

12.1

Генерация многозарядных ионов металлов в ионном диоде с магнитной самоизоляцией

© В.И. Шаманин, В.А. Тарбоков

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

Поступило в Редакцию 13 января 2023 г.

В окончательной редакции 21 марта 2023 г.

Принято к публикации 24 марта 2023 г.

Представлены результаты эксперимента по генерации импульсного ионного пучка в диоде с магнитной самоизоляцией, в котором совокупная доля заряда, переносимая ионами металлов Al, Ti и Mo, составила не менее 63% от общего заряда, переносимого ионным пучком. Ионный диод с магнитной самоизоляцией имел конструктивные особенности в виде лезвийного катода и сменной перфорированной анодной накладки, выполненной из сплава ВТ8. На основе анализа зарядово-массовых характеристик ионов пучка и анализа осциллограмм плотности ионного тока по времяпролетной методике с использованием коллимированного цилиндра Фарадея установлено наличие ионов металлов Al^{3+} , Ti^{4+} .

Ключевые слова: ионный диод, ионы металлов, магнитный спектрометр, трековый детектор CR-39.

DOI: 10.21883/PJTF.2023.10.55430.19507

Использование импульсных пучков ионов металлов для имплантации в полупроводники является перспективным способом их легирования [1,2]. При импульсном воздействии имплантация ионов сопровождается одновременным отжигом образуемых дефектов за счет сравнительно высокой плотности тока в импульсе и импульсного нагрева имплантируемого слоя в полупроводниках и металлических материалах [3]. Возможность варьирования потока переносимой энергии в импульсе также позволяет успешно применять пучки ионов металлов для поверхностного легирования и модифицирования металлических материалов с целью увеличения коррозионной и жаростойкости, механических характеристик [4].

Однако получение импульсных пучков ионов металлов связано со значительными физическими ограничениями и техническими трудностями. Доля тока, переносимая импульсными пучками ионов металлов, в полном токе ионного пучка, как правило, не превышает 20–30% [5–8]. Некоторыми авторами даже делается вывод о принципиальной невозможности получения пучков ионов тяжелых металлов в импульсных системах с пассивным анодом из-за того, что во внешнем электрическом поле легкие ионы быстрее набирают скорость и начинают экранировать собственным электрическим полем более тяжелые ионы, находящиеся во внутренних областях плазмы, тем самым препятствуя их ускорению [9]. Однако для увеличения доли тяжелых ионов в импульсных ионных пучках может использоваться несколько подходов: применение специальных систем магнитной изоляции плазмы в ускоряющих промежутках, использование длинных импульсов для разделения компонентов плазмы за счет различных скоростей их теплового расширения, применение дополнительных источников плазмы и др. Так, авторами работы [10] про-

демонстрирована возможность получения сильноточных импульсных пучков ионов металлов в ионном диоде с внешней магнитной изоляцией кольцевого типа. Доля ионов металлов составила около 90% для свинца и 20–50% для алюминия и меди. При этом значительно большая доля ионов свинца в пучке по сравнению с пучками ионов меди и алюминия авторами объяснялась, в частности, значительной разницей скоростей движения в ускоряющем зазоре ионов металлов и более легких ионов (водорода, кислорода, углерода). Авторами также сделан вывод о целесообразности увеличения длительности ускоряющего импульса вплоть до $2\mu s$ с целью удаления легких ионов из ускоряющего промежутка до основного цикла ускорения.

Использование плазменной пушки [11] в диоде с внешней магнитной изоляцией также позволило достичь значений плотности ионного тока свыше $200 A/cm^2$ при содержании ионов $Al^{(1-3)+}$ до 89%. Однако в данном случае использовались как внешний источник импульсного магнитного поля, так и дополнительный источник плазмы.

