

12.1

Генерация мощных пучков ионов металлов субмиллисекундной длительности

© А.И. Рябчиков, Д.О. Сивин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия
E-mail: ralex@tpu.ru

Поступило в Редакцию 30 июня 2022 г.

В окончательной редакции 28 сентября 2022 г.

Принято к публикации 29 сентября 2022 г.

Впервые показана возможность применения одного сеточного электрода в форме части сферы для экстракции со свободной плазменной границы и фокусировки ионов металлов на примере ионов титана для формирования импульсного пучка длительностью $500 \mu\text{s}$ с плотностью мощности, достигающей 10^5 W/cm^2 . Представлены результаты исследования влияния амплитуды ускоряющего напряжения в диапазоне $9\text{--}30 \text{ kV}$ и размеров ячеек сетки на эффективность нейтрализации пространственного заряда и фокусировки ионного пучка.

Ключевые слова: ионы металлов, плазма вакуумной дуги, пучки субмиллисекундной длительности, высокая плотность мощности.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.22.53800.19293

Пучки заряженных частиц и плазменные потоки находят все большее применение для модификации свойств различных материалов и покрытий. Особое место в технологиях ионно-плазменной обработки материалов занимает импульсное энергетическое воздействие на поверхность твердого тела. Пучки электронов [1–3], ионов [4], лазерного излучения [5] нано-, микросекундной длительности с высокой плотностью мощности обеспечивают модификацию различных металлов и сплавов благодаря экстремально высоким скоростям нагрева и последующего сверхбыстрого охлаждения приповерхностных слоев на глубинах от единиц до нескольких десятков микрометров. Альтернативный метод пучковой модификации металлов и сплавов основан на ионной имплантации [6,7]. Изучение особенностей и закономерностей модификации свойств металлов и сплавов при обычной ионной имплантации показало ограниченную возможность ее практического применения. Основное ограничение связано с малым проективным пробегом ионов и соответственно с незначительной толщиной ионно-легированного слоя.

В последние годы получают развитие новые методы высокоинтенсивной имплантации с применением пучков ионов низкой энергии, но высокой плотности мощности. Эти методы продемонстрировали возможность ионного легирования материалов на глубинах в десятки микрометров при флюенсах ионного облучения $10^{19}\text{--}10^{21} \text{ ion/cm}^2$ [8]. Преимущества метода высокоинтенсивной имплантации ионов низкой энергии, обеспечивающего глубокое ионное легирование материалов, в ряде перспективных приложений нивелируются нагревом всего образца до высоких температур, при которых наблюдается деградация микроструктуры материалов.

На решение проблемы сохранения преимуществ высокоинтенсивной имплантации с одновременным устранением высокотемпературной деградации микроструктуры облучаемой мишени нацелен новый метод, предложенный в работе [9]. Сущность метода заключается в использовании для высокоинтенсивной имплантации пучков ионов микро-субмиллисекундной длительности с плотностью мощности от десятков до нескольких сотен киловатт на сантиметр квадратный. Импульсно-периодическая имплантация с использованием таких ионных пучков может обеспечить импульсный разогрев локальной области вблизи поверхности с последующим быстрым отводом тепла внутрь материала мишени. Таким образом, достигается высокая температура в ионно-легированном слое и одновременно исключается наличие высокой температуры во всем объеме облучаемого материала. Высокая температура в приповерхностном слое в сочетании с высокой плотностью ионного тока способствует радиационно-усиленной диффузии имплантируемых атомов и обеспечивает ионное легирование материала на глубинах, существенно превышающих проективный пробег ионов.

Для источников ионов металлов, генерирующих пучки с высокой импульсной и средней мощностью, привлекательным представляется применение плазмы непрерывного вакуумного дугового разряда. В работе [10] впервые для формирования пучков ионов низкой энергии, но высокой импульсной и средней мощности была использована плазма вакуумного дугового разряда с плазменно-иммерсионной экстракцией ионов, их последующей баллистической фокусировкой односеточным сферическим электродом с системой отсечки микрокапельной фракции и импульсно-периодическим заполнением плазмой пространства дрейфа пучка для нейтрали-

зации его пространственного заряда. Показана возможность генерации импульсно-периодических пучков ионов с длительностью импульсов в диапазоне от 2 до 8 μs при частоте 10^5 imp/s с плотностью ионного тока до 1 A/cm^2 при амплитудах отрицательных потенциалов смещения до 3 kV. Негативные эффекты, связанные с формированием виртуального анода при увеличении длительности импульса до 30 μs , были успешно преодолены благодаря использованию дополнительного термоэмиссионного источника электронов [11].

