

УДК 533.9

Численное моделирование коллективного ускорения протонов в ускорителе ECRIPAC

М. Кубе, В. П. Милантьев, А. М. Умнов
Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

Проведено изучение процессов создания релятивистского плазменного сгустка и ускорения протонов в проектируемом ускорителе ECRIPAC на трехмерной численной модели, построенной по методу частиц в ячейке с учетом электростатических и магнитных взаимодействий.

В течение последних 20 лет многозарядные ионы привлекают к себе все большее внимание, вызванное возможностью расширения с их помощью новых горизонтов как в научных, так и в технологических дисциплинах. В связи с этим большое значение имеет разработка и создание новых методов ускорения ионов.

В 1957 г. В. И. Векслер [1] указал на возможность осуществления механизмов ускорения, использующих коллективные взаимодействия. Характерная особенность данных методов заключается в том, что в них поле, ускоряющее частицу, создается не только внешними источниками, но возникает в результате взаимодействия групп частиц между собой, с потоками плазмы или с электромагнитным излучением. В коллективном методе ускорения заряженных частиц происходит в поле поляризации, которое для плотной плазмы достигает 10^8 В/см, что позволяет генерировать сильнооточные ионные пучки. В 1962 г. В. И. Векслер [2] высказал идею использования электронных колец для ускорения ионов, а также их формирования путем адиабатического сжатия по радиусу в растущем магнитном поле, чем обеспечивалась и необходимая плотность электронов, и устойчивость сгустка в целом. Новый метод получил название коллективного метода ускорения ионов электронными кольцами. Исследования этого метода были продолжены до 1987 г. К сожалению, несмотря на то, что метод ускорения электронными кольцами был доказан экспериментально [3], он не получил широкого распространения из-за непостоянного характера ускорения, связанного с возникающими неустойчивостями.

В настоящее время методы коллективного ускорения развиваются в разных направлениях. Например, методы коллективного ускорения ионов в системах с виртуальным катодом [4], которые находятся в стадии поисковых решений. Новая волна интереса к коллективным методам ускорения связана с применением ускоренных ионов в медицине (протонная терапия). Стоимость и размеры существующего оборудования (циклотроны, синхрофазотроны и др.), необходимого для получения протонных пучков

с необходимыми параметрами (диапазон энергии 70—235 МэВ и выше и др.) слишком велики. Для эффективного применения методов протонной терапии требуются разработка и создание компактных (размерами от одного до нескольких метров), недорогих и эффективных ускорителей, работающих в диапазоне энергий 25—200 МэВ.

В работах [5, 6] был предложен проект коллективного ускорителя ионов ECRIPAC (Electron Cyclotron Resonance Ion Plasma Accelerator), в котором для более устойчивого ускорения ионов было предложено использовать не электронное кольцо, а релятивистский плазменный сгусток, получаемый в условиях электронного циклотронного резонанса (ЭЦР) в нарастающем во времени магнитном поле [7, 8], с последующим адиабатическим сжатием. В силу ряда причин, прежде всего из-за недостатка теоретических и экспериментальных данных, этот проект пока не реализован.

Цель настоящей работы — изучение процессов создания релятивистского плазменного сгустка и ускорения протонов на трехмерной численной модели.

Работа ускорителя ECRIPAC [6] состоит из следующих основных стадий.

Первая стадия — инжекция холодной плазмы в вакуумную камеру, в которой создаются условия для ускорения электронов при ЭЦР в нарастающем во времени магнитном поле. Предполагаемый характерный поперечный размер плазмы инжекции — 2—3 см, плотность — 10^9 — 10^{10} см⁻³. Инжекция осуществляется синхронно с добавлением переменного во времени магнитного поля, создаваемого катушкой с обратным током. Общее магнитное поле уменьшается до тех пор, пока его индукция не достигнет величины

$$B_0 = \frac{m_0 c \omega}{e},$$

где m_0 , e — масса покоя и заряд электрона, соответственно;

c — скорость света в вакууме;

ω — циклическая частота вращения электрона.

