

Управляемое коллективное ускорение электрон-ионных сгустков

Н. С. Азарян, С. А. Баренгольд*^{×1}, Г. А. Месяц[°], Э. А. Перельштейн¹⁾, В. П. Тараканов⁺

Объединенный институт ядерных исследований, 141980 Дубна, Россия

* Институт общей физики им. Прохорова РАН, 119991 Москва, Россия

[×] Московский физико-технический институт, 141700 Долгопрудный, Россия

[°] Физический институт им. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия

⁺ Объединенный институт физики высоких температур РАН, 125412 Москва, Россия

Поступила в редакцию 13 августа 2012 г.

После переработки 26 сентября 2012 г.

Принципиально доказана работоспособность нового управляемого коллективного метода ускорения ионов электронными сгустками на основе сильноточных релятивистских пучков пикосекундного диапазона. Формирование плотных вращающихся с релятивистскими скоростями сгустков электронов осуществляется с помощью магнитной системы типа “касп” путем их захвата в специальную магнитную ловушку. Электронный сгусток заполняется ионами при взаимодействии его с предварительно подготовленным плазменным сгустком определенной плотности. Затем с помощью системы витков с управляемыми токами, ступенчато и синхронно с движением ионов смещается эффективная потенциальная яма магнитной ловушки. Этим обеспечивается смещение и удержание электронов в направлении ускорения. Величина смещения центра ямы выбирается на каждом шаге так, чтобы ионы попадали в область ускорения большим собственным электрическим полем электронного сгустка. В отличие от известных коллективных методов ускорения, предлагаемый метод позволяет избежать разрыва электронной и ионной компонент сгустков и срыва ускорения ионов, а также развития многочисленных неустойчивостей, т.к. длительность цикла ускорения находится в наносекундном диапазоне.

1. Введение. В 1956 г. В.И. Векслер, Г.И. Будкер и Я.Б. Файнберг выдвинули концепцию коллективного ускорения ионов. В соответствии с этой концепцией их ускорение и фокусировка осуществляются за счет больших собственных полей в заряженной или квазинейтральной плазме [1–3]. В начале 60-х годов В.И. Векслер развил свою идею, предложив коллективное ускорение электрон-ионных колец [4, 5]. Электронное кольцо формируется и сжимается по радиусу в нарастающем во времени слабофокусирующем магнитном поле. Остановившееся кольцо заполняется ионами с использованием ионизации атомов остаточного газа в камере ускорителя или специальной газовой струи. Вывод электрон-ионного кольца из слабофокусирующего магнитного поля осуществляется путем снятия одного из магнитных барьеров. Затем кольцо попадает в область спадающего вдоль оси движения магнитного поля и ускоряется. Если электроны и ионы движутся с одной скоростью в продольном направлении, то получается выигрыш коллективного ускорения ионов по сравнению с прямым их ускорением во внешнем электромагнитном поле.

Эксперименты [4–6] показали, что основная трудность здесь связана с обеспечением целостности электрон-ионных сгустков при ускорении. На сравнительно короткой длине ускорения электроны отрывались от ионного сгустка и уходили вперед. Используемые пассивные методы удержания электронов – ускорение самофокусирующихся колец [4] или продольная фокусировка системой типа “беличье колесо” [4, 6] – работают на небольшой длине ускорения, и энергии ускоренных ионов невелики. Необходима внешняя продольная (вдоль оси ускорения) фокусировка электронов, которую предполагал В.И. Векслер в начале исследований по коллективным методам ускорения.

Разрыв электронной и ионной компонент характерен также для коллективного метода ускорения ионов в прямолинейных сильноточных электронных пучках при формировании виртуального катода. Поэтому возникло предложение и были проведены успешные эксперименты по лазерному управлению движением фронта электронного пучка [5, 7, 8], а также был предложен управляемый ступенчатый коллективный ускоритель с использованием отдельных источников сильноточных пучков на каждой ступени [9]. Заметим, что для всех предложений управля-

¹⁾ e-mail: sb@nsc.gpi.ru; perel@nusun.jinr.ru

емого коллективного ускорения характерны использование мощных электронных пучков (с токами в несколько десятков кА), большие потери электронов при ускорении ионов и небольшая частота повторений циклов ускорения.