Настоящая работа нацелена на получение импульсных пучков ионов в диоде с магнитной самоизоляцией и пассивным анодом [12], в которых доля тока, переносимая ионами металлов, в полном токе диода превышает 50%. Для достижения этой цели нами использованы два подхода: увеличение эмиссионной способности пассивного анода за счет перфорации и использования лезвийного катода, а также увеличение длительности паузы между плазмообразующим и ускоряющим импульсами, что обеспечивает удаление более легких компонентов плазмы из области ускорения за счет их более высокой скорости теплового расширения.

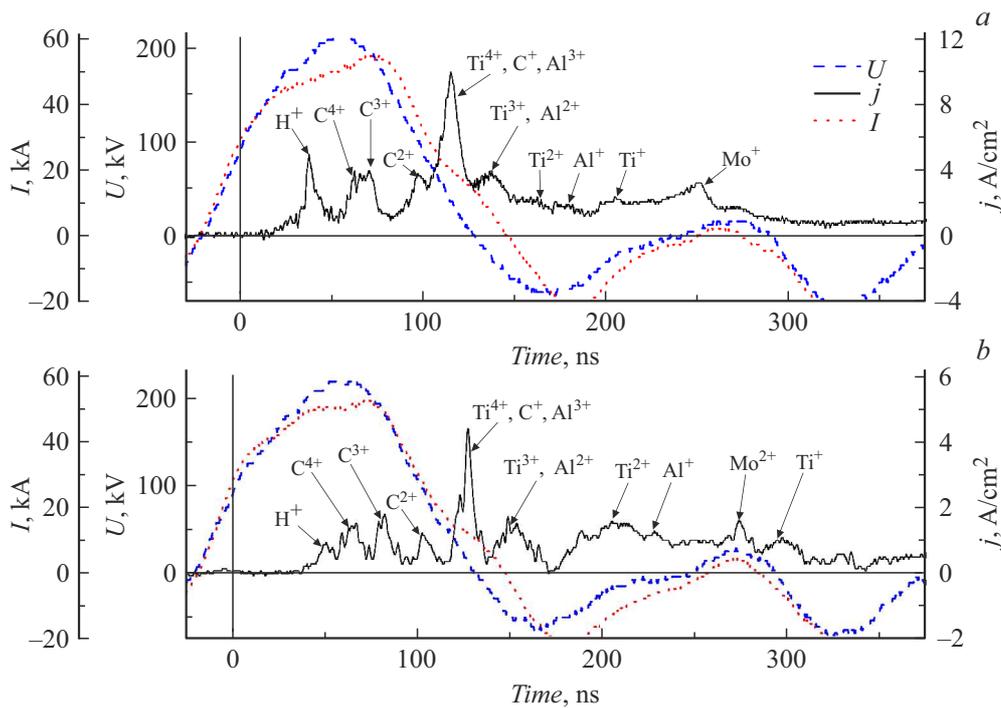


Рис. 1. Осциллограммы U , I и j . a — для расстояния 150 мм, b — для расстояния 250 мм.

Исследования проводились на ускорителе ТЕМП-4М [13]. Анод вакуумного диода был изготовлен из алюминия, обладающего низким удельным сопротивлением и высоким коэффициентом теплопроводности, и оснащался сменной перфорированной накладкой из сплава на основе титана ВТ8 (Ti — 88–90%, Al — 6–7%, Mo — 3–4%). Диаметр отверстий в накладке составлял 1 мм, отверстия располагались с шагом 5 мм в несколько рядов с расстоянием между рядами 4 мм. Наличие перфораций на аноде и лезвийная конфигурация катода [14] способствовали усилению локальных неоднородностей электрического поля в зазоре, тем самым улучшая плазмообразование на поверхности анода. Амплитуда ускоряющего импульса напряжения в диоде составляла 200 кВ с длительностью 100 нс, задержка между началами плазмообразующего и ускоряющего импульсов составляла до 650 нс.

В ходе эксперимента измерялись ускоряющее напряжение на анод-катодном промежутке U , полный ток диода I и плотность ионного тока j на расстояниях 150 и 250 мм от анода. Для оценки элементного состава ионного пучка применялась времяпролетная методика с использованием коллимированного цилиндра Фарадея (КЦФ). Полученные для двух расстояний сигналы j анализировались и сопоставлялись с данными трековой диагностики, проводившейся с помощью магнитного спектрометра и трекового детектора CR-39 [14].

