

12

Формирование кольцевых структур пучка при коллективном ускорении ионов в системе с диэлектрическим анодом

© В.С. Лопатин, Г.Е. Ремнев[†], А.А. Мартыненко

Национальный исследовательский Томский политехнический университет
[†] E-mail: remnev06@mail.ru

Поступило в Редакцию 23 декабря 2016 г.

Представлены результаты экспериментального исследования коллективного ускорения протонов и дейтронов в электронном пучке из плазмы, образуемой на поверхности диэлектрической вставки анода. В исследованиях использован импульсный электронный ускоритель с ускоряющим напряжением до 1 MV, током до 40 kA, длительностью импульса 50 ns. Снижение длительности фронта ускоряющего напряжения, оптимизация диодного узла и области дрейфа обеспечили формирование нескольких кольцевых образований электронного пучка. В кольце диаметром 4.5 cm и шириной 0.2 cm наблюдалось до 50% наведенной в медной мишени радиоактивности. Обнаружена связь формирования высокой плотности энергии в кольцевых отпечатках и аксиальной компоненты собственного магнитного поля электронного пучка с повышением эффективности ускорения наиболее интенсивной группы ионов.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.10.44616.16632

В результате экспериментальных исследований ускорения ионов релятивистскими электронными пучками (РЭП) [1,2] лучшие результаты были получены в системе с диодом Люса [3], содержащим острый катод и диэлектрическую вставку в аноде. Эффективное ускорение ионов наблюдалось только при токе РЭП, превышающем предельный ток в вакууме. Установлена определенная пропорциональная зависимость максимальной энергии ионов E_{\max} от величины ускоряющего напряжения. „Длина ускорения“, как правило, не превышала 10 cm [2], наблюдалось снижение энергии ионов E_p при увеличении длины эквипотенциальной области дрейфа электронного пучка [4]. В вакуумной камере с лайнерами–линзами [5] наблюдалось

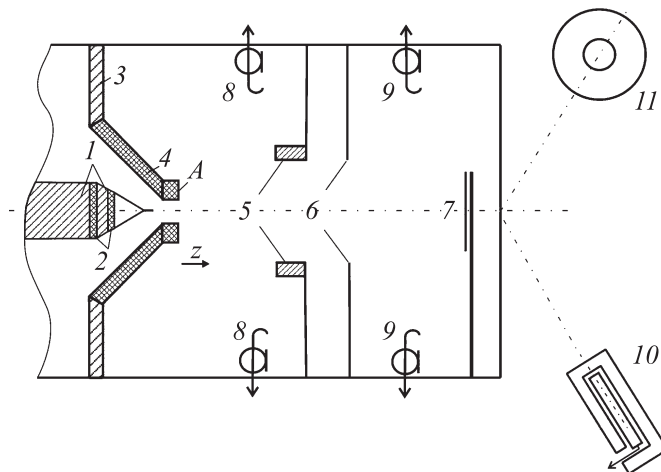


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 — катод, 2 — диэлектрические вставки; 3, 4 — анод; А — сменная вставка; 5 — линза, 6 — экран, 7 — коллектор или мишень, 8, 9 — магнитные зонды, 10 — сцинтилляционный детектор, 11 — активационный детектор нейтронов.

увеличение энергии ионов. В работе [6] обсуждались возможности управления синхронизмом перемещения виртуального катода с ионами с целью увеличения энергии ионов. В большинстве экспериментальных работ обнаружено наличие двух групп ускоренных протонов: низкоинтенсивной (10^{10} – 10^{12} частиц) с максимальной энергией E_{\max} до $50 eV_0$ и более интенсивной (10^{13} – 10^{14} частиц) с энергией 2 – $3 eV_0$ (e — заряд электрона, V_0 — ускоряющее напряжение). До настоящего времени механизмы ускорения ионов остаются невыясненными. Имеет место противоречивость данных в работах разных авторов. Для управления процессом коллективного ускорения ионов требуются дополнительные экспериментальные исследования, чему и посвящена данная статья.

Схема экспериментов представлена на рис. 1. Рабочая камера выполнена в виде медного цилиндра с диаметром и длиной 30 см. В отдельных экспериментах присоединялся патрубок длиной 40 см и диаметром 9 см. Рабочее давление $(1$ – $2) \cdot 10^{-4}$ Торр. Эксперименты

проведены с коническим катодом 1, анодом с диэлектрической центральной вставкой из дейтерированного полиэтилена в виде полого конуса 2. В работе использован электронный ускоритель с ускоряющим напряжением $V_0 \leq 1$ MV, током пучка $I_e = 30\text{--}40$ kA, длительностью импульса $t = 50$ ns на полувысоте. Диэлектрическая часть анода 4 выполнена из фторопласта с большим диаметром конуса до 8 см. Для ускорения протонов или дейтронов устанавливалась вставка А из обычного или дейтерированного полиэтилена. В этой геометрии диода практически весь ток электронов после пробоя поверхности анодного диэлектрика инжектировался сквозь анодное отверстие и многократно превосходил предельный ток в вакууме.

