

действия разрыва волокна на окружающую его матрицу. По нашему мнению, эти два положения составляют основу теории, способной в дальнейшем обосновать в деталях экспериментальные данные [4].

Рассмотрим теперь подробнее вклад отдельных разрывов волокон в рамках тех же представлений. На раннем этапе процесса накопления разрывов волокон преобладают одиночные разрывы, они же дают основной вклад в выделяемую мощность W (рис. 3). Здесь же явно видна последовательность «включения» механизмов согласованных разрывов возрастающей кратности. На рис. 3 видно затухание действия механизмов по мере исчерпания мест разрывов волокон. Особое внимание следует обратить на заметное возрастание числа многократных разрывов, существенно превышающих количество одиночных разрывов волокон.

Представленные результаты расчетов на ЭВМ подтверждают важность учета кооперативности процесса накопления повреждений на примере образца ВК. Специфика данного материала связана с его сильной анизотропией механических свойств: дальнедействием возмущения волокон вдоль направления растяжения и локализацией возмущения матрицы при разрыве высокомодульного волокна.

Авторы благодарят А. Н. Орлова за полезные советы и внимание к работе.

Литература

- [1] Аргон А. В. В кн.: Композиционные материалы. Разрушение и усталость. М., 1978, с. 166—202.
- [2] Карпинский Д. Н., Ахтырец Д. Ф. Изв. Сев.-Кавк. научн. центра высш. шк. Естеств. науки, 1980, № 1, с. 30—32.
- [3] Жданова И. Н., Карпинский Д. Н. Изв. Сев.-Кавк. научн. центра высш. шк. Естеств. науки, 1986, № 2, с. 67—72.
- [4] Лексовский А. М., Абдуманонов А., Ахунов Р. П. и др. МКМ, 1984, № 6, с. 1004—1010.
- [5] Уи Ф. Н., Френд Л. В. J. Mech. Phys. Sol., 1984, v. 32, N 2, p. 119—132.
- [6] Баженов С. Л., Маневич Л. И., Берлин Ал. Ал. ДАН СССР, 1984, т. 277, № 4, с. 854—857.

Ростовский государственный университет
им. М. А. Суслова

Поступило в Редакцию
27 июня 1987 г.

Научно-исследовательский институт
механики и прикладной математики
Ростов-на-Дону

ДОУСКОРЕНИЕ СИЛЬНОТОЧНЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ В ЛИНЕЙНОМ ИНДУКЦИОННОМ УСКОРИТЕЛЕ

В. А. Кияшко, Е. А. Корнилов, В. А. Винокуров

Несмотря на впечатляющие результаты по генерации мощных ионных пучков (МИП), по существу нерешенной является проблема доускорения сильноточных зарядово-нейтральных пучков ионов, энергия которых в ряде случаев должна существенно превышать мегавольтовый уровень [1]. Для увеличения энергии МИП можно использовать способ ускорения ионов в линейном плазменном индукционном ускорителе [2]. Однако при транспортировке МИП в однородной плазме в области дрейфа между ускоряющими зазорами наблюдается пучково-плазменная неустойчивость, приводящая к аномально большим потерям энергии ускоренных ионов, что существенно снижает эффективность ускорения [3, 4]. Известно [5], что в неоднородной плазме, когда масштаб неоднородности меньше длины релаксации пучка, происходит срыв резонанса между волнами и частицами, а коллективное взаимодействие при этом подавляется. Как показано в данной работе, использование неоднородной плазмы в канале транспортировки пучка позволяет реализовать эффективное доускорение МИП в линейном индукционном ускорителе.

Целью данной работы является экспериментальное исследование возможности доускорения килоамперных ионных пучков микросекундной длительности в трехззорном ионном индукционном ускорителе (ИИндУС), содержащем инжектор ионного пучка, описанный в [6], и две последовательно расположенные ускоряющие секции, каждая из которых собрана

из тороидальных ферромагнитных сердечников и нагружена на свой ускоряющий зазор (рис. 1).

Ускоряющее напряжение в инжекторе ИИНДУС достигало ~ 300 кВ при длительности импульса $\sim 10^{-6}$ с, а в ускоряющих зазорах — по 120 кВ при длительности $\sim 5 \cdot 10^{-7}$ с.