В данной работе путем численного эксперимента проверяется возможность реализации нового управляемого коллективного ускорения ионов на большой длине с учетом последних достижений в развитии быстрых сильноточных коммутаторов и получении на их основе сильноточных релятивистских пучков электронов пикосекундного диапазона [10].

Суть предлагаемого подхода к решению проблемы состоит в том, что набор энергии ионов осуществляется за счет большого собственного электрического поля электронного сгустка. Движение сгустка вращающихся с релятивистскими скоростями электронов управляется системой токовых витков с программируемыми импульсными токами таким образом, чтобы обеспечить в среднем синхронное продвижение сгустков вдоль системы витков с набором энергии ионов на каждом дискретном шаге по виткам.

2. Численный эксперимент по управляемому коллективному ускорению ионов. Принципиальная схема установки для управляемого ускорения ионов приведена на рис. 1. На рисунке показаны

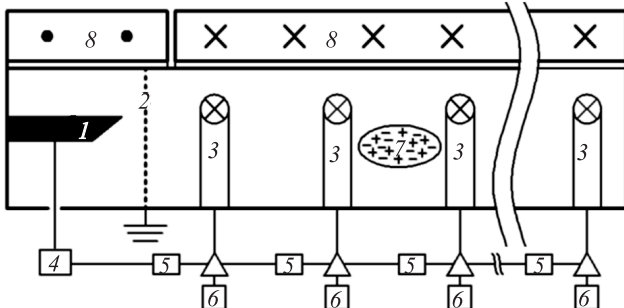


Рис. 1. Принципиальная схема установки для управляемого коллективного ускорения ионов: 1 – катод, 2 – фольга, 3 – система витков с импульсной запиткой, 4 – источник питания диода, 5 – система задержек для последовательной запитки витков, 6 – источники питания витков, 7 – электронно-ионный сгусток, 8 – система соленоидов

тонкостенный трубчатый катод с радиусом 30 мм и два встречно включенных соленоида. Радиус соленоидов – 50 мм. В промежутке между соленоидами создается магнитное поле с преимущественно радиальными силовыми линиями – область “каспа” [6, 11, 12]. Распределения аксиальной компоненты магнитного поля на оси симметрии (сплошная линия) и радиаль-

ной компоненты поля на радиусе $r = 3$ см (штриховая линия) по длине ускорителя приведены на рис. 2. На

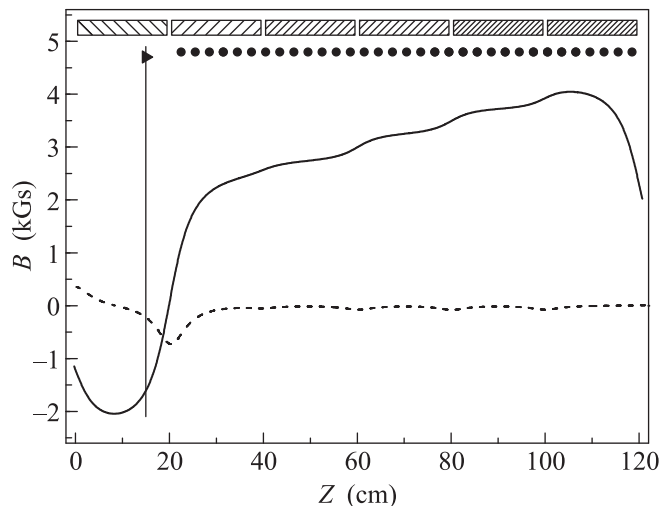


Рис. 2. Распределения аксиальной компоненты магнитного поля на оси симметрии (сплошная линия) и радиальной компоненты поля на радиусе $r = 3$ см (штриховая линия) по длине ускорителя

нем также схематически показаны встречно включенные соленоиды (штриховка) и управляемые токовые витки (точки сверху). Вертикальная линия на рисунке указывает точку инжекции электронов.

