

## КОЛЛЕКТИВНОЕ УСКОРЕНИЕ ИОНОВ РЕЛЯТИВИСТСКИМ ЭЛЕКТРОННЫМ ОБЛАКОМ

А.В.Бурдаков, В.С.Койдан, А.И.Рогозин,  
В.В.Чикунов

Сообщается о первых результатах экспериментов по коллективному ускорению ионов облаком релятивистских электронов, формирующимся у тонкой фольги при инъекции сильноточного релятивистского электронного пучка в вакуум.

В работах [1, 2] теоретически и экспериментально было исследовано формирование плотного облака релятивистских электронов при инъекции релятивистского электронного пучка (РЭП) со сверхкритическим током через тонкую фольгу в вакуум. Если у поверхности фольги образуется плазменный слой, то, как отмечено в работах [2, 3], может происходить коллективное ускорение ионов за счет энергии накопленных релятивистских электронов. В работе сообщается о первых результатах экспериментов на установке "КРАБ" по ускорению ионов таким способом.

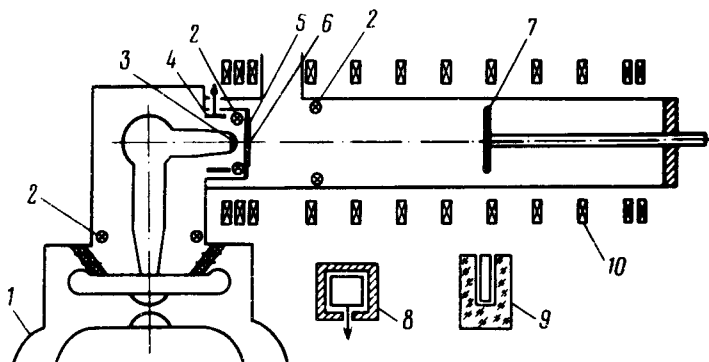


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – ускоритель, 2 – пояса Роговского, 3 – катод, 4 – емкостный делитель, 5 – анодная фольга, 6 – диэлектрическая пленка, 7 – графитовый коллектор, 8 – время-пролетный детектор нейтронов, 9 – активационный детектор, 10 – катушки магнитного поля

Схема эксперимента приведена на рис. 1. Релятивистский электронный пучок ( $I_{\text{макс}} \approx 20$  кА,  $E_{\text{макс}} \approx 1$  МэВ,  $\tau \approx 50$  нсек, диаметр = 3см) инжектируется в вакуумную камеру через фольги 5, 6. Фольга 5 из алюминия является анодной фольгой ускорителя. На расстоянии несколько мм от нее расположена диэлектрическая пленка 6 (фторопласт толщиной 6 мкм, на поверхность которого нанесен слой дейтерированного полиэтилена  $(\text{CD}_2)_n$  толщиной  $\sim 10$  мкм). Электронный пучок и ускоренные ионы принимаются подвижным графитовым коллектором 7, соединенным с анодом ускорителя обратными токопроводами. Диод

ускорителя и вакуумная камера помещены во внешнее продольное магнитное поле 10 кЭ.

В экспериментах ускоренные дейтоны регистрируются по продуктам ядерной реакции  $^{12}\text{C}(\alpha, n)^{13}\text{N}(\beta^+)^{13}\text{C}$ , протекающей в графитовом коллекторе. Число ядер  $^{13}\text{N}$ , являющихся источником позитронов, определяются с помощью двух сцинтилляционных счетчиков с кристаллом  $\text{NaI(Tl)}$  по аннигиляционным  $\gamma$ -квантам методом совпадений. Полное число нейтронов, возникающих в реакции, определяется активационным методом. Радиоактивным индикатором служит серебряная фольга, помещенная в парафиновый замедлитель нейтронов, имеющий геометрию "всеволнового" счетчика [4]. Перед экспериментом детекторы калибровались радиоактивными источниками. Импульс нейтронов регистрируется также время-пролетным детектором, расположенным на расстоянии 4 м от графитового коллектора. Регистрация ведется по протонам отдачи в пластмассовом сцинтилляторе, который помещен в свинцовый контейнер, ослабляющий жесткое тормозное излучение ускорителя. Измерение времени пролета нейтронов от коллектора до детектора позволяет определить их энергетический спектр, а затем оценить и спектр энергий дейтонов. Другой метод определения энергии ускоренных дейтонов основан на измерении относительной активности отдельных участков графитового коллектора, закрытых алюминиевыми фольгами различной толщины (метод фильтров). Измеряемая радиоактивность графита сравнивается с расчетной для различных значений энергии дейтонов, проходящих через фильтры. Измерения проводятся с помощью дифференциального коллектора, который используется и для определения угловой расходимости пучка ускоренных дейтонов.

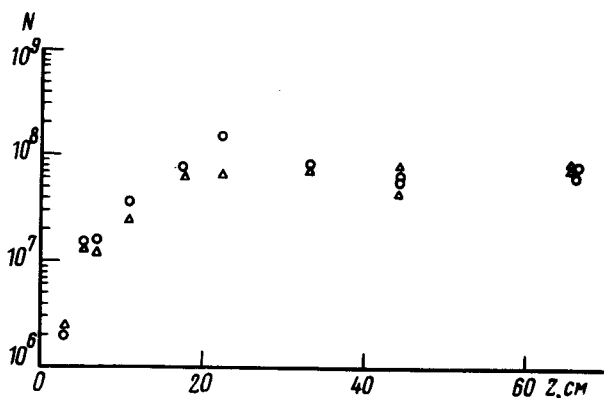


Рис. 2. Зависимость числа ядерных реакций  $N$  от расстояния между графитовым коллектором и анодной фольгой: ● — активационный детектор, ▲ — счетчик  $\gamma$ - $\gamma$  совпадений

