

УДК 537.9

С.С. Геращенко, А.И. Гирка, И.А. Бизюков,
А.А. Бизюков, К.Н. Серeda

Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина
пл. Свободы, 4, 61022, Харьков
e-mail: stasgerashchenko@yandex.ua

ДИНАМИКА ПРИМЕСЕЙ ИОННОГО ПУЧКА В СИСТЕМАХ С РЕВЕРСИВНОЙ МАГНИТНОЙ ФОКУСИРОВКОЙ

Проведены теоретическое и экспериментальное исследование возможности масс-сепарации примесей в сфокусированном пучке оптимизированного холловского источника ионов. Создаваемые потоки энергии и частиц позволяют использовать источник для моделирования процессов взаимодействия плазмы с материалами первой стенки термоядерных установок. Подтверждена возможность ионного источника с реверсивной магнитной фокусировкой облучать поверхность образца потоком ионов водорода без примесей.

Ключевые слова: ионный источник, реверсивная магнитная фокусировка, примеси, термоядерная установка.

Введение

В работе проведены теоретическое и экспериментальное исследования возможности масс-сепарации примесей в сфокусированном пучке [1] оптимизированного холловского источника ионов для моделирования процессов взаимодействия плазмы с материалами первой стенки термоядерных установок.

В теоретической составляющей [2, 4] проделан комплекс расчетов траекторий ионов на различных этапах движения в оптимизированном источнике с анодным слоем. Измерена функция распределения ионов пучка по энергиям, на основании которой получено пространственное распределение ионов с различной энергией в плоскости кроссовера ионов H^+ . Был разработан алгоритм, который позволяет получить пространственное распределение тока пучка с различным соотношением примесей в плоскости кроссовера ионов водорода на основании измеренной функции распределения. Для исследований, направленных на изучение взаимодействия интенсивных потоков энергетических частиц плазмы с поверхностью материалов, важным параметром является чистота сорта налетающих частиц рабочего газа. Показано, что 5 % содержание ионов кис-

лорода в пучке сепарируется и формирует кольцо диаметром ≈ 6 мм [2, 4].

Недавно изобретенный источник ионов с анодным слоем [3] благодаря баллистической и фокусировке реверсивным магнитным полем, позволяет получить потоки частиц и энергии на поверхность, необходимые для исследований взаимодействий плазмы с материалами первой стенки термоядерных установок.

Целью данной работы является изучение и демонстрация возможностей ионного источника с реверсивной магнитной фокусировкой [2, 4] в области взаимодействия плазмы с материалами.

Экспериментальные условия

Для достижения максимально возможной сепарации примесей водородного пучка были выполнены численные расчеты оптимального расстояния между электродами баллистической и магнитной фокусировки, а также геометрических параметров фокусирующей системы. Численно получена зависимость траектории иона от расстояния между катушками магнитного поля для частиц с разной массой и энергией. Выделена оптимальная конфигурация, с учетом того, что частицы с наименьшей

енергией могут не выйти за пределы источника из-за слишком маленького ларморовского радиуса. На основании этих численных расчетов спроектирована и изготовлена новая фокусирующая система.

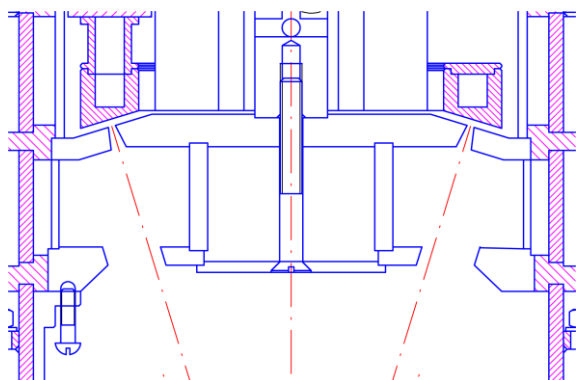


Рис. 1. Конструкция модернизированного источника ионов с анодным слоем.

