонансные ионы превращаются в нерезонансные.

Заключение

Для разделения редких изотопов в "узком" плазменном потоке более предпочтительным является использование электродно-емкостной антенны с "прямым" сбором при условии сохранения в плазме равномерного ВЧ-поля. Соленоидальная антенна имеет меньшую эффективность изотопически селективного нагрева из-за возникающих дрейфов частиц в градиентном вихревом ВЧ-поле, и ее использование в этом случае малоэффективно.

Литература

1. *Tracy J. G., Aaron W. S.*//Nucl. Inst&Meth. 1993. A334. P. 45—50.

2. *Муромкин Ю. А.*//Итоги науки и техники. Сер. Физика плазмы. 1991. Т. 12. — М.: ВИНИТИ. С. 83—110.

3. Изотопы: свойства, получение, применение/Под ред. Ю. В. Баранова. — М.: ИздАТ, 2000.
4. *Волосов В. И., Деменев В. В., Драничников А. Н. и др.*: Препринт ИЯФ 01-48, 2001.
5. *Тимофеев А. В.*//Физика плазмы. 1999. Т. 25. № 3. С. 232—241.
6. *Dawson J. M., Kim H. C., Arnush D. et al.*//Physical Review Letters. 1976. V. 37. № 23. P. 1547—1550.
7. *Volosov V. I., Abdrashitov G. F., Beloborodov A. V. et al.*// Nucl. Fus. 1991. V. 31(7). P. 1275—1281.
8. *Churkin I. N., Volosov V. I., Steshov A. G.*//Rev. of Scient. Instr. 1999. V. 69. № 2. P. 822—824.
9. *Волосов В. И., Чуркин И. Н., Тимофеев А. В.*: Патент 2108141 РФ; Бюл. изобр. № 10; рег. 10.04.98.
10. *Волосов В. И., Чуркин И. Н.*: Патент 212070 РФ, рег. 11.06.98.
11. *Kuzmin S. G.*///Fisika Plazmy. 1999. № 12. P. 1020—1025.
12. *Волосов В. И., Котельников И. А., Кузьмин С. Г.*//Физика плазмы. 1998. Т. 24. № 6. С. 517.
13. *Котельников И. А., Карелин В. Е.*: Препринт ИЯФ СО РАН 01-63, 2001.
14. *Волосов В. И., Котельников И. А., Чуркин И. Н. и др.*// Атомная энергия. 2000. Т. 88. Вып. 5. С. 370—378.

Some features of ICR heating plasma flow by electrode-capacitance and solenoidal antennas

V. I. Volosov, V. V. Demenev, A. G. Steshov, I. N. Churkin
Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, Russia

Plasma separation process of heavy mass elements (A ~120—200 a. e.) by ICR-heating method is realized by HF electrical fields at ion cyclotron frequency in uniform magnetic field ($\Delta B/B \sim 5 \cdot 10^{-3}$). Some features of ICR heating of "narrow" plasma flow by electrode-capacitance and solenoidal antennas are considered. Model calculations of ICR-heating process in "narrow" plasma flow at single particle approximation are presented. The problems of ion separation for considered antennas are discussed.