Основные результаты эксперимента заключаются в следующем. При инъекции РЭП с током 20 кА, превышающим предельный вакуумный ток (4 кА), вблизи анодной фольги ускорителя образуется облако осциллирующих релятивистских электронов. Прохождение РЭП через диэлектрическую пленку приводит к образованию вблизи ее поверхности плазменного слоя [5]. Под действием газокINETического давления облака этот слой расширяется и происходит ускорение ионов. По мере расширения слоя энергия ионов должна возрастать. На рис. 2 показана зависимость

числа радиоактивных ядер  $^{13}\text{N}$  (треугольники) и полного числа нейтронов (точки) от расстояния  $z$  между коллектором и анодной фольгой ускорителя. Видно, что число ядерных реакций, инициируемых дейтонами, растет при изменении  $z$  от 3 до 20 см и достигает  $10^8$  за импульс, а затем остается практически неизменным. Анализ ускоренных дейтонов по энергиям методом фильтров, а также с помощью время-пролетного метода показывает, что при  $z < 10$  см регистрируются ионы, энергия которых не выше начальной энергии электронов пучка. С увеличением расстояния  $z$  происходит возрастание энергии ускоренных дейтонов. При  $z \approx 20 + 30$  см спектр дейтонов простирается до энергии  $4 + 7$  МэВ. Сигнал с время-пролетного детектора при  $z = 20$  см показан на рис. 3. После первого пика, вызванного  $\gamma$ -излучением ускорителя, наблюдается сигнал, обусловленный нейтронами. Этот сигнал и позволяет восстановить энергетический спектр как нейтронов так и дейтонов. Основная часть ускоренных дейтонов имеет энергию  $\leq 1$  МэВ. Около 10% дейтонов приобретают большие энергии, и их энергетический спектр простирается вплоть до  $4 + 7$  МэВ. Характерный масштаб, на котором происходит ускорение дейтонов, составляет  $20 + 30$  см. Общее число дейтонов с энергией  $\geq 0,4$  МэВ составляет  $10^{14}$  частиц за импульс. При использовании в анодном узле в качестве диэлектрической пленки полиэтилена толщиной 10 мкм было зарегистрировано  $2 \cdot 10^{14}$  ускоренных протонов за импульс. Форма импульса тока протонов была определена по мгновенному  $\gamma$ -излучению из фторопластовой мишени методом, подобным описанному в [6]. Величина максимального тока протонов достигает 1,5 кА, что указывает на высокую эффективность ускорения ионов, которая значительно выше, чем при инжекции РЭП в газ [7], и сравнима с эффективностью, достигнутой в диодах Люса [8] и рефлексном тетроде [5, 9].

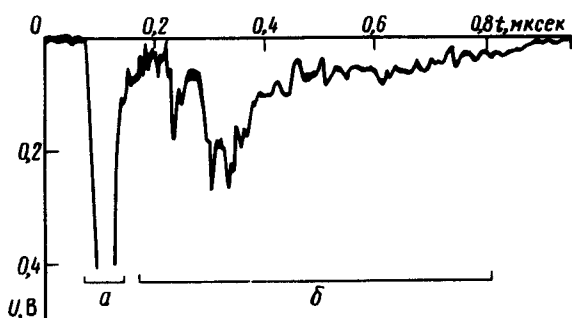


Рис. 3. Оциллограмма сигнала с время-пролетного нейтронного детектора: а — жесткое рентгеновское излучение ускорителя, б — нейтронный сигнал

Для определения угловой расходимости пучка ускоренных ионов измерялось изменение радиального профиля активности графитовой мишени в зависимости от расстояния  $z$ . Установлено, что поперечный размер области графитовой мишени, обладающей активностью, незначительно превышает диаметр РЭП, а угловая расходимость полученного ионного пучка составляет  $2 + 3^\circ$ .

Таким образом, в работе экспериментально показана возможность коллективного ускорения ионов с высокой эффективностью облаком осциллирующих релятивистских электронов.

Авторы искренне признательны Д.Д.Рютову за интерес к работе и полезные обсуждения, А.В.Аржанникову, В.В.Конюхову и В.Н.Ротаеву за помощь при проведении эксперимента.

Институт ядерных исследований  
Академии наук СССР  
Сибирское отделение

Поступила в редакцию  
22 ноября 1979 г.

### Литература

- [1] Д.Д.Рютов, Г.В.Ступаков. Физика плазмы, 2, 566, 1976.
  - [2] А.В. Аржанников, А.В.Бурдаков, В.С.Койдан, Д.Д.Рютов. Письма в ЖЭТФ, 24, 19, 1976.
  - [3] Д.Д.Рютов, Г.В.Ступаков. Физика плазмы, 2, 767, 1976.
  - [4] A.O.Hanson, J.L.McKibben. Phys. Rev., 72, 673, 1947.
  - [5] J.A.Pasour, R.A.Mahaffey, J.Golden, C.A.Kapetanacos. Phys. Rev. Lett., 40, 448, 1978.
  - [6] J.Golden, R.A.Mahaffey, J.A.Pasour, C.A.Kapetanacos. Rev. Sci. Instrum., 49, 1384, 1978.
  - [7] А.А.Коломенский, В.М.Лихачев, И.В.Синильщикова, О.А.Смит, В.Н.Иванов. ЖЭТФ, 68, 51, 1975.
  - [8] O.Zucker, J.Wyatt, H.Sahlin, J.S.Luce, B.Freeman, R.Gullickson, Proc. Third Int. Conf. on Collective Method of Acceleration, Univ. of California, Irvine, 1978.
  - [9] J.Golden, C.A.Kapetanacos. Appl. Phys. Lett., 28, 3, 1976.
-