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию возможности и некоторых закономерностей формирования импульсно-периодических пучков ионов титана субмиллисекундной длительности из плазмы вакуумной дуги с плотностью мощности до 100 kW/cm^2 .

Исследования проводились на комплексной установке для ионно-лучевой и ионно-плазменной обработки материалов. Формирование импульсных и импульсно-периодических пучков ионов титана осуществлялось с использованием модифицированного источника ионов и плазмы „Радуга 5“ [12]. Плазменный поток формировался непрерывным вакуумно-дуговым разрядом с током дуги 160 А. Для очистки плазмы от микрокапельной фракции вместо плазменного фильтра жалюзийного типа была использована система „солнечного затмения“, апробированная в работах [10,13].

Для формирования пучка ионов с высокой импульсной плотностью мощности впервые были применены система экстракции ионов со свободной плазменной границы потенциальной плазмы и их фокусировка с помощью одиночного сеточного электрода в виде части сферы радиусом 120 мм с эквипотенциальным пространством для транспортировки и фокусировки ионного пучка. Схема эксперимента показана на рис. 1. В классических источниках ионов, в том числе и на основе импульсной или непрерывной плазмы вакуумной дуги, для исключения перегрузки генератора импульсного напряжения обычно используется трехэлектродная система, обеспечивающая отсечку плазменных электронов из пространства дрейфа пучка от ускоряющего зазора. В настоящей работе ис-

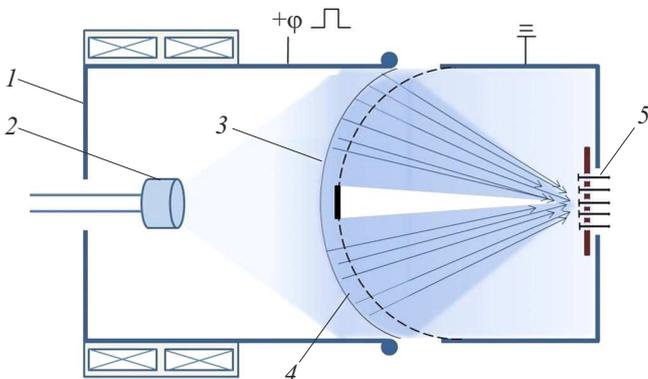


Рис. 1. Схема эксперимента. 1 — анод, 2 — катод, 3 — ионно-эмиссионная граница плазмы, 4 — слой разделения заряда, 5 — коллекторы секционированного цилиндра Фарадея.

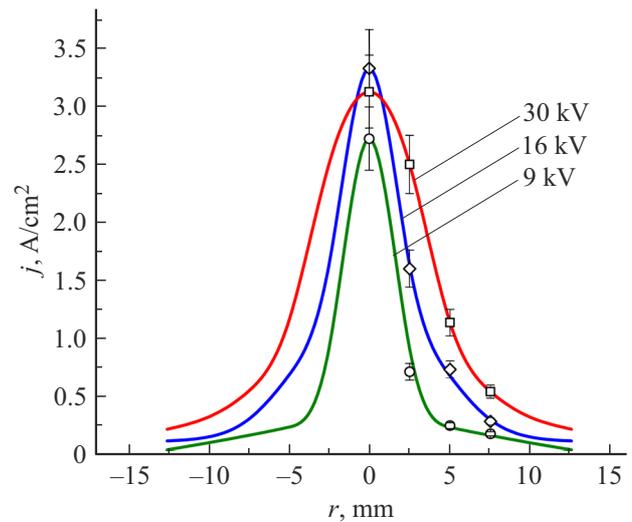


Рис. 2. Распределения плотности ионного тока по сечению пучка для системы формирования с сеточным электродом с размером ячейки 0.5 мм при токе непрерывного дугового разряда 160 А при ускоряющих напряжениях в диапазоне от 9 до 30 кV.