Воспроизводимость ускорительного процесса и предварительная оценка энергии ускоренных ионов проводились по нейтронному выходу Y_n , измеряемого после каждого срабатывания серебряно-активационным детектором 11, из литиевой, медной, алюминиевой и в отдельных случаях из графитовой мишеней. Собственные магнитные поля (СМП) электронного пучка B_φ и B_z измерялись интегрирующими многовитковыми зондами 8, 9 с постоянной времени $1.6 \mu\text{s}$. Зонды устанавливались на боковых окнах вакуумной камеры и были защищены металлическими экранами от попадания электронов пучка.

Азимутальная симметрия РЭП и плазмы многоканального поверхностного пробоя анодного диэлектрика достигались путем обострения фронта ускоряющего напряжения диода предимпульсным газовым разрядником и разрядником с пробоем по поверхности диэлектрика. Сравнение нейтронных выходов из медной и графитовой мишеней, установленных на расстоянии $Z = 10$ см, привело к выводу об ускорении $5 \cdot 10^{12}$ протонов с энергией $E_p = 25$ MeV. Активационные измерения были затруднены значительным испарением мишени при воздействии пучка. Максимальная энергия снижалась с удалением мишени от анода до $E_{p \max} = 16$ MeV при $Z = 20$ см. Ускорение протонов до $E_p = 6\text{--}6.5$ MeV в количестве $N_p = (2\text{--}3) \cdot 10^{14}$ и дейтронов до $E_{d \text{mid}} = 4\text{--}4.5$ MeV, $N_d = (3\text{--}4) \cdot 10^{14}$ измерено при $Z = 34$ см методом активации стопы фольг в реакциях $^{63}\text{Cu}(p, n)^{63}\text{Zn}$ и $^{27}\text{Al}(d, p)^{28}\text{Al}$. Вычисленный суммарный продольный импульс ионов превышал импульс РЭП в 4–8 раз, что предполагает передачу импульса в продольных осцилляциях электронов. В многократной передаче импульса могла участвовать часть электронов, не выпавшая на стенки камеры, удерживаемая B_z -компонентой СМП. Подобие осциллограмм зондов

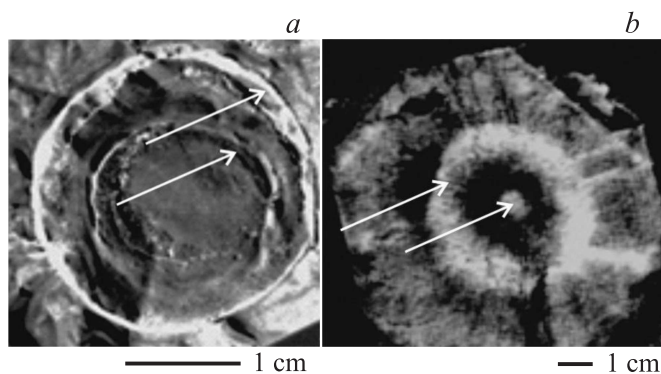


Рис. 2. Медные мишени, установленные на расстоянии: *a* — $Z = 10$ см и *b* — 40 см. Стрелки указывают на повышенную плотность энергии в отпечатках.

V_z -поля и ионных токов на коллекторах, свидетельствующее о связи явлений формирования V_z -поля и ускорения ионов, отмечалось ранее [7].

В электронном пучке, инжектированном в анодное отверстие, при его дальнейшем распространении выделялось до 4 концентрических зон с различной плотностью энергии, наблюдаемых по повреждению поверхности металлических и диэлектрических мишеней. В условиях стабильного ускорения ионов эти зоны имели вид замкнутых колец.

После прохождения анодного отверстия и захвата ионов из плазмы электронный пучок уже включал ионы, что позволило его рассматривать как электрон-ионный пучок. Условия стабилизации ускорения ионов совпадали с условиями образования колец высокой плотности тока на мишенях. Число и диаметры колец, интенсивность потока энергии в них и радиальная ширина этих отпечатков зависели от размеров и материала анодной вставки, величины анод-катодного зазора, наличия линз за анодом. Изменения конфигурации отпечатков сопровождалось изменением величины V_z -компоненты СМП. На рис. 2 представлены медные мишени с участками повреждений. Заметны несколько кольцевых зон с разным уровнем плотности энергии электрон-протонного пучка (отмечены стрелками). По мере удаления мишеней от анода их