В численном эксперименте электроны инжектировались с кромки катода толщиной 100 мкм на радиусе 3 см в аксиальном направлении с энергией ускоренных электронов 2.1 МэВ. Длительность токового импульса 0.8 нс, ток 1 кА, что соответствует $5 \cdot 10^{12}$ частицам в электронном сгустке. В области за каспом продольная скорость электронов существенно уменьшается и формируется сгусток электронов, вращающихся с релятивистскими скоростями [6, 11, 12]. Релятивистское вращение сгустка ослабляет эффект ускорения его головной части, связанный с его большим пространственным зарядом [10].

Барьерный токовый виток, расположенный на расстоянии ~ 18 см от центра каспа, разворачивает электроны к каспу. Через интервал времени, соответствующий двойному времени прохождения фронта пучка от каспа до витка, включается ближайший к каспу токовый виток (виток 1) и образуется магнитная ловушка, в которую захватывается электронный сгусток. Часть электронов теряется при захвате и уходит в районе каспа на стенку вакуумной камеры. Коэффициент захвата электронов в ловушку составляет около 75%. Характерные эпюры токовых импульсов в трех витках показаны на рис. 3. Длительность переднего фронта токового импульса в

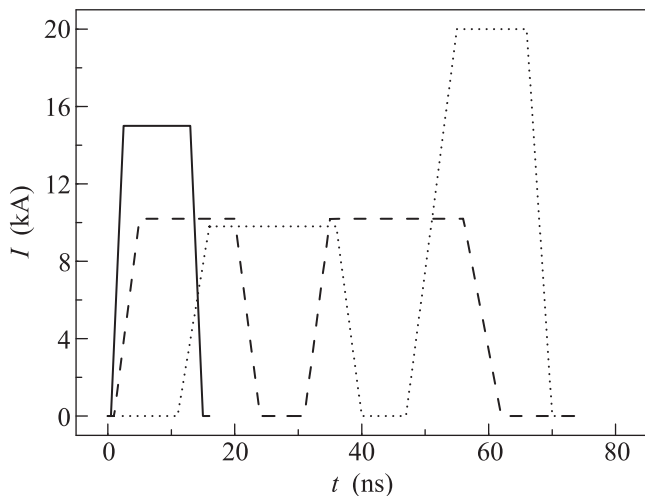


Рис. 3. Характерные эпюры токовых импульсов в витках: сплошной линией обозначен ток в витке 1, штриховой – в витке 9, точками – 15

первом витке 2 нс. Ток на плато – около 15 кА. Оценка прикладываемого к витку напряжения дает величину около 300 кВ. Коммутируемые импульсные мощности для всех витков оцениваются на уровне нескольких ГВт. Как показано в монографии [13], коммутаторы для таких мощностей в наносекундном диапазоне достаточно хорошо разработаны и широко используются.

Предварительно, перед инжекцией электронов, в области, где формируется захваченный электронный сгусток, создается сгусток разреженной водородной плазмы. При моделировании он представлен в плоскости R – Z в виде прямоугольника 1×15 см и при среднем радиусе 2.5 см. Плотность плазмы $1.8 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$, что соответствует числу ионов $\sim 10\%$ от числа инжектированных с катода электронов. При захвате кольца в магнитную ловушку электроны плазмы покидают плазменный сгусток под действием собственного поля инжектированных с катода электронов. Движение потоков выбывших низкоэнергетических электронов идет по силовым линиям магнитного поля в двух направлениях. Одна группа электронов плазмы теряется на цилиндрической стенке вакуумной камеры в районе каспа, вторая – на торце камеры. Таким образом, в магнитной ловушке остаются захваченный сгусток вращающихся релятивистских электронов и ионная компонента плазмы, которая захватывается собственным электрическим полем пространственного заряда электронов. Для увеличения плотности электронного сгустка с целью повышения ускоряющих ионных полей проводилось его продольное сжатие путем включения соседних к барьерным витков.