следует возможность формирования мощного ионного пучка ионов титана большой длительности с односеточным электродом. В экспериментах использовались три сеточных электрода с различными размерами ячеек: 0.5, 1 и 1.4 мм. Дисконный электрод, препятствующий прямому пролету макрочастиц вакуумного дугового разряда с рабочей поверхности катода в область фокусировки пучка, устанавливался по центру фокусирующего электрода. Экстракция ионов осуществлялась при потенциалах смещения анода в диапазоне от 9 до 30 кV.

Результаты исследования влияния ускоряющего напряжения на распределение плотности ионного тока по сечению пучка в случае применения сеточного электрода с размером ячейки 0.5 мм демонстрирует рис. 2. При амплитуде потенциала анода и соответственно потенциала плазмы 9 кV достигается максимальная плотность ионного тока около 2.75 A/cm^2 . Распределение плотности тока по сечению оказывается довольно узким. Дальнейшее увеличение напряжения до 16 кV приводит к росту максимальной плотности тока до 3.25 A/cm^2 . При этом наблюдается незначительное уширение распределения плотности тока по сечению пучка. Дальнейшее увеличение ускоряющего напряжения приводит к уменьшению максимальной плотности ионного тока в центре пучка.

Первоначально при экстракции ионов и их инжекции в пространство дрейфа эффективная нейтрализация заряда пучка осуществляется за счет предварительно инжектированной в пространство дрейфа вакуумно-дуговой плазмы. Время нейтрализации определяется уходом ионов плазмы из пучка. Как и в случае формирования высокоинтенсивных пучков ионов металлов низкой энергии [11], это время не превышает нескольких микро-

