

10

О возможности коллективного ускорения ионов в магнитоизолированном виркаторе в режиме бегущей границы распределенного виртуального катода

© А.Е. Дубинов¹, В.Д. Селемир¹, В.П. Тараканов²

¹ Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров

² Институт высоких температур РАН, Москва

Поступило в Редакцию 21 сентября 2001 г.

Предлагается новая схема ускорения ионов движущейся границей распределенного виртуального катода. Функционирование схемы основано на явлении перехода электронных пучков, плотность которых превышает некоторую, в так называемое сжатое состояние, характеризующееся малой скоростью и большой плотностью электронов, а также развитой турбулентностью встречных потоков. Проведены расчеты.

Для коллективного ускорения сильноточных пучков положительных ионов наибольшее распространение получили схемы, использующие электронные пучки с виртуальным катодом (ВК). Среди таких схем можно назвать отражательные триоды [1,2], газонаполненные виркаторы [3,4] и вакуумные виркаторы с экстракцией ионов из анода (диод Люса или виркатор с плазменным анодом) [5,6].

Отражательные триоды имеют очевидный недостаток: ВК в них в среднем неподвижен. Следовательно, даже при достаточно большом темпе ускорения ионов при подлете их к ВК общая энергия ускорения будет невелика. По-видимому, этим обстоятельством можно объяснить то, что исследования подобных схем в последнее десятилетие практически не проводились.

В двух же указанных схемах виркатора используется движущийся ВК, причем добиваются того, чтобы как можно дольше выполнялся синхронизм между ВК и загруженными в ВК ионами. Однако причиной направленного движения ВК в виркаторах является постепенная нейтрализация отрицательного пространственного заряда ВК поступающими

в него ионами. Иными словами, если бы ионов не было, то ВК в среднем оставался бы неподвижным. Это обстоятельство не способствует созданию коллективных ускорителей ионов с управляемым темпом ускорения. В связи с этим возникает задача разработки такой схемы ускорения, в которой ВК мог бы направленно двигаться самостоятельно и его скоростью движения можно было бы управлять.

Для этого в [7] было предложено ускорение ионов краевым полем движущейся границы распределенного ВК, осуществляя тем или иным способом волну переключения "состояние с ВК → состояние с полнотью пролетным током", а в [8] — практически аналогичная идея, заключающаяся в том, что вдоль оси ускорения ионов создают цепочку нескольких ВК с помощью последовательности электронных диодов, а затем по мере прохождения ионным пучком вдоль оси ускорения внешним устройством выводят каждый электронный промежуток из состояния с ВК в состояние без ВК. При этом можно добиться, чтобы задний фронт этой цепочки двигался синхронно с ускоряющимся ионным пучком. Синхронность коллективного ускорения и модульность конструкции ускорителя в принципе обеспечивают ускорение ионов практически до любой энергии. Но здесь имеется одна техническая особенность, усложняющая эти проекты. Дело в том, что, согласно [7,8], направления движения ускоряемого ионного пучка и электронных пучков, создающих ВК, взаимно перпендикулярны и, следовательно, здесь неприменимы магнитные системы сопровождения пучков. Это, в свою очередь, ставит под сомнение возможность построения длинных ускоряющих каналов на основе этих схем.

В данной работе предлагается новая схема ускорения ионов движущейся границей распределенного ВК и проводятся соответствующие расчеты.

Функционирование новой схемы основано на обнаруженном в [9] явлении, заключающемся в том, что в электронных пучках с плотностью тока, превышающей предельную, происходит переход из двухпоточкового состояния пучка (ДСП) в так называемое "сжатое состояние" пучка (ССП), характеризующееся малой скоростью и большой плотностью электронов, а также развитой турбулентностью встречных потоков. Было установлено также, что в бесфольговых магнитоизолированных виркаторах, представляющих собой длинную трубу со скачком диаметра, в секции меньшего диаметра которой размещен катод, формирование СПП имеет волновой характер, причем волна переключения

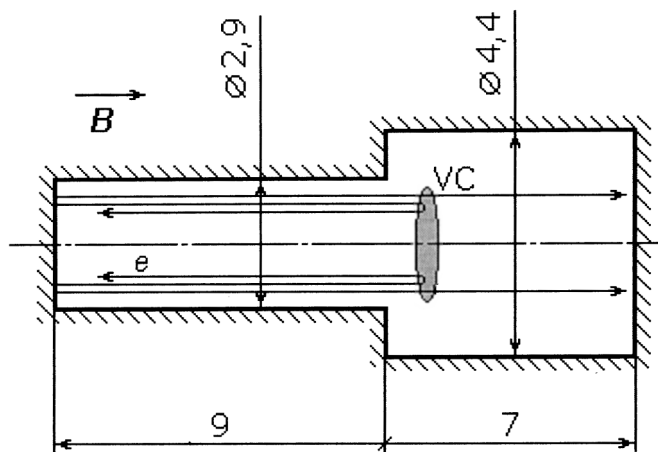


Рис. 1. Геометрия магнитоизолированного виркатора (все размеры — в см).

