

УДК 621.384.2/621.384.3:533.924

ВАЛИДАЦИЯ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ РАСПЫЛЕНИЯ МИШЕНИ В МИНИАТЮРНОМ ЛИНЕЙНОМ УСКОРИТЕЛЕ

© 2024 г. И. М. Мамедов^{1, 2}*, И. А. Каньшин¹, М. С. Лобов¹, Н. В. Мамедов^{1, 2}

¹Федеральное государственное унитарное предприятие “Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики имени Н. Л. Духова”, Москва, Россия

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования “Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия

*E-mail: schildkrote5552@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.11.2023

После доработки 22.11.2023

Принята к публикации 28.12.2023

Представлены результаты экспериментального исследования и численного моделирования распределения тока ионного пучка на мишени разборного миниатюрного линейного ускорителя. Проведено сравнение экспериментальных результатов с результатами моделирования. Показано, что расчетная модель позволяет оценить воздействие ионного пучка на распыление мишени в миниатюрном линейном ускорителе.

DOI: 10.31857/S0367676524040057, EDN: QIPUQY

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время растет популярность нейтронных генераторов (НГ) со встроенным детектором альфа-частиц [1, 2]. НГ данного типа является частью аппаратуры, используемой для идентификации объектов методом меченых нейтронов (ММН), и применяется для контроля элементного состава сырья на конвейере, в досмотровых системах, а также для обнаружения алмазов в горной руде. В частности, проект TANGRA (Tagged Neutrons and Gamma Rays), выполняемый в Объединенном институте ядерных исследований, проводится с применением ММН [3]. В трудах зарубежных авторов ММН называют API – method (Associated particle imaging method) [4]. В [1] приведено подробное описание ММН и показан вариант возможной реализации с применением НГ.

Важной частью НГ является миниатюрный линейный ускоритель (МЛУ), который отвечает за генерацию нейтронов. МЛУ разделяют на несколько составляющих частей: ионный источник (ИИ), ионно-оптическая система (ИОС), нейтрон-образующая мишень [5]. Внутри ИИ инициируется газовый разряд, часть образовавшихся ионов извлекается из ИИ. Вытянутые в ИОС ионы образуют пучок и ускоряются на мишень. Фокусировка ионного пучка на мишени позволяет получить генерирующую область нейтронного излучения определенного размера. Нерешенной задачей по усовершенствованию МЛУ является создание точечного

источника нейтронов, т.е. конструирование такой ИОС, которая бы фокусировала ионный пучок на мишени в точку.

В зарубежных работах [4, 6] уже проводились исследования распределения ионного пучка на поверхности нейтрон-образующей мишени МЛУ, в которых показано, что разброс энергии ионов внутри экстрагируемого пучка больше зависит не от приложенного вытягивающего напряжения, а от параметров разряда. Хотя при этом увеличение энергии пучка для заданных параметров разряда приводит к уменьшению максимального разброса энергий ионов в пучке, а при меньших ускоряющих напряжениях становится более заметен арел пучка. Авторы отмечают отсутствие изменений в размерах пятна в диапазоне давлений рабочего газа 0.6–3 мТорр.

В работах [5, 6] проводилось прямое измерение распределения ионного тока на поверхности мишени при значениях ускоряющего напряжения от 0 до –40 кВ и разной геометрии ИОС. Анализ полученных данных позволил выявить следующие закономерности: 1) существенного отличия в распределении профиля пучка на поверхности мишени при давлениях 0.5–2 мТорр не наблюдалось; 2) изменение геометрии ИОС (уменьшение диаметров фокусирующего и ускоряющего электродов) приводит к уменьшению плотности тока в 2 раза и одновременно к увеличению диаметра пятна в 2 раза; 3) выявлена тенденция к увеличению диаметра пятна

при увеличении напряжения разряда. Для обоснования полученных результатов авторы [7] ссылаются на работу [9], в которой получено выражение, связывающее величину половинного угла расходимости огибающей ионного пучка относительно направления его распространения с его первеансом. Расчеты показывают, что на расходимость пучка в данном случае влияют только диаметр вытягивающего отверстия из ионного источника и длина межэлектродного зазора. В работе [8] показано, что фоторегистрация следа ускоренного пучка в плоскости мишени и прямое измерение распределения плотности тока по поверхности мишени хорошо коррелируют друг с другом. В работе [10] предложена система возобновления внешнего барьерного слоя мишени в процессе работы МЛУ за счет осаждения оксида иттрия, распыляемого периферийной частью пучка дейтронов с внутренней поверхности электрода мишени. В частности, расчеты [10] показали, что доля потока дейтронов, облучающая боковую стенку электрода мишени, должна составлять 16%.