Для определения состава ионного пучка по времяпролетной методике за точку отсчета был выбран пик на осциллограмме j , который соответствовал максимальному значению тока для протонов $j^{H_{\max}}$. Это обосновано

тем, что протоны являются наиболее легкими среди всех ионных компонентов пучка, соответственно, приобретают наибольшую скорость, первыми достигают датчика и всегда присутствуют в составе ионного пучка.

На рис. 1, a можно выделить характерные пики для групп ионов H^+ , C^{n+} , Al^{n+} , Ti^{n+} , Mo^+ . Наибольшей интенсивностью помимо пика для H^+ отличается пик, соответствующий группам ионов Ti^{4+} , C^+ , Al^{3+} , которые имеют относительно небольшую разницу в скорости и практически одновременно достигают КЦФ, за счет чего j достигает здесь максимума в течение всего импульса ионного тока. При установке КЦФ на расстоянии 250 мм от анода наблюдается более выраженное разделение ионного пучка на группы, что видно из осциллограммы, приведенной на рис. 1, b . Путем интегрирования сигнала j по времени были установлены количественные соотношения переносимого заряда и количества частиц для $C^{(2-4)+}$ и H^+ . Результаты расчетов приведены в таблице.

По результатам расчета на группы ионов $C^{(2-4)+}$ и H^+ приходится не более $\sim 17\%$ от общего заряда, переносимого ионным пучком. Совокупная доля заряда, переносимая группами ионов Ti^{4+} , C^+ , Al^{3+} , составляет $\sim 11\%$, а группами ионов Ti^{3+} и Al^{2+} $\sim 9\%$. Для ионов Mo^+ , Ti^+ , Ti^{2+} , Al^+ не удалось достичь выраженного разделения на осциллограмме j , но на них приходится не менее 63% от общего заряда, переносимого пучком. Следует заметить, что в области регистрации ионов углерода также могут попадать близкие им по массе ионы кислорода и азота, которые всегда присутствуют как в остаточной атмосфере вакуумной камеры, так и

Количество частиц и доля переносимого заряда

Сорт иона	Доля переносимого заряда от общего заряда ионного пучка, %	Концентрация частиц, 10^9 cm^{-2}
H^+	~ 3	~ 59
C^{2+}	~ 4	~ 40
C^{3+}	~ 5	~ 39
C^{4+}	~ 5	~ 28