Захваченный электронный сгусток можно перемещать вдоль оси симметрии системы, двигая в пространстве магнитную яму, в которой он находится. Такое движение магнитной ямы обеспечивается путем последовательной запитки витков, образующих магнитную ловушку. Для моделирования этого процесса в программном комплексе КАРАТ [14] была добавлена возможность задания до 33 таких витков, с заданием для каждого собственной временной функции подачи токового импульса. Задача оптимизации числа коммутаторов, необходимых для запитки витков, в этой работе не ставилась. При моделировании витки радиусом 4.75 см были расставлены вдоль оси ускорения через 3 см друг от друга. Для перемещения сгустка электронов на один виток снимается ток в переднем по направлению движения сгустка витке и запитывается следующий после него виток. При этом ток в заднем витке временно удваивается для придания дополнительного импульса электронному сгустку. Характерное время запитки витков ~ 5 нс. Электронное кольцо перемещается вслед за ямой и останавливается в ней на некоторое время для ускорения ионов. Затем описанный процесс повторяется. Длительность каждого такого цикла постепенно уменьшается от ~ 8 нс в начале ускорения до ~ 1 нс через 40 нс после начала ускорения. Ионы плазмы при этом тянутся за электронным сгустком, постепенно ускоряясь с темпом набора средней энергии $\sim 3 \text{ МэВ/м}$.

3. Результаты численного эксперимента. Численный эксперимент проводился с использованием программного комплекса КАРАТ методом PIC (частицы в ячейках). Число крупных частиц релятивистских электронов было выбрано равным 17652, число крупных частиц ионов и электронов в плазме – по 9250. Уравнения Максвелла решались с помощью явных консервативных по энергии разностных схем с перешагиванием на сдвинутых сетках, имеющих второй порядок точности по координатам и времени. С учетом азимутальной симметрии задачи моделирование проводилось в геометрии R – Z . Размер ячейки сетки $0.5 \times 0.5 \text{ мм}^2$.

Основные результаты численного эксперимента иллюстрируются рисунками 4 и 5. На рис. 4 показаны по строке зависимости от продольной координаты радиусов случайной выборки частиц R , энергии E , продольной (β_z) и азимутальной (β_ϕ) скоростей частиц (в единицах скорости света). Ионам соответствует белый цвет, электронам – черный. Три строки отвечают трем характерным моментам времени: началу, середине и концу процесса ускорения.