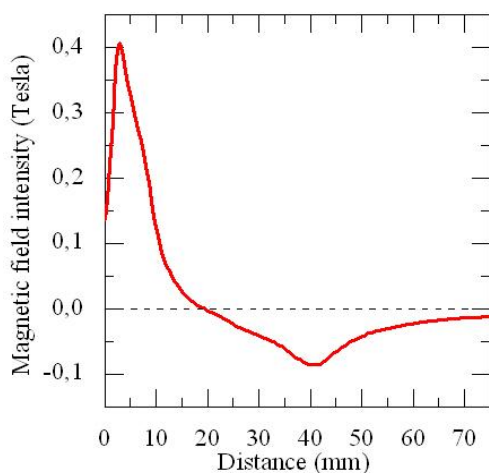


Рис. 2. Распределение интенсивности магнитного поля в зазорах баллистической и магнитной фокусирующей системы.

Для конструкции источника с измененной магнитной линзой проведены серии теоретических расчетов и экспериментов.

На рис. 3 показаны результаты теоретических расчетов по пространственной масс-сепарации холловского ионного источника. Расчеты выполнены для случая, когда мишень расположена в фокусе ионов водорода с энергией 2 кэВ, что соответствует максимуму измеренной функции распределения [2, 4]. Согласно получен-

ным результатам ускоренные ионы с массами от 12 а.е.м. и до 86 а.е.м. достигают мишени, попадая в кольцо с радиусом $0,34 \div 1,6$ см. Модель не учитывает столкновения ионов с атомами остаточного газа.

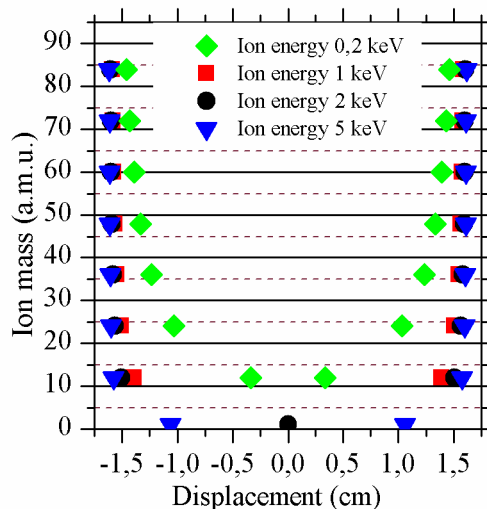


Рис. 3. Пространственное распределение ионов на поверхности облучаемой мишени в зависимости от массы и энергии иона.

Эксперимент проводился с использованием паров циклогексана C_6H_{12} в качестве рабочего газа. Пластика из нержавеющей стали с покрытием TiN размещалась в плоскости фокусировки ионов водорода. Эксперимент проводился при следующих параметрах: ток разряда – 80 мА; напряжение разряда – 5,2 кВ; ток пучка – 30 мА; остаточное давление в вакуумной камере – 5×10^{-5} Торр; давление в камере с напуском паров циклогексана – 4×10^{-4} Торр; длительность экспозиции составляла 25 мин. Молекула циклогексана в разрядном промежутке получает энергию достаточную для диссоциации. В частности, в пучке будет составляющая только из ионов водорода H^+ , составляющие из других ионов соединений группы C_xH_y , образованных после диссоциации молекулы циклогексана.

На рис. 4 показана поверхность мишени после бомбардировки пучком. В области 1 наблюдается пленка частично распыленной водородной составляющей ионного пучка. В области 3 наблюдается кольцо пленки радиусом $0,6 \div 1,3$ см.

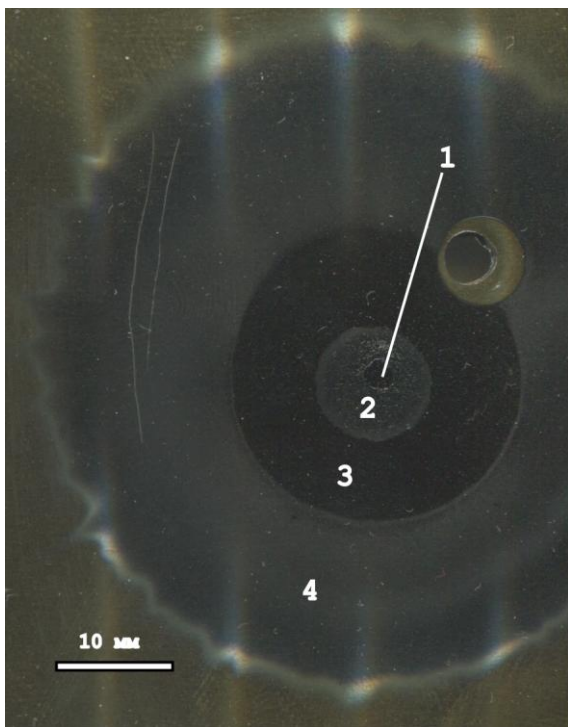


Рис. 4. Поверхность мишени после бомбардировки пучком. Цифрами отмечены различные области осажденного покрытия.