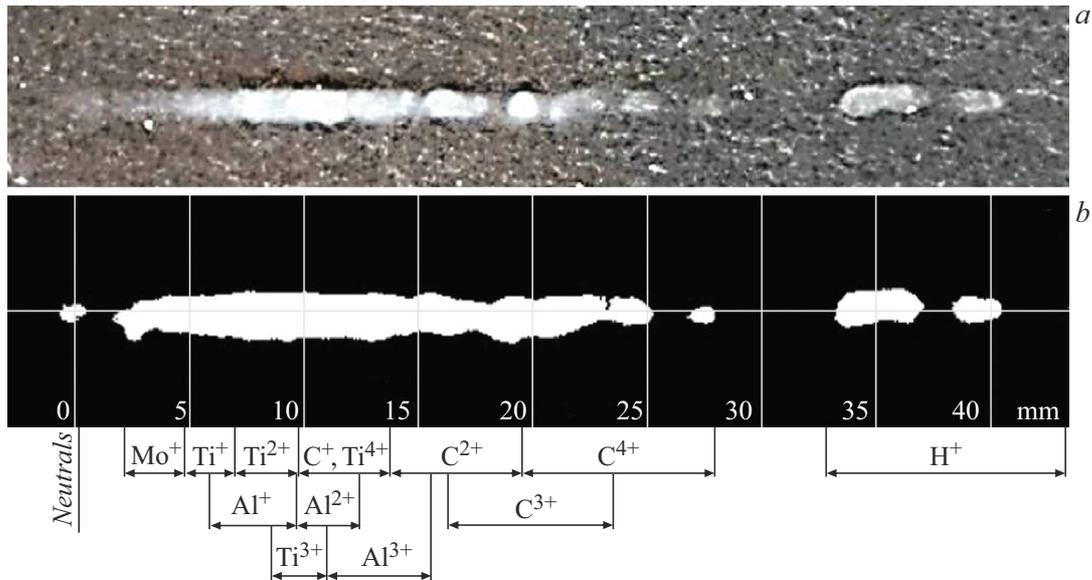


Рис. 2. Фотография пластины CR-39 после травления. *a* — без графической обработки, *b* — с измененной резкостью и контрастностью.

в составе адсорбированных на поверхности металлического анода газов. Однако на основании данных, опубликованных по этому вопросу (см., например, [15,16]), можно считать, что их количество по сравнению с водородом и углеродом в атмосфере вакуумной камеры незначительно. Среди адсорбированных газов также можно предполагать невысокую долю азота, так как молекулярный азот химически малоактивен, а его доля в пучке, как и кислорода, должна быть ограничена за счет более высокого потенциала ионизации по сравнению с углеродом или любым металлом, входящим в состав сплава ВТ8. Но в любом случае ионы газов вносят вклад в сигналы КЦФ и трекового детектора именно в области легких ионов, не уменьшая рассчитанной доли ионов металлов.

На рис. 2 приведены фотографии пластины трекового детектора CR-39, который был использован в магнитном спектрометре. Использованная в эксперименте пластина CR-39 подвергалась травлению в растворе NaOH для визуализации ионных треков.

На рис. 2, *a* представлена фотография трекового детектора после травления без графической обработки. Рис. 2, *b* обработан графически с целью улучшения

видимости всех имеющихся отпечатков на CR-39, под рисунком указаны расчетные диапазоны отклонений магнитным полем конкретных групп ионов для спектра энергий 100–200 keV.

Времяпролетная методика анализа осциллограмм и трековая диагностика на основе магнитного спектрометра дали взаимоподтверждающие результаты. Расчетные смещения пиков на осциллограмме j относительно друг друга и относительно протонной группы для указанного диапазона энергий хорошо совпадали с экспериментально полученными данными. Анализ трековой спектрограммы показал, что ширина спектра для протонной группы составила 135–180 keV, а для ионов C^{4+} — не менее 100 keV по нижней границе. Следует обратить внимание на диапазон областей групп ионов Ti^{4+} , C^+ , Al^{3+} на трековом детекторе (рис. 2, *a*). В этом диапазоне располагаются сплошные и наиболее различимые отпечатки на трековом детекторе, что хорошо объясняется наибольшей плотностью ионного тока j на осциллограмме для тех же групп ионов. Согласно [17], диаметры пор после травления при одинаковых условиях в значительной степени зависят от энергии частиц. На рис. 3, *a* приведено увеличенное изображение области