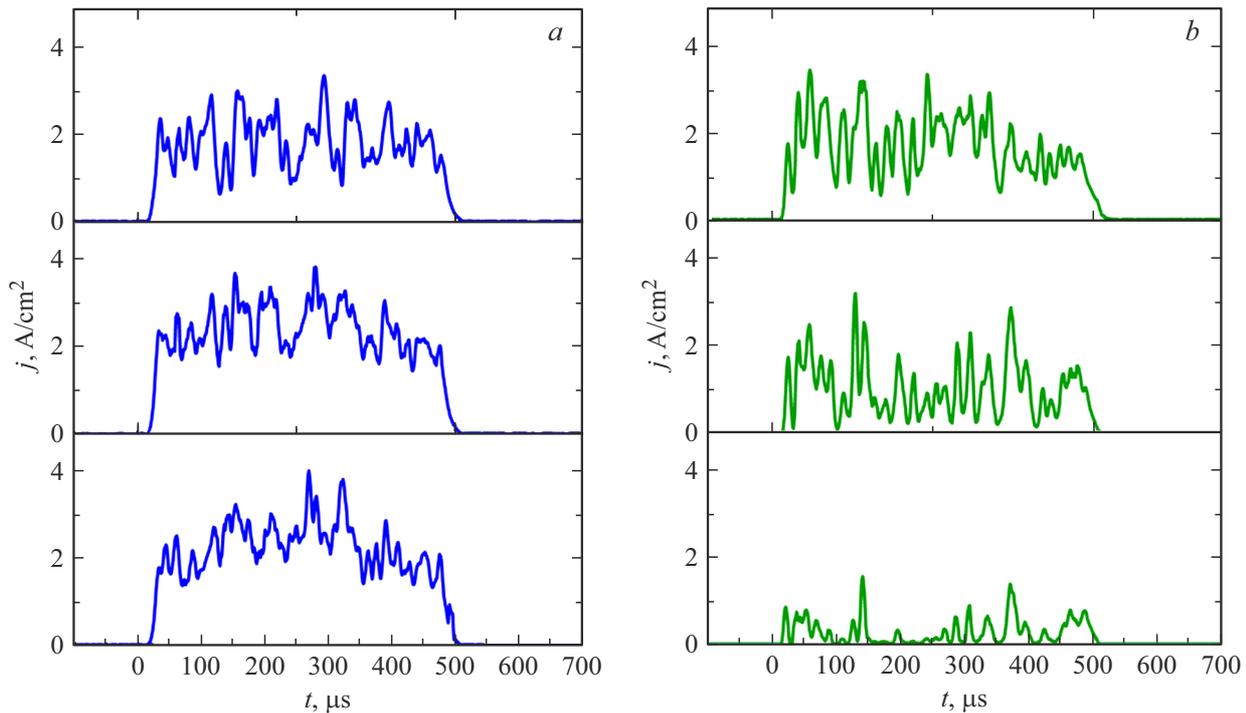


Рис. 3. Осциллограммы плотности ионного тока на коллекторах в центре пучка при амплитуде ускоряющего напряжения 16 (а) и 25 kV (b).

секунд. На первом этапе плотность ионов, ускоренных в слое разделения зарядов, на входе в пространство дрейфа почти на порядок меньше плотности электронов в плазме. Это обеспечивает хорошую степень нейтрализации заряда пучка ионов как вблизи сеточного электрода, так и на значительном расстоянии в пространстве дрейфа при его фокусировке с пропорциональным увеличением плотности ионов. Однако после того как вблизи сеточного электрода формируется слой разделения заряда, в котором происходит ускорение ионов, поступление плазмы, обеспечивающей поставку электронов в пространство дрейфа, прекращается. Нарботка электронов в случае формирования длинных импульсов возможна преимущественно за счет ионно-электронной эмиссии с элементов конструкции системы формирования пучка, формирования плазмы ионизацией атомов остаточной атмосферы или благодаря дополнительной инжекции электронов с термоэмиттера в пространство дрейфа ионного пучка.

Распределение плотности ионного тока в фокальной плоскости исследовалось с использованием пяти коллекторов площадью $2 \times 2 \text{ mm}^2$, расположенных на расстоянии 2.5 mm друг от друга. На четырехлучевой осциллограф одновременно подавались сигналы с трех коллекторов и датчика ускоряющего напряжения.

Осциллограммы, демонстрирующие изменение плотностей токов на трех коллекторах, один из которых установлен по центру, а два других на расстояниях 2.5 и 5 mm от оси системы, показали, что плотность тока на

них при ускоряющем напряжении 16 kV остается примерно одинаковой с незначительной модуляцией в течение импульса (рис. 3, а). Увеличение ускоряющего напряжения до 25 kV сопровождается некоторым увеличением модуляции, как показано на рис. 3, б. В этом случае плотность тока на центральном коллекторе драматично уменьшается. Значительное уменьшение плотности тока имеет место и на втором коллекторе. Такая динамика изменения распределения плотности ионного тока по сечению пучка при увеличении ускоряющего напряжения может быть объяснена ухудшением нейтрализации пространственного заряда пучка. Система фокусировки и транспортировки пучка в исходном состоянии представляет собой эквипотенциальное пространство. Наличие сеточного электрода нарушает условие эквипотенциальности пространства дрейфа и открывает возможность ухода электронов в ускоряющий зазор. Электрическое поле ускоряющего зазора проникает в пространство дрейфа через ячейки сетки и осуществляет экстракцию электронов, ухудшая тем самым нейтрализацию пространственного заряда пучка. Увеличение амплитуды ускоряющего напряжения сопровождается интенсификацией ухода электронов из пространства дрейфа, и под действием собственного заряда ионов ухудшается фокусировка, а распределение тока по сечению пучка свидетельствует о его трансформации из сплошного в трубчатый. Ухудшением условий нейтрализации объемного заряда пучка можно объяснить и уменьшение максимальной плотности ионного тока при увеличении

ускоряющего напряжения в случае сеточного электрода с размером ячейки сетки 0.5 mm (рис. 2).

Аналогичная закономерность формирования высокоинтенсивного пучка ионов наблюдалась в случае сеточного электрода радиусом 65 mm с размером ячейки 1.4 mm. При ускоряющем напряжении 5 kV формы импульсов тока на коллекторах демонстрировали максимум плотности тока в центре с амплитудой до 0.7 A/cm². При увеличении амплитуды ускоряющего напряжения до 25 kV плотность ионного тока уменьшалась почти до нуля, а на втором и третьем коллекторах от оси пучка осциллограммы показывали плотности тока до 0.25 A/cm² с периодической модуляцией до нуля в течение всей длительности импульса. Модуляция пучка может быть обусловлена периодическим возникновением виртуального анода.

