

УДК 533.93:537.525

СХЕМА ФОРМИРОВАНИЯ ПУЧКОВ ИОНОВ МЕТАЛЛОВ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ МОЩНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ФОКУСИРОВКИ

С. В. ДЕКТЯРЕВ, А. И. ИВАНОВА, Р. Д. ШИМУК

Научный руководитель О. С. КОРНЕВА

Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Томск, Россия

Пучки ионов металлов и газов с длительностью импульса в несколько сотен микросекунд формируются в источниках на основе вакуумно-дуговой или газоразрядной плазмы с ускоряющим напряжением и с учетом средней зарядности ионов энергией до 100 кэВ. Однако плотность тока в этих источниках обычно не превышает 10 мА/см^2 , что ограничивает предел максимальной импульсной плотности мощности в ионном пучке на уровне единиц киловатт на квадратный сантиметр. Идея формирования импульсного или импульсно-периодического пучка ионов металлов высокой плотности мощности (до 100 кВт/см^2) основывается на экспериментальных результатах коллектива лаборатории НЛ ВИИ по развитию метода формирования высокоинтенсивных пучков ионов низкой энергии (до 3 кэВ). Суть метода заключается в плазменно-иммерсионном формировании высокоинтенсивных ионных пучков с помощью сеточного экстрагирующего и ограничивающего электродов, формирующих систему извлечения и транспортировки пучка в замкнутом пространстве дрейфа, погруженную непосредственно в созданную плазму. Вблизи поверхности сеточного электрода, находящегося под отрицательным потенциалом, образуется высоковольтный слой разделения зарядов, в котором происходит ускорение ионов [1]. Главное отличие этого подхода от традиционной имплантации состоит в том, что погруженная в плазму система ускорения и баллистической фокусировки ионов выступает в роли экстрактора, извлекающего и формирующего интенсивный поток ионов. Применение баллистической фокусировки ионов позволяет увеличить плотность ионного тока на несколько порядков.

Увеличение ускоряющего напряжения до десятков киловольт создает серьезные технические проблемы. Необходимость электрической изоляции фокусирующей системы от заземленного корпуса усложняется деградацией керамических изоляторов из-за осаждения плазмы, что вызывает токи утечки и пробой. Кроме того, подвод к мишени систем охлаждения, нагрева или вращения требует громоздких высоковольтных развязок. Сложная геометрия деталей приводит к концентрации электрического поля, вызывая автоэлектронную эмиссию, микродуги и локальное расплавление, что ведет к браку и аварийному отключению оборудования.

Переход к схеме с заземленными сеточной системой фокусировки ионного пучка и мишенью, т. е. нахождением их под нулевым потенциалом, и с подачей высоковольтного положительного импульса на источник плазмы дугового разряда (рис. 1, а) полностью снимает эти проблемы. Генерация металлической плазмы осуществляется с помощью вакуумно-дугового испарителя на базе дугового

разряда с охлаждаемым катодом. Плазменный поток формируется непрерывным вакуумно-дуговым разрядом с током дуги до 170 А. Генератор импульсно-периодического ускоряющего напряжения обеспечивает возможность формирования импульсных пучков ионов при полном токе генератора до 15 А. Длительность импульса ускоряющего напряжения может задаваться в диапазоне от 50 до 500 мкс. На выходе анода источника расположена фокусирующая система (рис. 1, б). Сеточный электрод изготовлен из вольфрамовой сетки с размером ячеек $0,5 \times 0,5 \text{ мм}^2$ и прозрачностью 80 %. Затеняющий диск, препятствующий прямому пролету микро-частиц с рабочей поверхности катода в область фокусировки пучка, устанавливается по центру фокусирующего электрода для отсечки микрокапельной фракции из области размещения мишени.

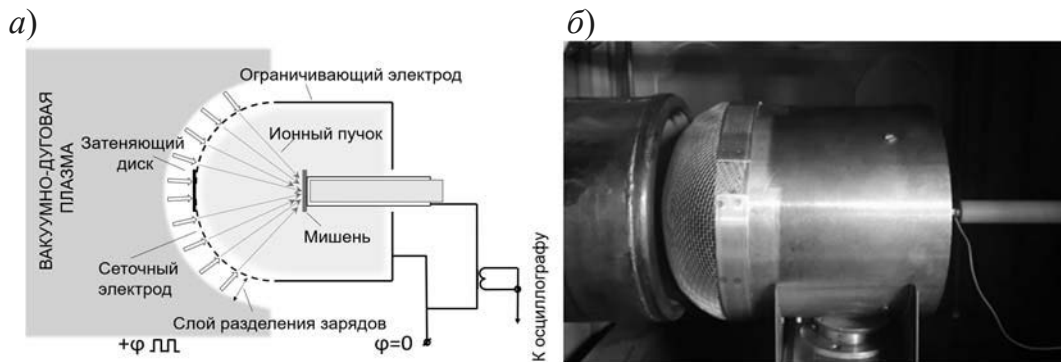


Рис. 1. Схема формирования ионного пучка (а) с баллистической системой фокусировки и транспортировки (б)

Ключевая особенность модернизированной высоковольтной системы источника ионов с генератором высоковольтных импульсов положительной полярности состоит в том, что здесь реализована комбинация непрерывной генерации металлической плазмы и формирования пучков ионов в импульсно-периодическом режиме.

Реализация метода высокоинтенсивной ионной имплантации и энергетического воздействия [2] позволила преодолеть ограничения классической ионной имплантации, обеспечив формирование модифицированных слоев толщиной на 2–3 порядка превышающей проективный пробег ионов, за счет интенсивных диффузионных процессов, в свою очередь приводящих к фазовым превращениям и синтезу уникальных свойств. Таким образом, данный метод может стать высокоэффективной технологией упрочнения деталей машин, инструмента и компонентов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSWW-2026-0040).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. High intensity metal ion beam generation / A. I. Ryabchikov, P. S. Ananin, S. V. Dektyarev [et al.]. – 2017.
2. **Ryabchikov, A. I.** High-intensity implantation with an ion beam's energy impact on materials / A. I. Ryabchikov // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2021. – № 49. – P. 2529–2534.