

КОЛЛЕКТИВНОЕ УСКОРЕНИЕ ИОНОВ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ
СИЛЬНОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ЧЕРЕЗ
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КАНАЛЫ

А. В. Агафонов, А. Ш. Айрапетов, А. А. Коломенский,
Е. Г. Крастелев, Б. Н. Яблоков

УДК 621.384.6:539.107.3

Исследовано ускорение протонов и тяжелых ионов при транспортировке сильноточных электронных пучков (СЭП) с энергиями электронов 300–600 кэВ и токами до 100 кА в вакуумных каналах с диэлектрическими стенками (ВДК) разной геометрии.

При исследовании транспортировки СЭП в ВДК были зарегистрированы ионы, движущиеся в направлении распространения СЭП, с энергиями, в несколько раз превышающими энергию электронов СЭП /1–3/. Механизм транспортировки СЭП в ВДК заключается в частичной нейтрализации пространственного заряда пучка ионами, извлекаемыми из пристеночной плазмы электрическим полем этого заряда, и фокусирующем действии собственного магнитного поля СЭП. Плазма образуется в результате пробоя слоя адсорбированных на поверхности диэлектрика веществ (вода, углеводороды и т.п.), заряжаемого головной распадающейся частью пучка /1,2/. Ниже приведены результаты измерений токов и энергий ускоряемых ионов, образующихся при транспортировке СЭП через ВДК разной геометрии.

Эксперименты проводились в ФИАНе на сильноточном ускорителе "ДОН" /4/. СЭП с энергией электронов от 300 до 600 кэВ и током до 100 кА инжектировался через сетчатый анод с прозрачностью 0,5 в цилиндрический или конический ВДК. За ВДК установлена камера диаметром 40 см и длиной 30 см, а затем камера прелетного спектрометра (ПС) диаметром 10 см. На входе в ПС пу-

чок ионов очищался от электронов магнитным полем с индукцией 0,06 Т. Первый электрод ПС сделан из сетки с прозрачностью 0,7 и отстоит от анода на 55,5 см, второй электрод — сплошной, перехватывающий весь пучок. Расстояние между электродами ПС — 36 см. На втором электроде под углом 20° к оси пучка устанавливались трековые детекторы тяжелых ионов (лавсан, нитроцеллюлоза). Для анализа треков облученные детекторы протравливались в растворе NaOH в течение нескольких часов /5/. Ток пучка измерялся шунтами на входе в ВДК и ПС.

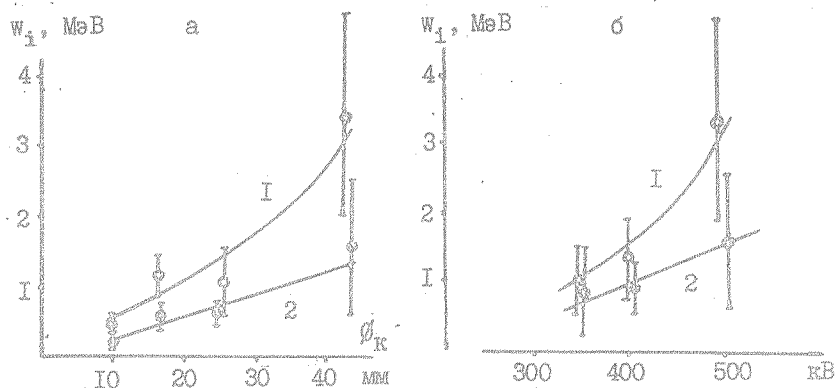
В экспериментах использовались катоды различного диаметра. При исследовании транспортировки СЭП в ВДК было показано /2/, что оптимальные условия транспортировки СЭП достигаются, когда диаметр инжектируемого пучка, который равен диаметру катода, близок к равновесному в канале транспортировки, определенному из расчетов, т.е. когда пучок согласован с каналом. При отклонении диаметра катода от оптимального ток пучка на выходе ВДК может быть промодулирован во времени из-за того, что в процессе осцилляций диаметра пучка относительно равновесного значения часть электронов может теряться на стенках канала. Поэтому представляло интерес исследовать влияние диаметра катода на параметры ускоренных ионов.

Модуляция пучка в данных экспериментах возникала не только в результате рассогласования диаметра катода и равновесного диаметра пучка. Как правило ток пучка превосходил критический ток сжатия в диоде. В результате пучок на входе в ВДК, хотя и имел диаметр близкий к оптимальному, но входил, фокусируясь на ось канала, что также могло приводить к осцилляциям диаметра пучка и модуляции тока из-за потерь электронов на стенках канала.