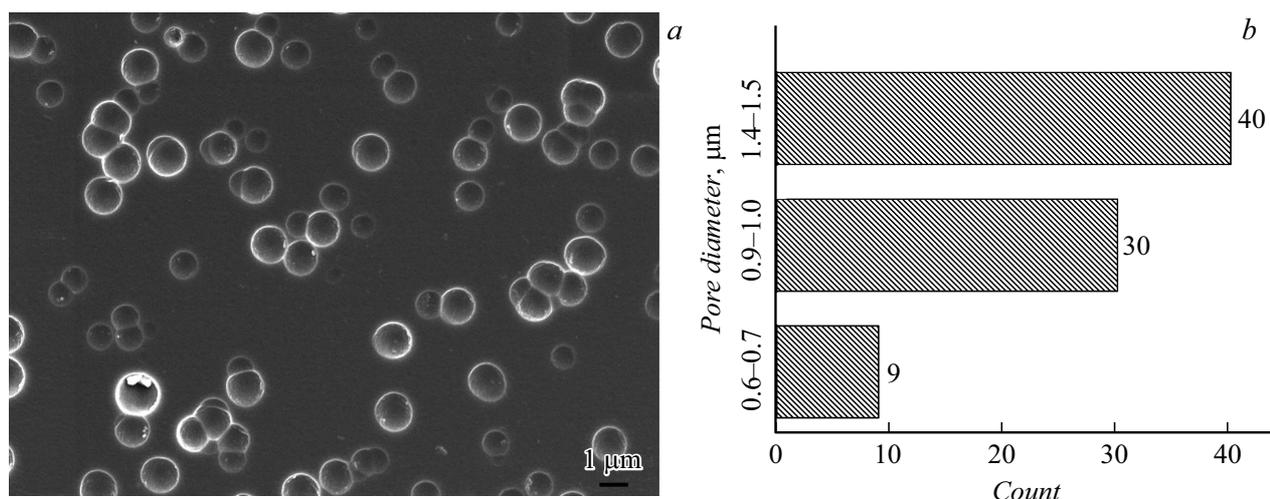


Рис. 3. Увеличенное изображение поверхности пластины CR-39 после травления (а) и гистограмма распределения пор по диаметру (b).

на трековом детекторе, где происходит наложение групп ионов Ti^{4+} , C^+ , Al^{3+} .

Наличие пор разного диаметра в этой области свидетельствует о разнице в энергетическом спектре частиц, что характерно для наложения групп ионов с разной энергией и массой. Всего на гистограмме, показанной на рис. 3, b, можно выделить три группы треков разного диаметра, наибольшие из которых соответствуют наиболее высокоэнергетическим ионам, отклонившимся в эту область, — Ti^{4+} . На гистограмме (рис. 3, b) ионам C^+ соответствуют поры с наименьшим диаметром, поэтому доля переносимого заряда, приходящаяся на ионы Ti^{4+} и Al^{3+} , составляет порядка 9%. Отсюда следует, что на группы многозарядных ионов металлов Ti^{4+} , Ti^{3+} , Al^{3+} , Al^{2+} может приходиться до 18% от тока, переносимого ионным пучком.

Таким образом, в настоящей работе показана возможность генерации ионных пучков, основная доля заряда которых переносится ионами металлов. Проведенный анализ и расчеты показали, что совокупная доля заряда, переносимая ионами металлов Al, Ti, Mo, составила не менее 63% от общего заряда ионного пучка. Сравнительно небольшая доля заряда, переносимого протонами, достигается за счет относительно высокой зарядовой составляющей других ионов в плазме и установления достаточно длительной паузы между плазмообразующим и ускоряющим импульсами для используемого зазора в диоде, когда более легкие и подвижные компоненты плазмы за счет теплового расширения в значительной степени уходят из области ускорения в диоде [10]. Высокая степень ионизации плазмы также может являться следствием значительного усиления напряженности электрического поля на участках перфораций сменной анодной накладки и использования катода лезвийной конфигурации.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Г.Е. Ремнёву за помощь в планировании эксперимента и интерпретации результатов исследования.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания в области научной деятельности (№ FSWW-2023-0011).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] А.Д. Погребняк, В.С. Лопатин, А.С. Воробьев, ЖТФ, **53** (6), 1186 (1983). <https://www.mathnet.ru/rus/jtf/v53/i6/p1186>
- [2] J.M. Neri, D.A. Hammer, G. Ginet, R.N. Sudan, Appl. Phys. Lett., **37** (1), 101 (1980). DOI: 10.1063/1.91677
- [3] Г.Е. Ремнёв, Ю.Ф. Иванов, М.С. Опекунов, А.Г. Пузыревич, Письма в ЖТФ, **21** (24), 60 (1995). <https://journals.ioffe.ru/articles/20300>
- [4] G.E. Remnev, I.F. Isakov, M.S. Opekounov, G.I. Kotlyarevsky, V.L. Kutuzov, V.S. Lopatin, V. Matvienko, M. Ovsyannikov, A.V. Potyomkin, V.A. Tarbokov, Surf. Coat. Technol., **96** (1), 103 (1997). DOI: 0.1016/S0257-8972(97)00116-3
- [5] A. Kitamura, K. Mitsuhashi, S. Yano, Laser Part. Beams, **5** (4), 683 (1987). DOI: 10.1017/S0263034600003190
- [6] E.J.T. Bums, J.R. Woodworth, K.W. Bieg, T.A. Mehlhorn, W.A. Stygar, M.A. Sweeney, J. Appl. Phys., **63** (1), 11 (1988). DOI: 10.1063/1.340501
- [7] Ю.Л. Бакшаев, П.И. Блинов, Г.И. Долгачев, В.А. Скорюпин, Физика плазмы, **5** (5), 1041 (1979). [Yu.L. Bakshaev P.I. Blinov, G.I. Dolgachev, V.A. Skoryupin, Sov. J. Plasma Phys., **5** (5), 583 (1979). <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0018512029&partnerID=40&md5=51bb2fb831353f5c02e4fdb14591ae3>].