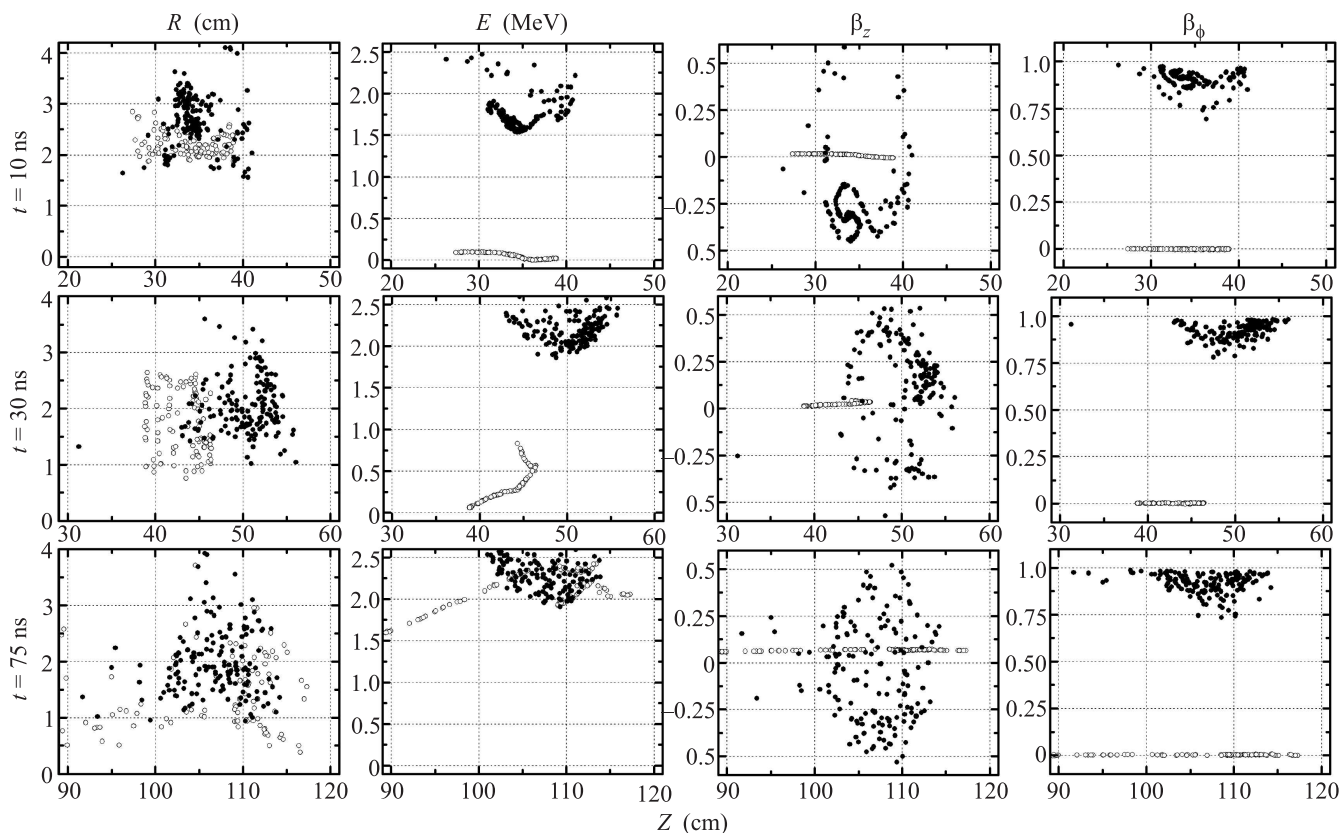


Рис. 4. Портреты электрон-ионного пучка в различные моменты времени (● – электроны, ○ – ионы)

Главный вывод, который можно сделать из анализа динамики частиц по первой колонке, состоит в следующем. В численном эксперименте реализуется коллективное ускорение ионов на большой длине ускорения при удержании электронов в движущейся эффективной внешней потенциальной яме. Потери ионов при ускорении незначительны. Электрон-ионный сгусток геометрически представляет собой полый цилиндр длиной около 10 см с внутренним и внешним радиусами 2 и 3 см.

Поскольку ускоренное движение внешней потенциальной ямы синхронизовано с движением ионов, ионы приобретают энергию с большим темпом ускорения (вторая колонка рис. 4). Темп набора средней энергии ~ 3 МэВ/м. Для сравнения приведем оценку так называемого предельного темпа ускорения ионов dE/dz для цилиндрического трубчатого электронного пучка с равномерной плотностью заряда, полученную с использованием формулы [4, 15]

$$\frac{dE}{dz} \approx \nu m c^2 \frac{\ln(16r_0/a_r)}{a_z}, \quad (1)$$

где $\nu = r_{cl} N_l$, $r_{cl} = e^2/mc^2 \cong 2.8 \cdot 10^{-13}$ см – классический радиус электрона, e и m – заряд и масса электрона,

c – скорость света в вакууме, $N_l = N/2\pi r_0$ – линейная плотность электронов, N – число электронов в пучке, r_0 – средний радиус пучка, a_r и a_z – радиальный и аксиальный полуразмеры пучка соответственно. Подставляя в (1) указанные выше параметры пучка, получаем $\partial E/\partial z \cong 10$ МэВ/м. Аналитические расчеты темпа ускорения самофокусирующегося электрон-ионного кольца показали, что реальный темп ускорения в 4 раза меньше предельно допустимого [4, 16]. Таким образом, полученный нами в численном эксперименте темп ускорения хорошо согласуется с предельно допустимым в модели [16].

Третья колонка рис. 4 демонстрирует синхронное в среднем движение ионов и электронов. Четвертая колонка иллюстрирует релятивистское вращение электронного сгустка, благодаря которому ослабляется расталкивание электронов в продольном направлении.

Рис. 5 дает возможность оценить темп набора энергии и энергетический разброс коллективно ускоренных ионов.