Вторая стадия — нарастание магнитного поля до значения B_{gr} и ускорение электронов в условиях ЭЦР в нарастающем магнитном поле до энергий порядка 0,5—2,0 МэВ.

Третья стадия — адиабатическое сжатие плазмы, сопровождающееся повышением плотности плазмы и дальнейшим возрастанием энергии электронов за счет индукционного электрического поля.

Четвертая стадия — собственно коллективное ускорение ионов в спадающем магнитном поле до энергий 10—100 МэВ. Электроны выталкиваются вдоль спадающего магнитного поля диамагнитной силой

$$\vec{F} = -\mu \vec{\nabla} B,$$

где $\mu = W_{\perp e}/B$ — магнитный момент электрона;

$W_{\perp e}$ — энергия поперечного вращения электрона;

B — индукция магнитного поля.

Ионы ускоряются амбиполярным полем, возникающим вследствие пространственного разделения электронной и ионной компонент плазмы.

Авторами проекта ECRIPAC были получены следующие оценки энергии, приобретаемой ионами в конце цикла ускорения:

$$W_{\parallel i} f = m_0 c^2 \frac{(\gamma_s - 1)(1 - B_f / B_s)}{\gamma_f \frac{m_0}{M_i} + A \frac{n_i}{n_e}},$$

где B_s , B_f и γ_s , γ_f — начальные и конечные значения индукции магнитного поля и релятивистского фактора, соответственно;

n_e и n_i — концентрации электронной и ионной компонент плазменного сгустка;

M_i — масса иона;

A — массовое число; ограничение, накладываемое на градиент магнитного поля

$$\frac{1}{B} \nabla B \leq 3,8 \cdot 10^{-15} \left(\frac{Z}{A} \right) n_e d,$$

где Z — зарядовое состояние ионов;

d — толщина плазменного диска.

Трехмерная численная модель построена по методу частиц в ячейке [9, 10] с учетом электростатических и магнитных взаимодействий.

Цикл вычислений состоит из следующих основных этапов:

- по заданному пространственному распределению частиц плазмы рассчитываются плот-

ности заряда $\rho(i, j, k) = \rho(i \Delta x, j \Delta y, k \Delta z)$ и тока $\vec{J}(i, j, k) = \rho(i, j, k) \vec{V}(i, j, k)$ в узлах пространственной декартовой сетки, здесь i, j, k — номера узлов сетки в направлениях X, Y, Z , соответственно; $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ — пространственные шаги сетки в этих направлениях; $\vec{V}(i, j, k)$ — усредненные скорости частиц в узлах сетки;

- на сетке решается уравнение Пуассона для потенциала электрического поля и векторного потенциала магнитного поля с периодическими граничными условиями: $\Delta \phi(i, j, k) = -4\pi \rho(i, j, k)$ и

$$\Delta \vec{A}(i, j, k) = -\frac{4\pi}{c} \vec{J}(i, j, k);$$

- из значений потенциалов, найденных в узлах сетки, с помощью разностных производных вычисляются самосогласованные электрическое поле и магнитное поле плазмы $\vec{E}(i, j, k) = -\vec{\nabla} \phi(i, j, k)$ и $\vec{B}(i, j, k) = \vec{\nabla} \times \vec{A}(i, j, k)$; величины электрического и магнитного поля в точках расположения частиц определяются с помощью билинейной интерполяции, обобщенной на трехмерный случай;

- решение уравнения движения частиц по методу Бориса [9]

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = e \left\{ \vec{E} + \frac{\vec{v} \times \vec{B}}{c} \right\},$$

где $\vec{E} = \vec{E}_{hf} + \vec{E}_s + \vec{E}_{ind}$ и $\vec{B} = \vec{B}_{st} + \vec{B}_i + \vec{B}_s$,

$\vec{P}$ — импульс частицы;

e — заряд электрона;

$\vec{E}_{hf}$ — СВЧ-электрическое поле;

$\vec{E}_s$ — собственное электрическое поле плазменного сгустка;

$\vec{E}_{ind}$ — индукционное электрическое поле;

$\vec{B}_{st}$ — стационарное магнитное поле, создаваемое системой катушек;

$\vec{B}_i$ — магнитное поле, создаваемое импульсными катушками;

$\vec{B}_s$ — собственное магнитное поле плазмы.