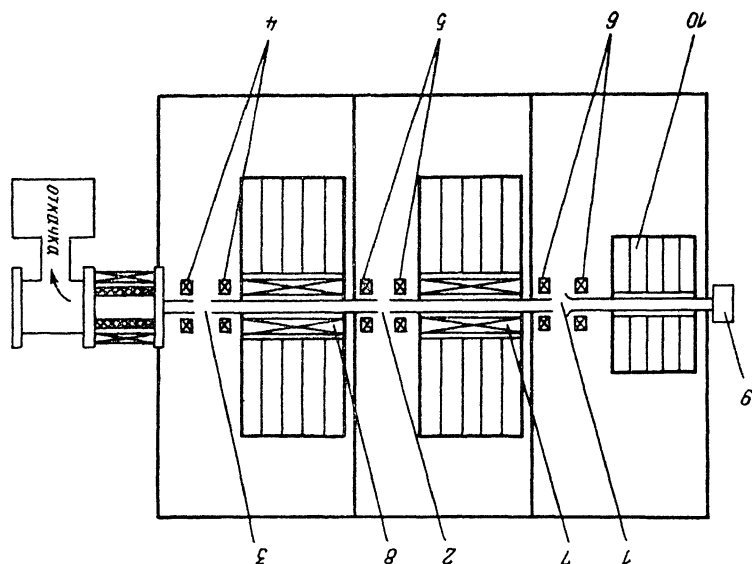


Рис. 1. Схема ускоряющей системы ИИНДУС.

1 — инжекторный зазор; 2 — первый доускоряющий зазор; 3 — второй доускоряющий зазор; 4, 5, 6 — катушки изолирующего магнитного поля «касп»-геометрии; 7, 8 — соленоиды ведущего магнитного поля; 9 — импульсный газовый клапан; 10 — ферромагнитные сердечники.

Подавление электронного тока в ускоряющих зазорах осуществлялось изолирующим магнитным полем остроугольной геометрии, которое создавалось импульсными катушками,

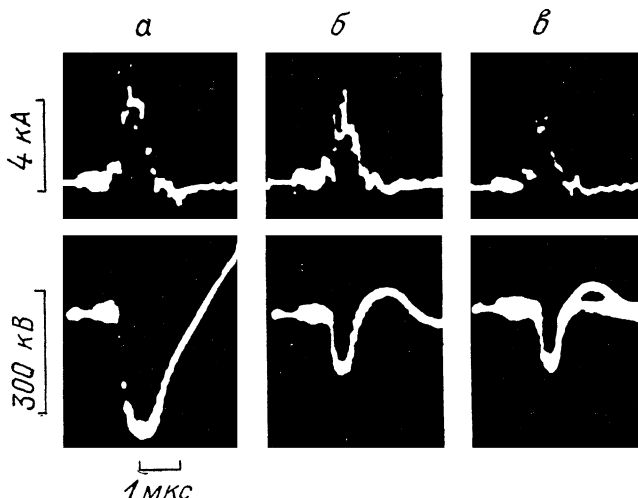


Рис. 2. Осциллограммы импульсов ускоряющего напряжения и тока ионного пучка по длине ИИНДУС.

а — инжектор, б — первая ускоряющая секция, в — вторая ускоряющая секция.

включенными навстречу друг другу, и достигало своего максимального значения в области «каспа» $B_{\text{макс}} \sim 10$ кГс. Ведущее магнитное поле B_0 , обеспечивающее транспортировку зарядово-нейтрализованных ионных пучков в области дрейфа, создавалось соленоидами, расположенными между ускоряющими зазорами, и достигало значения $B_0 \sim 10$ кГс. Рабочий газ (водород или дейтерий) подавался импульсным клапаном в предварительно откачанный анод-катодный зазор инжектора, где при включении магнитного поля и ускоряющего на-

применения газ ионизовался и образовывалась плазма, являющаяся источником ионов. При этом в ускорительном канале ИИНДУС создавалось неоднородное, спадающее по длине ускорения распределение плотности плазмы с градиентом $dn_e/dz \sim 10^{12} - 10^{13} \text{ см}^{-4}$, что приводило к подавлению пучково-плазменного взаимодействия [3, 4]. В данных экспериментах проводились измерения тока, энергосодержания и мощности пучков на выходе инжектора и ускоряющих секций. Для протонных пучков проводилась также регистрация мгновенных γ -квантов, образующихся в реакции $F^{19}(p, n)O^{16}$ при облучении протонами фторопластовых мишеней. а для пучков дейтронов измерялся выход нейтронов из мишеней, содержащих CD_2 , что позволило оценить количество дейтронов, ускоренных за импульс.

