_____ ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ____ ТЕХНИКА

УДК 621.384.6:539.12.04

ИОННЫЙ ДИОД С МАГНИТНОЙ САМОИЗОЛЯЦИЕЙ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ИОННЫХ ПУЧКОВ АЛЮМИНИЯ

© 2020 г. В. И. Шаманин^{а,*}, Г. Е. Ремнёв^а, В. А. Тарбоков^а

^а Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Исследовательская школа физики высокоэнергетических процессов Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 30

*e-mail: shamanin@tpu.ru

Поступила в редакцию 18.12.2019 г. После доработки 12.02.2020 г. Принята к публикации 18.02.2020 г.

Представлены результаты исследования генерации импульсных пучков, состоящих из ионов алюминия, углерода и протонов. Ионный пучок образуется при приложении к аноду вакуумного диода субмикросекундного импульса высокого напряжения в момент существования в ускоряющем промежутке плотной взрывоэмиссионной плазмы. Плазма в диоде создается дополнительным высоковольтным импульсом, предшествующим основному, за счет взрывной эмиссии на поверхности потенциального электрода. Амплитуда основного, ускоряющего импульса в экспериментах составляла 200 кВ, длительность 100 нс на полувысоте. Для диагностики состава пучка использовались времяпролетная методика на основе коллимированного цилиндра Фарадея и магнитный спектрометр.

DOI: 10.31857/S0032816220040175

ВВЕДЕНИЕ

Основные проблемы повышения эффективности генерации импульсных мощных ионных пучков (м.и.п.) связаны с решением двух задач: созданием однородной плазмы в ускоряющем промежутке (с плотностью, как правило, более 10^{14} см⁻³) и повышением доли ионной компоненты в токе пучка, ограниченной законом Чайльда– Ленгмюра–Богуславского [1].

Первая задача решается путем использования в качестве источника плазмы пробоя по поверхности диэлектрического анода [2], инжекции плазмы в ускоряющий промежуток от внешнего источника [3, 4], либо инжекции газа с последующим его пробоем при подаче ускоряющего напряжения [5] или при ионизации вихревым электрическим полем [6].

В данной работе использовалась взрывоэмиссионная плазма, формируемая на потенциальном электроде вакуумного диода дополнительным импульсом, предшествующим основному [7, 8]. Такой подход использован в ускорителе ТЕМП с графитовым анодом [9].

Вторая задача решается за счет увеличения времени нахождения электронов в диодном зазоре при использовании отражательных систем [10, 11], диодов с магнитной изоляцией [12], низкоимпедансных диодов на основе пинчевания электронного пучка [13], комбинацией последних двух [14].

Повышение частоты следования импульсов для использования ускорителя в практических целях требует, в том числе, более высокого темпа отвода тепла из диодной области. Выполнение анода из металла с высоким коэффициентом теплопроводности решает такую задачу. В качестве материала анода мы использовали сплав на основе алюминия, что обеспечило формирование пучка ионов, включающего ионы алюминия — материала анода. Ранее на ускорителе МУК-М при использовании анода из алюминия были получены пучки с содержанием ионов Alⁿ⁺ при работе полоскового диода с внешним магнитным полем [7].

Целью данного исследования является разработка ионного диода с магнитной самоизоляцией, обеспечивающего генерацию многокомпонентного ионного пучка со значительной долей ионов алюминия, не требующего дополнительных устройств для формирования анодной плазмы в ускоряющем промежутке и внешних источников изолирующего импульсного магнитного поля.

Устойчивый режим формирования многокомпонентного пучка со значительной долей ионов алюминия обеспечивается за счет действия дополнительного (предварительного) плазмообразующего импульса, предшествующего основному



Рис. 1. Схема ускорителя. 1, 7 – газовые неуправляемые разрядники; 2, 6, 8, 12 – высоковольтные изоляторы; 3, 9 – делители напряжения; 4, 5 – электроды д.ф.л.; 10 – объем для размещения зарядной индуктивности и делителя для измерения ускоряющего напряжения; 11 – пояс Роговского; 13 – секционный анод; 14 – секционный катод. МИД – магнитно-изолированный диод.

ускоряющему импульсу, и формируемого тем же генератором импульсов напряжения.

В режиме работы с самоизоляцией диодного промежутка собственным током диода пучки ионов алюминия получены впервые.

НАНОСЕКУНДНЫЙ ГЕНЕРАТОР И ИОННЫЙ ДИОД

Схема ускорителя ТЕМП [8, 14] на основе диода с магнитной самоизоляцией представлена на рис. 1.

Наносекундный генератор на основе двойной формирующей линии (д.ф.л.) обеспечивает режим формирования сдвоенных разнополярных импульсов напряжения [8]. В экспериментах за-



Рис. 2. Конструктивное исполнение *МИД.* 1 – секционный катод; 2 – секционный анод.

рядка внутренней линии д.ф.л. осуществлялась непосредственно через цепь диода [15].