В дальнейшем цикл вычислений повторяется.

Так как на разных стадиях ускорителя моделируются различные процессы, приводящие к изменению параметров плазменного сгустка и его размеров, в модели используется пространственная сетка с различным числом узлов и пространственным шагом для разных процессов. В методе частиц в ячейке шаг сетки обычно берется равным дебаевскому радиусу плазмы, но с другой стороны, шаг сетки может быть достаточно большим, чтобы релятивистская частица проходила расстояние, равное шагу сетки, не менее чем за два временных шага, т. е. $\Delta z < 2c\Delta t$,

где Δt — шаг интегрирования уравнений движения. Чтобы удовлетворить условиям применимости метода частиц в ячейке на стадии ускорения электронов при ЭЦР в нарастающем магнитном поле, используется сетка $32 \times 32 \times 32$ узлов, на стадии адиабатического сжатия — $32 \times 32 \times 64$ и на стадии ускорения протонов — $32 \times 32 \times 352$. Общее количество моделируемых частиц — по 100 000 каждого сорта (электронов и протонов).

В модели использовалось реальное отношение массы протона к массе электрона. Диамагнитные явления, отраженные в уравнении движения для электронов, дают основание воспользоваться схемой метода частиц с учетом лишь электрических и магнитных взаимодействий. Пространственная ограниченность процесса учитывалась для анализа потерь частиц из плазмы посредством ввода границ, соответствующих условиям эксперимента. Частицы, достигшие стенок камеры, считались потерянными.

В модели не учитывается процесс ионизации, так как характерное время этого процесса больше времени адиабатического сжатия плазмы.

На первом этапе моделирования изучались процессы создания релятивистского плазменного сгустка (ускорение электронов плазмы инжекции и адиабатическое сжатие получаемой

плазмы), на втором — ускорение протонов в области спадающего магнитного поля.

В разработанной модели используются следующие диагностики:

- энергетические спектры электронов и ионов;
- пространственное распределение частиц;
- потери частиц из плазмы;
- пространственные распределения электрического поля и магнитного поля плазмы.

Изучение процесса создания релятивистского плазменного сгустка проводилось для следующих исходных параметров плазмы:

начальная средняя энергия электронов плазмы инжекции $W_0 = 10$ эВ, начальные энергии ионов — единицы электрон-вольт;

плотность исходной плазмы $n_e = (5 \cdot 10^9 \div 1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3})$. Радиус плазмы инжекции $r = 1,25$ см, исходная плазма считается однородной и нейтральной;

амплитуда СВЧ-поля — 2 кВ/см, мода колебаний TE_{111} (2,45 ГГц).

На рис. 1 представлены сечения пространственных распределений плазмы в начальный момент времени (см. рис. 1, а), после ускорения электронов в условиях ЭЦР в нарастающем магнитном поле (см. рис. 1, б) и по завершении стадии адиабатической компрессии (см. рис. 1, в). На рис. 1, г приведены энергетические спектры электронов.