Результаты измерений показали следующее. Импульс ионного тока имел, как правило, несколько максимумов с полушириной 5 — 15 нс, и амплитудой тока 10 — 15 А на первом электроде ПС. Положение этих максимумов примерно соответствовало положению максимумов тока СЭП, измеренного перед первым электродом ПС. Ток ионов на втором электроде ПС был примерно на порядок меньше. Уменьшение тока ионов объясняется как развалом ионного пучка под действием поля собственного пространственного заряда, так и наличием большого углового разброса скоростей ионов. Численный расчет разлета ионов дает результаты, хорошо согласующиеся с

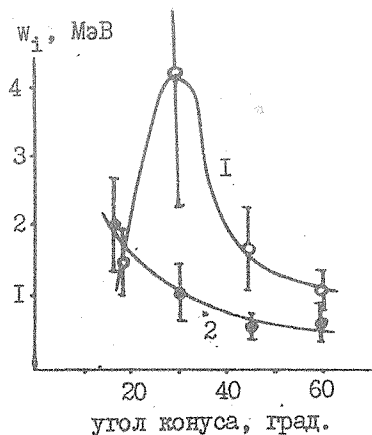
экспериментальными данными.

На рис. 1а показана зависимость энергии протонов, ускоренных в цилиндрическом ВДК диаметром 5 см и длиной 5 см, от диаметра катода (т.е. от диаметра инжектируемого пучка). Наибольшую энергию протоны получали при диаметре катода 4,4 см, который был близок к расчетному равновесному диаметру СЭП в ВДК /2,3/, соответствующему наиболее эффективной транспортировке. В этих условиях наблюдалась сильная зависимость максимальной энергии протонов на фронте ионного импульса от энергии электронов (рис. 1б). Энергия основной группы протонов, соответствующей первому максимуму ионного импульса, была в 2 - 3 раза ниже энергии протонов на фронте, а энергия протонов в последующих максимумах - еще ниже.

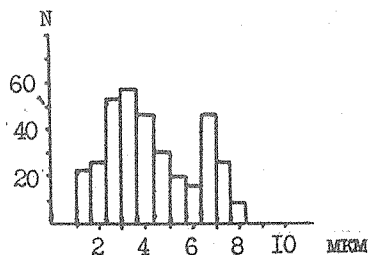


Р и с. 1. Зависимость энергии протонов от диаметра катода (а) и энергии электронов СЭП (б); 1 - по фронту импульса, 2 - по максимуму импульса. Цилиндрический ВДК диаметром 5 см и длиной 5 см

На рис. 2 показана зависимость энергии протонов для конусного ВДК от угла при его вершине. Диаметр основания конуса выбирался таким же, как диаметр цилиндрического ВДК и составлял 5 см. Для катода диаметром 4,4 см оптимальным оказался угол 30° , при этом максимальная энергия протонов примерно на порядок превышала энергий электронов СЭП, а ток ионов достигал 30 - 40 А.



Р и с. 2. Зависимость энергии протонов от угла конусного ВДК для катода диаметром 4,4 см (1) и 1,7 см (2)



Р и с. 3. Распределение по длине треков тяжелых ионов в лавсане. Длина трека в лавсане 8 мкм соответствует энергиям 0,4 МэВ/нуклон для ионов С и 0,2 МэВ/нуклон для ионов Fe

На рис. 3 показано распределение треков тяжелых ионов, оставленных в лавсане, по их длине. Ионы ускорялись в конусе с углом 30° . Видно, что распределение имеет два максимума. Эти максимумы соответствуют ионам С, N, Fe с энергиями 0,2 и 0,4 МэВ/нуклон для С, и 0,1 и 0,2 МэВ/нуклон для Fe. Этим энергиям отвечают скорости движения ионов, соответствующих второму и следующему максимумам импульса ионного тока. Источником тяжелых ионов

может служить как пристеночная плазма в ВДК, так и плазма, образующаяся на металлической сетке — аноде диода.

Полученные результаты показывают возможность ускорения в ВДК до 10^{12} протонов за импульс до энергий, на порядок превышающих энергию электронов СЭП; до 10^{13} протонов за импульс с энергией, близкой к энергии электронов; а также ускорения тяжелых ионов до энергий 0,4 МэВ/нуклон. Число тяжелых ионов было не менее 10^9 за импульс.

Поступила в редакцию
6 апреля 1981 г.

Л и т е р а т у р а

1. J. A. Pasour et al., III Int. Conf. on Collective Meth. of Accel., Laguna Beach, p. 317 (1978).
2. A. V. Agafonov et al., III Int. Topical Conf. on High Power Electron and Ion Beams, Novosibirsk, v. 2, p. 556 (1979).
3. А. В. Агафонов и др., Препринт ФИАН № 183, М., 1978 г.
4. Новости термоядерных исследований в СССР, № 3(9), 8 (1978).
5. Х. Абдулаев и др., ПТЭ № 6, 64 (1968).