”ДСП → ССП” движется по направлению от ВК к катоду, т.е. против направления инжекции. Скорость волны переключения была оценена как ~ 10 см/нс. Для объяснения этого явления была предложена теория, основанная на балансе моментов сил давления в сечениях, находящихся по разные стороны от скачка диаметра. Фактически ССП — это распределенный в пространстве дрейфа ВК.

Отметим, что установление ССП сопровождается дополнительным накоплением электрического заряда, а скорость волны переключения определяется темпом накопления заряда, т.е. отношением тока пучка к предельному току.

В работах [10–12] было продолжено исследование динамики установления ССП. Так, в [10] было найдено, что если в магнитоизолированном виркаторе на скачке диаметра разместить фольгу или, скажем, тонкий плазменный слой, то скорость волны установления ССП несколько уменьшится. А в предложенном одним из авторов магнитоизолированном виркаторе с магнитной пробкой [11] было найдено, что ССП устанавливается между ВК и магнитной пробкой, а волна переключения может двигаться в противоположную сторону, от катода.

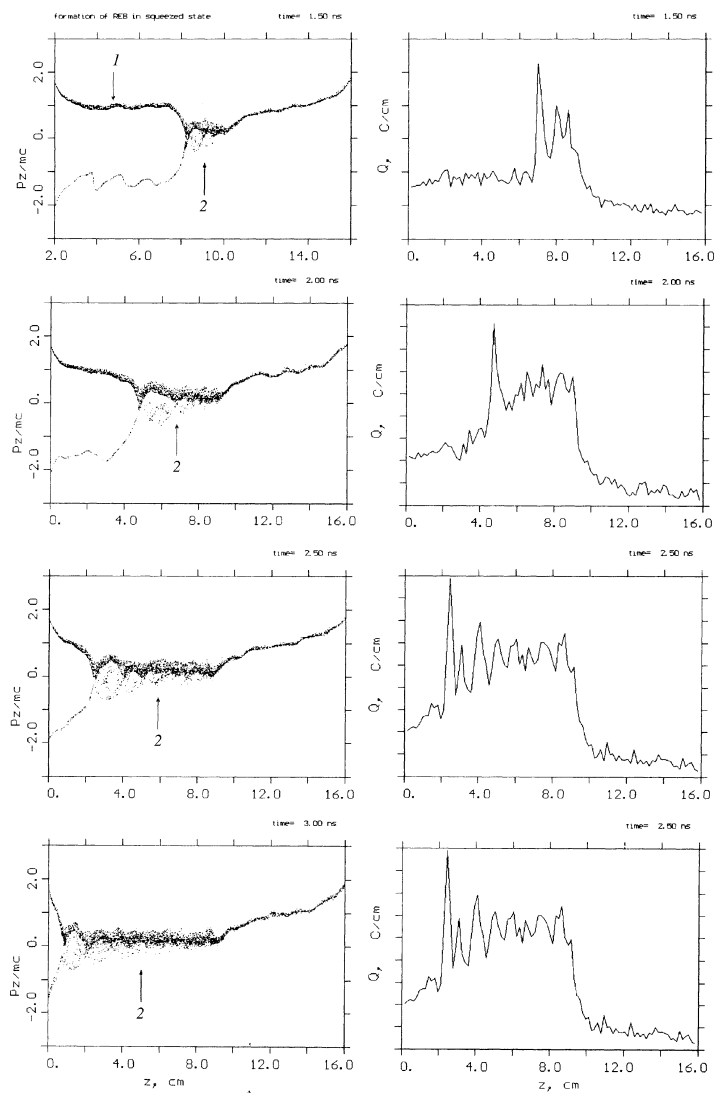


Рис. 2. Волновой характер установления ССП: слева — эволюция фазового портрета пучка, справа — эволюция распределения заряда вдоль оси прибора. 1 — ДСП, 2 — ССП.