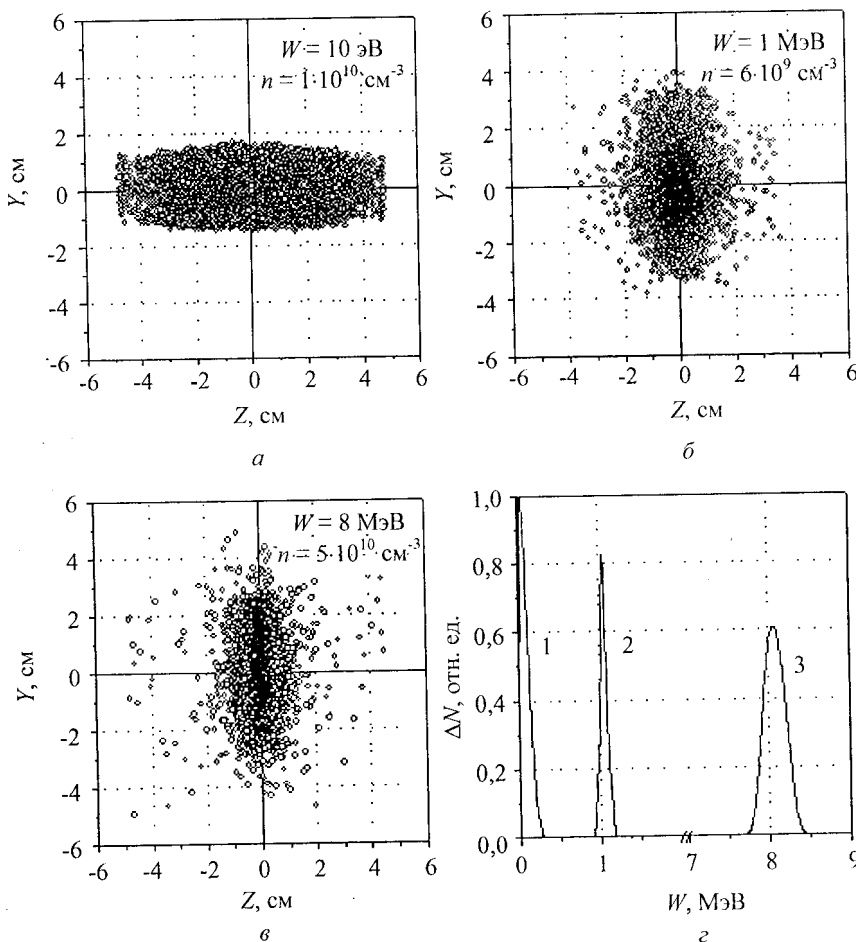


Рис. 1. ZY-сечения пространственного распределения электронов (мелкие символы) и ионов (крупные символы): а — начальное распределение; б — после ускорения электронов при ЭЦР в нарастающем во времени магнитном поле; в — после адиабатического сжатия; г — энергетические спектры электронов: 1 — начальное распределение; 2 — после ускорения электронов при ЭЦР в нарастающем во времени магнитном поле; 3 — после адиабатического сжатия

В процессе ускорения электронов в присутствии СВЧ-поля плотность плазмы падает вследствие возрастания радиусов ларморовских орбит электронов. Кроме того, 20–25 % частиц теряются на стенках камеры или не захватываются в режим ускорения. Поэтому в конце цикла ускорения (см. рис. 1, б) наблюдается снижение плотности плазмы прежде всего в радиальном направлении. В аксиальном направлении обеспечивается сжатие плазмы. Фактически возникающий объект является релятивистским сгустком электронов со средней энергией порядка 1 МэВ, удерживаемым своим кулоновским полем ионами.

На стадии адиабатической компрессии энергия электрона достигает 8 МэВ (см. рис. 1, з). Релятивистский электронный сгусток трансформируется в диск с размерами: $d = 0,75$ см, $r = 2,5$ см (см. рис. 1, в), и плотность плазмы возрастает до значения $n_e = 5 \cdot 10^{10}$ см⁻³.

Как следует из рис. 2, z-компоненты напряженности электрического поля и индукции магнитного поля плазмы, создаваемые таким релятивистским электронным диском после стадии адиабатического сжатия, превышают, соответственно, 10 кВ/см и 15 Гс.