4. Заключение. Численный эксперимент показал работоспособность рассматриваемого управляемого коллективного метода ускорения ионов элект-

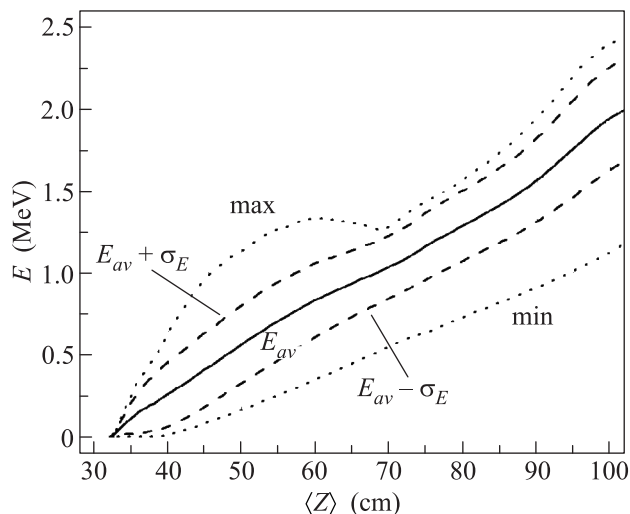


Рис. 5. Энергия ионов в зависимости от длины ускорения. Сплошная линия – средняя энергия ионов. Штриховые линии соответствуют энергиям ионов на уровне одного стандартного отклонения от средней энергии, пунктирные – максимальным и минимальным значениям энергии

тронными сгустками с использованием пикосекундных релятивистских электронных пучков. В отличие от известных коллективных методов ускорения, предлагаемый метод позволяет избежать разрыва электронной и ионной компонент сгустков и срыва ускорения ионов, а также развития многочисленных неустойчивостей, т.к. длительность цикла ускорения находится в наносекундном диапазоне. Использование пикосекундных сильноточных электронных пучков дает возможность получить большую цикличность работы и обеспечивает компактность ускорителя. Достоинства нового метода связаны с возможностью ускорения большого количества ионов в цикле ($\sim 5 \cdot 10^{11}$) при малой длительности импульса и возможностью ускорения ионов на большой дли-

не. Такой ускоритель может представлять интерес для различных приложений.

Авторы благодарны С.Н. Седых и В.В. Скадорову за помощь в работе.

1. V. I. Veksler, Proc. Symp. CERN **1**, 80 (1956); Атомная Энергия **5**, 427 (1957).
2. G. I. Budker, Proc. Symp. CERN **1**, 68 (1956); Атомная Энергия **1**, 9 (1956).
3. Ya. V. Feinberg, Proc. Symp. CERN **1**, 84 (1956); Атомная Энергия **6**, 431 (1959).
4. В. П. Саранцев, Э. А. Перельштейн, *Коллективное ускорение ионов электронными кольцами*, М.: Атомиздат, 1979.
5. G. L. Olson and U. Schumacher, *Collective Ion Acceleration*, Berlin: Springer-Verlag, 1979.
6. C. D. Striffler, R. A. Meger, J. Grossman et al, IEEE Trans. Nucl. Sci. **26**, 4234 (1979).
7. C. L. Olson, C. A. Front, E. L. Patterson et al., Phys. Rev. Lett. **56**, 2260 (1986).
8. R. L. Yao, W. W. Destler, C. D. Striffler et al., PAC **624** (1989).
9. J. Adamski, US Patent 4,296,327; 20.10.1981.
10. Г. А. Месяц, М. И. Яландин, УФН **175**(3), 225 (2005).
11. Н. С. Азарян, С. А. Баренгольц, С. Н. Доля и др., ЖТФ **80**(4), 126 (2010).
12. К. Д. Синельников, Н. А. Хижняк, Н. С. Репалов и др., *Физика плазмы и проблемы управляемого термоядерного синтеза*, Киев: Наукова думка, 1965, вып. 4, с. 388.
13. Г. А. Месяц, *Импульсная энергетика и электроника*, М.: Наука, 2004.
14. V. P. Tarakanov, *User's Manual for Code KARAT*, ver.7.09, April, 99.
15. М. Л. Левин, *Симпозиум по коллективным методам ускорения*, Препринт ОИЯИ, Д9-6707, Дубна, 1972, с. 49.
16. Э. А. Перельштейн, О. И. Ярковой, ЖТФ **41**, 23 (1971).