Сравнивая размеры области 3 с результатами теоретического моделирования можно сделать вывод, что она сформировалась в результате осаждения ионами соединений группы C_xH_y , которые достигли поверхности мишени бесстолкновительно. Соответственно, осаждение в

области 2 и области 4, вероятно, сформировалось под воздействием ионов тяжелых низкоэнергетичных углеводородов, рассеянных на частицах нейтрального газа.

Выводы

В данной работе показано, что системы с реверсивной магнитной фокусировкой способны проводить масс-сепарацию примесей ионного пучка. Характерным свойством таких систем является отделение ионов водорода от примесных ионов с массой 12 (углерод) и выше (азот, кислород и др.). При облучении поверхности мишени ионным пучком ионы водорода фокусируются в центре мишени, примесные ионы – на периферии, что подтверждается теоретическими расчетами и экспериментальными результатами. По сравнению с существующими ионными источниками, оптимизированный ионный источник с замкнутым дрейфом обеспечивает на порядок более высокие потоки частиц и тепла на единицу поверхности. В то же время, в отличие от плазменных устройств, используемых для моделирования взаимодействия плазмы с поверхностью, ионный источник с реверсивной магнитной фокусировкой может облучать поверхность образца потоком ионов водорода без примесей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gutkin M., Bizyukov A., Sleptsov V., Bizyukov I. and Sereda K. U.S. Patent US 7622721 B2. - 2009.
2. Girka O.I., Bizyukov I.A., Bizyukov A.A., Sereda K.N., Herashchenko S.S. Mass-Separation of Impurities in the Ion Beam Systems with Reversed Magnetic Beam Focusing // Problems of Atomic Science and Technology # 6, (82) Series: Plasma Physics. - 2012. - №18. - p. 105-107.
3. Girka O., Bizyukov I., Sereda K., Bizyukov A., Gutkin M., Sleptsov V. Compact steady-state and high-flux FALCON ion source for tests of plasma-facing materials // Review of Scientific Instruments. – 2012. – v.83. – P. 083501.
4. Girka O.I., Bizyukov I.A., Bizyukov A.A., Sereda K.N., Gerashchenko S.S. Impurities MassSeparation in Optimized Falcon Ion Source for HighFlux and High-Heat Material Tests // Programme and Abstracts of 11th Kudowa Summer School, “Towards Fusion Energy” Kudowa Zdrój, June 11-15, 2012, P. 92-95.

S.S. Herashchenko, O.I. Girka, I.A. Bizyukov, A.A. Bizyukov,
K.N. Sereda
V.N. Karazin Kharkov National University
Svoboda Sq. 4, 61022, Kharkov

DYNAMICS OF THE ION BEAM IMPURITIES IN THE SYSTEMS WITH REVERSED MAGNETIC BEAM FOCUSING

The mass-separation of impurities in the focused beam of the optimized Hall ion source has been investigated theoretically and experimentally. High particle and heat fluxes allow to use the source for the plasma interaction with materials of the first wall of fusion devices. It has been shown that the ion source with reversible magnetic focusing is capable to irradiate the sample surface with flux of hydrogen ions without impurities.

Keywords: ion source, reversible magnetic focusing, impurities, fusion device.

С.С. Герашченко, О.І. Гірка, І.А. Бізюков, О.А. Бізюков, К.М. Серєда
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
пл. Свободи, 4, 61022, Харків

ДИНАМІКА ДОМІШОК ІОННОГО ПУЧКА В СИСТЕМАХ З РЕВЕРСИВНИМ МАГНІТНИМ ФОКУСУВАННЯМ

Проведено теоретичне та експериментальне дослідження можливості мас-сепарації домішок у сфокусованому пучку оптимізованого холлівського джерела іонів. Створювані потоки енергії і частинок дозволяють використовувати джерело для моделювання процесів взаємодії плазми з матеріалами першої стінки термоядерних установок. Підтверджена можливість іонного джерела з реверсивним магнітним фокусуванням опромінювати поверхню зразка потоком іонів водню без домішок.

Ключові слова: іонне джерело, реверсивне магнітне фокусування, домішки, термоядерна установка.