- [8] M. Sato, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **26** (6R), 927 (1987). DOI: 10.1143/JJAP.26.927
- [9] А.И. Пушкарев, С.П. Чжу, Ю.И. Егорова, А. Прима, С.С. Полисадов, М.К. Лэй, *Физика плазмы*, **48** (11), 1094 (2022). DOI: 10.31857/S0367292122700202 [A.I. Pushkarev, X.P. Zhu, Yu.I. Egorova, A. Prima, S.S. Polisadov, M.K. Lei, *Plasma Phys. Rep.*, **48** (11), 1244 (2022). DOI: 10.1134/S1063780X22700350].
- [10] Y. Nakagawa, T. Ariyoshi, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **16** (4), 459 (1988). DOI: 10.1109/27.3860
- [11] H. Ito, K. Fujikawa, H. Miyake, K. Masugata, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **37** (10), 1879 (2009). DOI: 10.1109/TPS.2009.2022967
- [12] I.F. Isakov, E.I. Logachev, V.S. Lppatin, S.A. Pechenkin, G.E. Remnev, Y.P. Usov, *IEEE Trans. Electr. Insul.*, **EI-20** (4), 797 (1985). DOI: 10.1109/TEI.1985.348713
- [13] G. Remnev, I. Isakov, M.S. Opekounov, V. Matvienko, V. Ryzhkov, V. Struts, I. Grushin, A.N. Zakoutayev, A.V. Potyomkin, V.A. Tarbokov, A.N. Pushkaryov, V.L. Kutuzov, M. Ovsyannikov, *Surf. Coat. Technol.*, **114** (2-3), 206 (1999). DOI: 10.1016/S0257-8972(99)00058-4
- [14] В.И. Шаманин, Г.Е. Ремнёв, В.А. Тарбоков, *Приборы и техника эксперимента*, № 4, 35 (2020). DOI: 10.31857/S0032816220040175 [V.I. Shamanin, G.E. Remnev, V.A. Tarbokov, *Instrum. Exp. Tech.*, **63** (4), 472 (2020). DOI: 10.1134/s002044122004017x].
- [15] В.С. Томаль, Н.К. Касинский, Т.И. Демидович, И.А. Иванов, *Контенант*, № 2, 11 (2014). http://contenant.ru/1electron_mag/pdf/80.pdf
- [16] А.Е. Михеев, В.А. Харламов, С.Д. Крючек, А.А. Чернятина, И.И. Хоменко, *Вестн. СибГАУ*, № 2 (48), 216 (2013). <https://readera.org/148177063>
- [17] T.W. Jeong, P.K. Singh, C. Scullion, H. Ahmed, P. Hadjisolomou, C. Jeon, H. Yun, K.F. Kakolee, M. Borghesi, S. Ter-Avetisyan., *Sci. Rep.*, **7**, 2152 (2017). DOI: 10.1038/s41598-017-02331-w