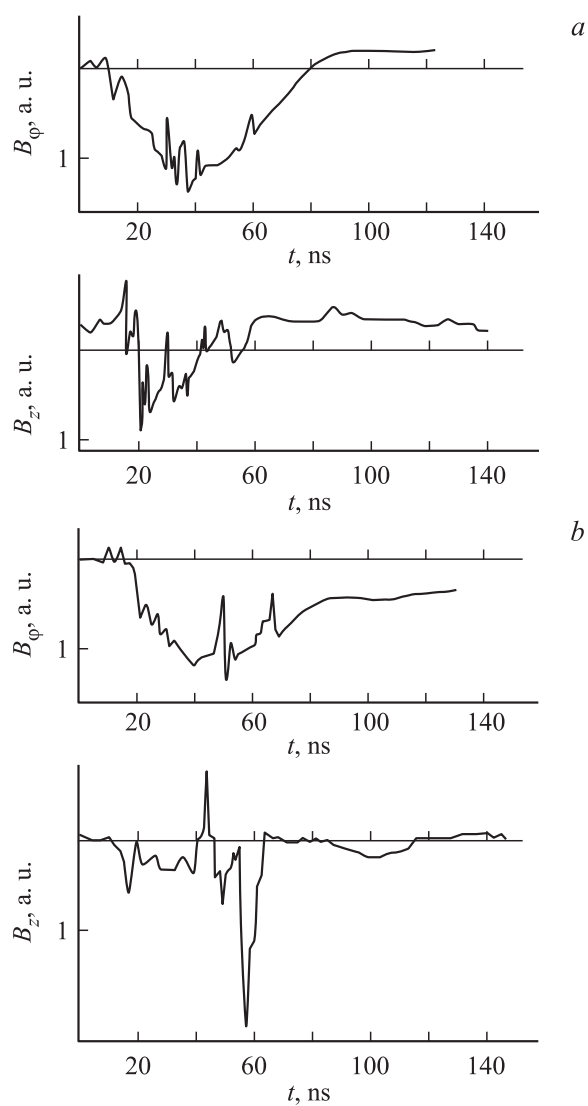


Рис. 3. Собственные магнитные поля (зонд 9): *a* — в камере без линзы; *b* — позади линзы.

диаметр возрастал, между зонами испарения появлялись области без заметного нагрева. Необходимо отметить, что формирование кольцевого отпечатка наблюдалось и в работе [8], где размер кольца определялся диаметром катода.

При размещении линзы на расстоянии 8–10 см от анода амплитуда сигнала V_z -компоненты СМП возрастала более чем в 2 раза на зондах 8 и 9. Из сравнения показаний V_φ -зондов на рис. 3, *a* и *b* видно, что амплитуда тока РЭП изменялась незначительно. Усиленная в результате взаимодействия с линзой V_z -компонента создает магнитную пробку, и РЭП распространяется вперед после ее спада (рис. 3, *b*).

Измеренная плотность радиоактивных ядер ^{63}Zn в области узких кольцевидных отпечатков, появляющихся на мишени после установки линзы, была до 15 раз выше, чем в остальной части. Так, в кольце диаметром 4.5 см и шириной менее 0.2 см наблюдалось 50% всей наведенной радиоактивности медной мишени, расположенной на расстоянии $Z = 34$ см от анода.

Протоны с $E_{\max} \geq 46$ MeV, $N = (2-3) \cdot 10^{10}$ в импульсе длительностью 5 ns двигались вблизи оси системы и регистрировались коллектором на расстоянии 60 см от анода после прохождения медного экрана толщиной 3.5 mm. Величина E_{\max} определялась также по окраске щелочно-галогидных кристаллов LiF и KCl при возбуждении протонами М-центров.

Совпадение количества и относительной амплитуды максимумов V_z -компоненты и протонных импульсов на коллекторах [7], формирование кольцевых отпечатков на мишенях, повышенная плотность радиоактивности кольцевых зон указывают на ускорение основного количества ионов в нескольких трубчатых образованиях, поступающих на мишень последовательно по времени. Представляется, что в [4] и в работах других авторов, определявших „длину ускорения“, перемещение мишени могло приводить к изменению V_z -компоненты СМП, что изменяло условия ускорения ионов.

Таким образом, в данной работе установлена связь трубчатых структур электрон-ионного пучка с ускорением основной группы ионов. Их возникновение и распространение в вакуумированной камере тесно связано с собственными магнитными полями пучка.

Данная работа поддержана грантом Российского научного фонда № 14-19-00439.

Список литературы

- [1] *Плютто А.А., Суладзе К.В., Рыжков В.Н.* // Письма ЖЭТФ. 1967. Т. 6. С. 540–541.
- [2] *Плютто А.А.* Ускорение ионов в электронных пучках. Саратов, 2007.
- [3] *Luce J.S., Sahlin H., Crites N.R.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1973. NS-20. P. 336–340.
- [4] *Bistritscy V.M. et al.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1979. V. 26. N 3. P. 4248–4250.
- [5] *Zorn G.T., Kim H., Boyer C.N.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1975. NS-22. P. 1006.
- [6] *Дубинов А.Е., Корнилова И.Ю., Селемир В.Д.* // УФН. 2002. Т. 172. № 11. С. 1225–1248.
- [7] *Didenko A.N., Logachev E.I., Lopatin V.S., Remnev G.E.* // Proc. XI Intern. Simp. Dich. and Electr. Insul. in Vacuum. Berlin, GDR, 1984. P. 385–389.
- [8] *Челпанов В.И., Голяков П.И., Корнилов В.Г.* и др. // ЖТФ. 2009. 79(1). P. 144.