Таким образом, в работе показано, что применение непрерывного вакуумно-дугового разряда с током до 160 A в сочетании с аксиально-симметричной фокусирующей системой в виде сеточного электрода при ускоряющих напряжениях до 30 kV обеспечивает возможность формирования пучка ионов титана субмиллисекундной длительности импульса с плотностью мощности, достигающей 100 kW/cm². Установлено, что структура сеточного электрода существенно влияет на процессы нейтрализации пространственного заряда и, как следствие, на баллистическую фокусировку мощного ионного пучка.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00051 (<https://rscf.ru/project/22-19-00051/>).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] G.E. Ozur, D.I. Proskurovsky, *Plasma Phys. Rep.*, **44** (1), 18 (2018). DOI: 10.1134/S1063780X18010130
- [2] D.A. Teryaev, O.A. Bytsenko, V.A. Shulov, I.G. Steshenko, K.I. Tkachenko, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1115** (3), 032059 (2018). DOI: 10.1088/1742-6596/1115/3/032059
- [3] M. Vorobyov, A. Teresov, P. Moskvina, N. Koval, S. Doroshkevich, V. Shin, in *Proc. 2020 7th Int. Congress on energy fluxes and radiation effects (EFRE)* (IEEE, 2020), p. 492. DOI: 10.1109/EFRE47760.2020.9241895
- [4] V. Tarbokov, S. Pavlov, E. Smolyanskiy, V. Uglov, M. Slobodyan, G. Remnev, *Coatings*, **11** (10), 1169 (2021). DOI: 10.3390/coatings11101169
- [5] J. Huang, *Optik*, **226** (Pt 1), 165437 (2021). DOI: 10.1016/j.ijleo.2020.165437
- [6] P.V. Bykov, V.Y. Bayankin, V.V. Tcherdyntsev, V.L. Vorob'ev, E.A. Pechina, T.A. Sviridova, A.A. Shushkov, A.I. Chukavin, S.S. Alexandrova, *Metals*, **11** (11), 1706 (2021). DOI: 10.3390/met11111706
- [7] X. Kuang, L. Li, L. Wang, G. Li, K. Huang, Y. Xu, *Surf. Coat. Technol.*, **374**, 72 (2019). DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.05.055
- [8] A.I. Ryabchikov, A.E. Shevelev, D.O. Sivin, A.I. Ivanova, V.N. Medvedev, *Surf. Coat. Technol.*, **355**, 123 (2018). DOI: 10.1063/1.5128422
- [9] A.I. Ryabchikov, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **49** (9), 2529 (2021). DOI: 10.1109/TPS.2021.3073942
- [10] A.I. Ryabchikov, P.S. Ananin, S.V. Dektyarev, D.O. Sivin, A.E. Shevelev, *Vacuum*, **143**, 447 (2017). DOI: 10.1016/j.vacuum.2017.03.011
- [11] А.И. Рябчиков, А.Э. Шевелев, Д.О. Сивин, С.В. Дектярев, О.С. Корнева, *Изв. вузов. Физика*, № 10, 54 (2020). DOI: 10.17223/00213411/63/10/54 [A.I. Ryabchikov, A.E. Shevelev, D.O. Sivin, S.V. Dektyarev, O.S. Korneva, *Russ. Phys. J.*, **63** (10), 1700 (2021). DOI: 10.1007/s11182-021-02224-6].
- [12] A.I. Ryabchikov, I.A. Ryabchikov, I.B. Stepanov, S.V. Dektyarev, *Rev. Sci. Instrum.*, **77** (3), 03B516 (2006). DOI: 10.1063/1.2171674
- [13] А.И. Рябчиков, А.Э. Шевелев, П.С. Ананьин, Д.О. Сивин, *ЖТФ*, **88** (10), 1564 (2018). DOI: 10.21883/JTF.2018.10.46503.2523 [A.I. Ryabchikov, A.E. Shevelev, P.S. Anan'in, D.O. Sivin, *Tech. Phys.*, **63** (10), 1516 (2018). DOI: 10.1134/S1063784218100195].