Эксперименты по формированию многокомпонентных ионных пучков проводились в режиме генерации наносекундным генератором разовых импульсов, что обусловлено необходимостью поддержания на одном и том же уровне вакуумных условий и относительно небольшой мощностью зарядного устройства первичного накопителя энергии. В качестве первичного накопителя энергии в ускорителе ТЕМП используется восьмиступенчатый генератор Маркса.

На рис. 2 представлено конструктивное исполнение ионного диода с магнитной самоизоляцией и металлическим анодом. Разработанный ионный диод имеет фокусирующую геометрию и представляет собой разборную систему из отдельных пластин. Модульность такой конструкции позволяет производить частичную замену пластин ввиду их неравномерного износа, комбинировать несколько материалов в одном электроде и соответственно влиять на процессы образования плазмы, состав м.и.п. и срок службы диода при его непрерывной работе.

Катод набран из пластин толщиной 1 мм, механически стянутых между собой через металлические шайбы, толщина которых определяет расстояние между соседними пластинами. В наших экспериментах ширина шайб составила 4 мм.

Анодная сборка включала в себя 8 секций, каждая шириной 10 мм, механически стянутых между собой так, чтобы образовывалась единая изогнутая под заданный радиус поверхность. Элементы сборки катода были изготовлены из нержавеющей стали, а анодные секции — из сплава на основе алюминия.



Рис. 3. Осциллограммы ускоряющего напряжения U, полного тока диода I и плотности ионного тока J.

Высокая электро- и теплопроводность анода, выполненного из сплава на основе алюминия, обеспечивает возможность работы на более высокой частоте следования импульсов. Анод, выполненный из хорошо электропроводящего материала, экранирует магнитный поток, создаваемый током, протекающим по катоду в течение длительности импульса ускоряющего напряжения. Это определяет более высокую напряженность магнитного поля в промежутке анод-катод [12], обеспечивающего магнитную изоляцию электронного потока.

Необходимо также отметить, что исполнение анода в виде отдельных пластин обеспечивает более низкий порог по напряжению формирования плазмы на первом вспомогательном импульсе напряжения за счет увеличения напряженности электрического поля на кромках в областях стыков секций анода. Площадь активной поверхности анода составила ~0.018 м². Величина промежутка анод-катод изменялась вдоль длины поверхности анода и варьировалась в диапазоне 8–11 мм.

УСТРОЙСТВА И СРЕДСТВА ДИАГНОСТИКИ

Для контроля выходных амплитудно-временных параметров импульса напряжения на потенциальном электроде и импульса полного тока использовались пояс Роговского и жидкостные делители напряжения [16]. Для контроля состава м.и.п. использовался коллимированный цилиндр Фарадея, который располагался на мишенном узле, в фокальной плоскости диодной системы, на удалении от поверхности анода ~140 мм. Входной коллиматор магнитного спектрометра имеет две апертуры, расположенные на удалении 100 мм друг от друга, диаметром 1 мм и 100 мкм соответственно. Магнитное поле создают два постоянных неодимовых магнита прямоугольной формы $50 \times 20 \times 10$ мм. Среднее значение индукции магнитного поля спектрометра составляет 3.5 кГс при расстоянии между полюсами магнитов 18 мм. Для проявления треков, оставленных ионным пучком на пластинах пластика CR-39, детектор после воздействия м.и.п. подвергался травлению в растворе каустической соды.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Оценка параметров ионного пучка проводилась по полученным осциллограммам ускоряющего напряжения, полного тока диода и плотности ионного тока в области расположения коллимированного цилиндра Фарадея. Типичная осциллограмма из серии последовательных импульсов приведена на рис. 3. Время отсчитывается от начала плазмообразующего импульса, который на данной осциллограмме не приведен.

Анализ состава пучка и количественного соотношения его компонент основывался на времяпролетной методике (см., например, [1]): разные скорости ионов, отличающихся по отношению заряда к массе q/m, приводят к тому, что ионы достигают коллектора коллимированного цилиндра Фарадея за разные промежутки времени. Результаты анализа осциллограмм сопоставлялись с полученными треками на детекторе CR-39 магнитного спектрометра. Координаты трековых отпечатков, оставленных ионами пучка на детекторе



Рис. 4. Трековый детектор CR-39 после травления (**a**) и наложенные на него координаты расчетного положения треков детектируемых ионов (**б**).

CR-39, подтвердили содержание значительной доли ионов Al⁺ в м.и.п.

На рис. 46 белыми линиями выделены области (интервалы), в которых согласно проведенным расчетам должны находиться треки указанных типов ионов при индукции отклоняющего магнитного поля 3.5 кГс. Экспериментально зафиксированные треки как для нейтральных, так и для отклоненных полем частиц образуют последовательность пятен, находящихся в пределах расчетных областей (интервалов).