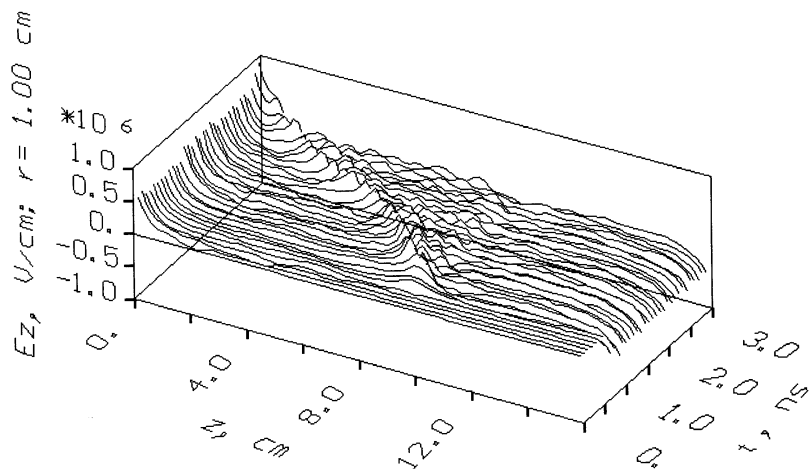


Рис. 3. Пространственно-временная динамика продольного электрического поля.

Поскольку на фронте волны переключения имеется большой перепад электронной плотности, то здесь сосредоточивается также и большое продольное электрическое поле, являющееся ускоряющим для положительных ионов.

Для расчета динамики волны переключения и связанного с ним электрического поля использовался $2D(rz)$ вариант известного пакета программ "КАРАТ" [13] (версия 80007win), представляющего собой полностью самосогласованный релятивистский электромагнитный PIC-код.

Геометрия (показана с размерами на рис. 1) и электрические параметры магнитоизолированного виркатора (ток — 10 кА, ускоряющее напряжение — 750 кВ, однородное аксиальное магнитное поле — 50 кГ) примерно соответствовали работе [9].

Наличие в системе ССП можно легко установить по мгновенному фазовому портрету пучка. Рассчитанная динамика движения волны установления ССП для рассматриваемого варианта представлена в виде нескольких фазовых портретов пучка и синхронизированных с ними мгновенных профилей электронного пространственного заряда на рис. 2.

Эти профили показывают, что действительно на фронте волны переключения "ДСП → ССП" существует заметный перепад электронной плотности.

Вычислялась динамика продольного распределения продольного электрического поля на радиусе, равном внешнему радиусу пучка. Пространственно-временная картина этого поля показана на рис. 3. Расчеты дают, что амплитуда электрического поля на фронте волны переключения "ДСП → ССП" примерно постоянна и держится на отметке нескольких десятых долей MV/cm.

Скоростью волны переключения легко управлять, например, профилируя радиус канала или темп накопления электронов в ССП (т.е. ток пучка).

Если волну переключения "ДСП → ССП" загрузить ионным сгустком, то можно обеспечить его длительное ускорение с очень высоким темпом. Магнитное поле и радиальная потенциальная яма, созданная электронами, обеспечивает при этом поперечную устойчивость ионов.

Таким образом, предложенная схема, свободная от недостатков известных схем коллективного ускорения, позволит реализовать ускорители ионов с устойчивой работой.

Работа выполнена в рамках проекта МНТЦ № 1629.

Список литературы

- [1] *Humphries S., jr., Sudan R.N., Condit W.C., jr.* // Appl. Phys. Lett. 1976. V. 26. N 12. P. 667.
- [2] *Быстрицкий В.М., Диденко А.Н.* // УФН. 1980. Т. 132. № 1. С. 91.
- [3] *Kuswa S.W., Bradley L.P., Yonas G.* // IEEE Trans. 1973. V. NS-20. N 3. P. 305.
- [4] *Коломенский А.А., Лихачев В.М., Синильщикова И.Н.* и др. // ЖЭТФ. 1975. Т. 68. № 1. С. 51.
- [5] *Luce J.S., Sahlin H.L., Crites T.R.* // IEEE Trans. 1973. V. NS-20. N 3. P. 336.
- [6] *Бабкин А.Л., Дубинов А.Е., Жданов В.С.* и др. // Физика плазмы. 1997. Т. 23. № 4. С. 343.
- [7] *Льмарь А.Г., Беликов В.В., Звягинцев А.В.* и др. // Вопросы атомн. науки и техн. Сер. Ядерно-физич. исслед. (теория и эксперимент). 1989. № 5 (5). С. 71.
- [8] *Лацко Е.М.* Способ ускорения ионов. Патент РФ № 1529476. МКИ: H 05 H 5/00, 9/00. 1989. БИ № 46.
- [9] *Ignatov A.M., Tarakanov V.P.* // Phys. Plasmas. 1994. V. 1. N 3. P. 741.

- [10] Дубинов А.Е. // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. В. 22. С. 29.
- [11] Дубинов А.Е. // РЭ. 2000. Т. 45. № 7. С. 875.
- [12] Дубинов А.Е., Ефимова И.А. // ЖТФ. 2001. Т. 71. В. 6. С. 80.
- [13] Tarakanov V.P. User's manual for code Karat. Berkley Research Associate Inc. Springfield. VA. 1992.