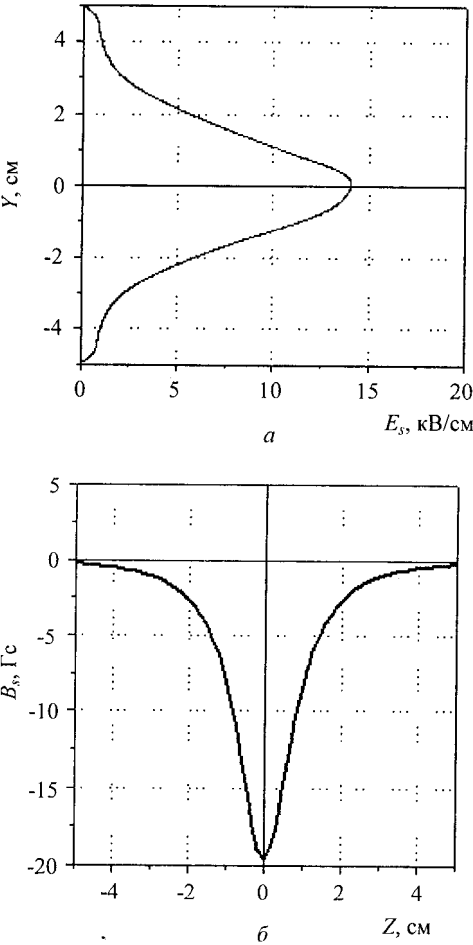


Рис. 2. Z-компоненты напряженности электрического (а) и индукции магнитного поля (б), создаваемые релятивистским электронным сгустком

На втором этапе моделирования изучалось собственно коллективное ускорение протонов. В процессе ускорения происходит почти полное разделение электронной и ионной компонент (рис. 3, а). Не захваченные в режим ускорения протоны рассеиваются под влиянием собственного кулоновского поля и попадают на стенки камеры. Лишь небольшая часть протонов (около 10 %) захватывается в режим коллективного ускорения (см. рис. 3, б). Энергия ускоренных протонов для приведенных выше параметров численного эксперимента превышает 1 МэВ (рис. 4) на длине ускорения 1 м.

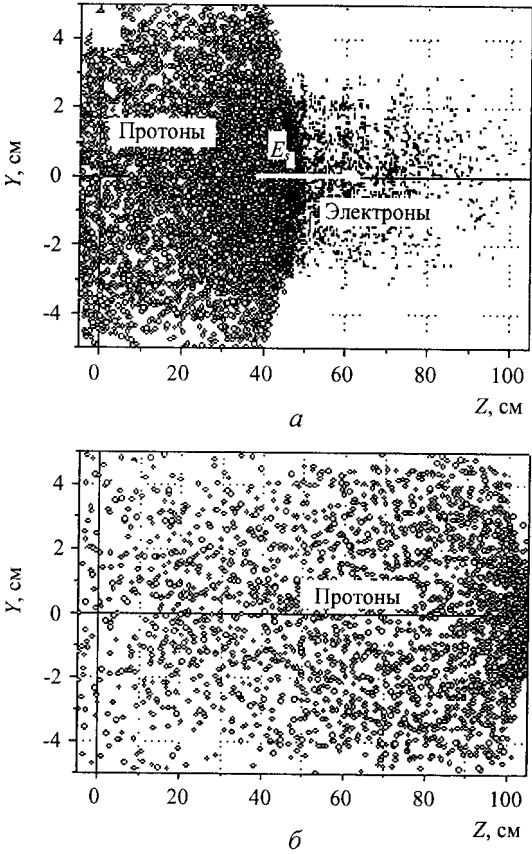


Рис. 3. ZY-сечения пространственных распределений электронной и ионной компонент в процессе ускорения (а); ZY-сечения пространственного распределения протонов в конечной фазе ускорения (б)

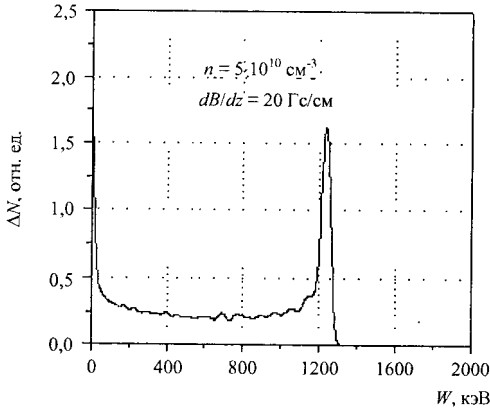


Рис. 4. Энергетический спектр протонов при ускорении на длине 1 м

На основании анализа результатов численного моделирования, проведенного в данной работе, можно сделать следующие выводы:

- ускорение электронов исходной плазмы в условиях ЭЦР в нарастающем магнитном поле и последующее адиабатическое сжатие плазмы позволяют создавать релятивистский плазменный сгусток, максимум плотности которого находится в его геометрическом центре. Параметры плазмы, достигнутые по окончании стадии адиабатического сжатия: $W = 8$ МэВ, $n_e = 5 \cdot 10^{10}$ см⁻³;

- ускорение протонов сопровождается разделением электронной и ионной компонент; небольшая часть протонов (10 %) на длине ускорения 1 м достигает энергии более 1 МэВ при сравнительно невысокой плотности релятивистского плазменного сгустка ($5 \cdot 10^{10}$ см⁻³).

Результаты численного моделирования показали, что разработанная численная модель позволяет эффективно изучать все стадии работы ускорителя. Численные эксперименты продемонстрировали возможность создания релятивистской плазмы и ускорения протонов в спадающем пространстве магнитного поля. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что ускорение ионов в ускорителе ECRIPAC является более устойчивым, чем ускорение ионов релятивистскими электронными кольцами. Авторы работы планируют провести серию численных

экспериментов по созданию релятивистских плазменных сгустков с большей плотностью и ускорением ионов, чтобы оценить возможность использования проектируемого ускорителя в различных приложениях, в том числе в медицине (протонная терапия).

Л и т е р а т у р а

1. Векслер В. И.// Атомная энергия. 1957. Т. 5. С. 427.
2. Векслер В. И.// Там же. 1968. Т. 24. С. 317.
3. Саранцев В. П., Перельштейн Э. А. Коллективное ускорение ионов электронными кольцами. — М.: Атомиздат, 1979.
4. Дубинов А. Е. и др.// Успехи физических наук. 2002. Т. 172. № 11.
5. Geller R., Golovanivsky K. S.// C.E.N.G, SPhat — PSI, 1990. № 690. P. 12.
6. Geller R., Golovanivsky K. S.// Nuclear Instruments and Methods. 1992. V. 68. P. 7.
7. Андреев В. В., Головановский К. С.// Физика плазмы. 1985. Т. 11. С. 300.
8. Andreev V. V., Umnov A. M.// Plasma Sources Science and Technology. 1999. V. 8. P. 479.
9. Birdsall C. K., Langdon A. B. Plasma Physics via Computer Simulation. — Bristol, Philadelphia.: IOP Publishing Ltd, 1995. P. 305.
10. Сигов Ю. С. Вычислительный эксперимент: Мост между прошлым и будущим физики плазмы. — М.: Физматлит, 2001. С. 223.

Статья поступила в редакцию 9 августа 2005 г.

Numerical modeling of collective proton acceleration in ECRIPAC accelerator

M. Koube, V. P. Milantiev, A. M. Umnov
Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

A process of a relativistic plasma bunch production and acceleration of protons in a proposed collective ion accelerator ECRIPAC have been studied with the use of three-dimensional numerical model, based on a method of particle in a cell, taking into account both electrostatic and magnetic plasma interactions.

УДК 621.7.043:539.23

Физические процессы в аномальном тлеющем разряде при нанесении оксидных покрытий

Р. Т. Галяутдинов, Н. Ф. Кашапов, Г. С. Лучкин
Казанский государственный технологический университет, г. Казань, Россия

Рассмотрены физические процессы в аномальном тлеющем разряде в процессах нанесения покрытий. Дано описание установки и измерительного оборудования. Приведены результаты исследований низкотемпературной плазмы. Выбрана модель описания состава и структуры покрытий, на основе которой синтезированы оптические покрытия.