На осциллограмме (рис. 3) отмечены временные промежутки (для ионов C⁺⁺; C⁺; Al⁺⁺; Al⁺), отсчитываемые от фронта и спада импульса ускоряющего напряжения и соответствующие временам пролета соответствующих ионов с энергией 150 кэВ от диода до коллектора цилиндра Фарадея. Отсчет времени пролета ионов от момента, когда ускоряющее напряжение принимает значение 150 кВ, обоснован тем, что не менее 75% от общего количества частиц м.и.п. имеют энергию в интервале 150–200 кэВ и ускоряются в течение временного промежутка 560–630 нс, внося основной вклад в величину полезного сигнала плотности ионного тока J.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная конструкция ионного диода, работающего в режиме самоизоляции ускоряющего промежутка собственным магнитным полем, позволила получить импульсные сильноточные пучки, включающие в свой состав ионы алюминия Al⁺.

Амплитудное значение плотности ионного тока в геометрическом фокусе анода достигает значения 200 А/см². Среднее значение плотности ионного тока в течение импульса, регистрируемого коллимированным цилиндром Фарадея, составляет около 100 А/см². Распределение плотности ионного тока в горизонтальном поперечном направлении от оси пучка удовлетворительно описывается соотношением $J(r) \approx J_{\text{max}}[1 - 0.5(r/r_0)^2]$, где $r_0 \approx 20-25$ мм. Доля ионной составляющей в полном токе диода, таким образом, находится в пределах 14–17%.

Анализ полученных экспериментальных результатов показал, что доля ионов алюминия в многокомпонентном пучке достигает 30%. Помимо ионов Al⁺ в составе ионного пучка содержались ионы углерода и протоны.

Более 70% энергии м.и.п. переносится ионами с энергией в интервале 150–200 кэВ при ускоряющем напряжении 200 кВ и длительности задержки между основным и плазмообразующим импульсами 550 нс.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Разработка ионного диода с магнитной самоизоляцией и исследования по генерации мощных ионных пучков проводились в Томском политехническом университете в рамках программы повышения конкурентоспособности ТПУ, проект ВИУ-ИШНПТ-499/2019 "Создание диагностического стенда для проведения НИР по разработке новых радиационностойких элементов импульсного ускорителя заряженных частиц экстремально высокой мощности".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Быстрицкий В.М., Диденко А.Н. Мощные ионные пучки. М.: Энергоатомиздат, 1984.
- 2. Быстрицкий В.М., Месяц Г.А., Красик Я.Е. // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 1991. Т. 22. № 5. С. 1172.
- 3. *Ito H., Fujikawa K., Miyake H., Masugata K. //* IEE Trans. Plasma Science. 2009. V. 37. № 10. P. 1879. https://doi.org/10.1109/TPS.2009.2022967
- Быстрицкий В.М., Григорьев С.В., Харлов А.В. // ЖТФ. 1992. Т. 62. № 12. С. 163.
- 5. Ueda M., Greenly J.B., Hammer D.F., Rondeau G.D. // Laser and Particle Beams. 1994. V. 12. № 4. P. 585.
- 6. *Noonan W.A., Glidden S.C., Greenly J.B., Hammer D.A.* // Rev. Sci. Instrum. 1995. V. 66. № 6. P. 3448.
- Логачев Е.И., Ремнёв Г.Е., Усов Ю.П. // Письма в ЖТФ. 1980. Т. 6. № 22. С. 1404.
- 8. Логачев Е.И., Ремнев Г.Е., Усов Ю.П. // ПТЭ. 1983. № 1. С. 21.

- Remnev G.E., Isakov I.F., Opekunov M.S., Kotlyarevsky G.I., Kutuzov V.L., Lopatin V.S., Matvienko V.M., Ovsyannikov M.Yu., Potyomkin A.V., Tarbokov V.A. // Surface and Coatings Technology. 1997. V. 96. № 1. P. 103.
- 10. *Humphries S., Jr., Lee J.J., Sudan R.N.* // Appl. Phys. Lett. 1974. V. 25. P. 20.
- Humphries S., Jr., Lee J.J., Sudan R.N. // Appl. Phys. Lett. 1974. V. 46. P. 187.
- Лопатин В.С., Ремнёв Г.Е., Фурман Э.Г., Макеев В.А., Степанов А.В. // ПТЭ. 2004. № 4. С. 70.
- Olsen J.N., Rosenthal S.E., Mix L.P., Seidel D.B., Anderson R.J., Dreike P.L., Leeper R.J. // J. Appl. Phys. 1984. V. 55. № 5. P. 1254.
- Miller P.A., Dreike P.L., Quintenz J.P., Anderson R.J., Crow J.T., Mendel C.W., Jr., Mills G.S., Mix L.P., Rosenthal S.E., Seidel D.B., Vandevender J.P. // Laser and Particle Beams. 1984. V. 2. № 2. P. 153.
- Isakova Y.I., Pushkarev A.I., Khaylov I.P. // Rev. Sci. Instrum. 2013. V. 84. № 7. P. 073302. https://doi.org/10.1063/1.4813258
- 16. Герасимов А.И. // ПТЭ. 2006. № 1. С. 5.