В результате проведенных экспериментов установлено, что пучки микросекундной длительности с током 3—4 кА и энергией инжекции 200—300 кэВ могут быть эффективно доускорены с помощью ИИНДУС до энергии 400—500 кэВ. При этом поток нейтронов на выходе ускорителя составил $3 \cdot 10^9$ нейтр./имп, а полное число дейтронов с энергией, превышающей 400 кэВ, достигало $5 \cdot 10^{15}$ ион/имп. На рис. 2 представлены осциллограммы импульсов ускоряющего напряжения на зазорах ИИНДУС и тока ионного пучка за время ускорения. Некоторое снижение тока на выходе первой ускоряющей секции (рис. 2, б), по-видимому, связано с недостаточно хорошим качеством пучка, формируемого данным инжектором, что приводит к необходимости уменьшения углового и энергетического разбросов ионов в инжекторе. Следует отметить, что в отличие от [7, 8], где ионы ускорялись в кольцевом канале с изолирующим радиальным магнитным полем, в данном случае пучки ионов формируются и доускоряются в односвязной области, содержащей изолирующий магнитный «касп», а ускоряющие зазоры являются по сути осевыми плазменными линзами [9]. При этом радиальная фокусировка ионных пучков в области дрейфа обеспечивается электрическим полем объемного заряда нейтрализующих пучков электронов, которые удерживаются в радиальном направлении ведущим магнитным полем. Это является одним из важных преимуществ данного метода ускорения по сравнению с традиционными, поскольку благодаря коллективной фокусировке в ускорителе ИИНДУС удается транспортировать килоамперные ионные пучки при умеренных значениях магнитного поля ($B_0 \sim 10$ кГс) и сравнительно невысокой энергии инжекции (\sim сотни кэВ).

Таким образом, в данной работе экспериментально показано доускорение мощных нейтрализованных по заряду ионных пучков в линейном индукционном ускорителе с коллективной фокусировкой и изолирующим магнитным полем типа «касп» в ускоряющих зазорах. Полученные результаты могут оказаться полезными при разработке сильноточных ускорителей ионов на большие энергии.

В заключение авторы благодарят Я. Б. Файнберга за интерес к работе и обсуждение результатов.

Литература

- [1] Dreik P. L., Burns E. J. T., Slutz S. A. et al. J. Appl. Phys., 1986, v. 60, Z 3, p. 878—897.
- [2] Кияшко В. А., Коляда Ю. Е., Корнилов Е. А., Файнберг Я. Б. Письма в ЖТФ, 1977, т. 3, № 23, с. 1257—1259.
- [3] Кияшко В. А., Корнилов Е. А., Коляда Ю. Е., Файнберг Я. Б. Письма в ЖТФ, 1979, т. 5, № 17, с. 1073—1077.
- [4] Keyashko V. A., Kornilov E. A., Kolyada Yu. E., Fainberg Ya. B. — Proc. 3 Intern. Conf. on high power electron and ion beam research and technology. Novosibirsk, 1979, v. 1, p. 97—102.
- [5] Михайловский А. Б. Теория плазменных неустойчивостей. М.: Атомиздат, 1977, т. 2, 360 с.
- [6] Кияшко В. А., Корнилов Е. А., Винокуров В. А. Письма в ЖТФ, 1984, т. 10, № 5, с. 264—267.
- [7] Морозов А. И., Лебедев С. В. В кн.: Вопросы теории плазмы. М.: Атомиздат, 1974, с. 247—381.
- [8] Хафрис С., Андерсон Р., Фримен Дж. и др. Атомная техника за рубежом, 1982, № 8, с. 37—38.
- [9] Кияшко В. А., Корнилов Е. А., Винокуров В. А. Тез. докл. Всес. семинара «Плазменная электроника». Харьков, 1983, с. 88—90.

Харьковский физико-технический институт АН УССР

Поступило в Редакцию
30 июня 1987 г.