В работах [11, 12] проводилось компьютерное моделирование пучка ионов в импульсном МЛУ. Целью данных работ являлся выбор распределения потенциала и геометрии электродов для равномерного распределения пучка дейтронов на мишени, что в свою очередь должно приводить к увеличению срока службы МЛУ. Оказалось, что наиболее существенное влияние на распределения пучка по поверхности мишени оказывают начальные параметры пучка — распределение частиц в плоскости экстрагирующего отверстия, их начальная скорость и ее радиальная компонента. В работе [13] в качестве исходных данных моделирования используется эмиттанс пучка на выходе из фокусирующего электрода ИОС. В этой же работе указывается еще один способ сравнения результатов компьютерного моделирования с экспериментальными данными — при помощи метода светящихся ионных пучков [14], который основывается на визуализации траекторий пучков возбужденных ионов. Следующая проблема, которую необходимо учитывать при моделировании движения ионного пучка — это прохождение ионов через рабочий газ МЛУ. При движении ускоренного пучка ионов в ИОС МЛУ происходит потеря части ионов за счет взаимодействия с газовой средой МЛУ. Из многочисленных процессов, протекающих при взаимодействии ионов D^+ , T^+ , D_2^+ , T_2^+ и DT^+ с рабочим газом (D_2 , T_2) можно выделить такие как: 1) нейтрализация ускоренных ионов (“подхват” электронов), 2) ионизация газа ускоренными ионами, 3) упругое рассеяние на газе, 4) резонансная перезарядка. В работе [4] проводилось моделирование движения ионов в МЛУ с учетом взаимодействия с нейтральным газом (при давлении дейтерия 5 мТорр). По результатам расчетов в [5] показано, что при данном

давлении и ускоряющем напряжении 80 кВ более 35% частиц от первоначального пучка попадает на ускоряющий электрод и примерно 15% падает на фокусирующий электрод. Потоки частиц на электроды идут в виде нейтральных частиц, образованных от перезарядки, и рассеянных ионов. Таким образом, суммарный поток частиц на поверхности электродов составляет порядка 50% эквивалентного тока основного пучка, бомбардирующего на мишень.

Таким образом, для оптимизации процессов разработки и усовершенствования ИОС помимо исследований и испытаний макетных МЛУ широко применяется численное моделирование. Переход от эмпирического эксперимента к созданию расчетной модели позволит уменьшить время и затрачиваемые ресурсы на разработку МЛУ, а именно найти параметры ИОС, при которых размер пятна на мишени достигнет наименьшего значения.

Актуальной задачей является создание расчетной модели движения ионного пучка для оценки степени фокусировки ионов на мишени. Однако на начальном этапе разработки расчетной модели требуется ее верификация с помощью экспериментального исследования. Целью работы является верификация модели расчета пучка заряженных частиц с экспериментальными данными для дальнейших оценок распыления мишени.

ОПИСАНИЕ МЕТОДИК ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ

Экспериментальная работа проводилась в стенде для исследования разборных макетов МЛУ. В работе [13] приведено подробное описание стенда. Рабочее давление газа (аргона) устанавливалось на уровне $(3-6) \cdot 10^{-4}$ Торр. Напряжение ИИ составляло +2 кВ, разрядный ток ИИ лежал в диапазоне 300–600 мкА, вытягиваемый ток (ток на мишени) 60–80 мкА, напряжение на ускоряющем электроде изменялось от 0 до –25 кВ. При этом для значений ускоряющего напряжения 0, –5, –10, –15, –20, –25 кВ производилась фоторегистрация светящихся пучков ионов в межэлектродном промежутке ИОС, и с использованием полученных изображений бесконтактным методом измерялся эмиттанс пучка.

Для изучения профиля эродированной мишени проводилась ее бомбардировка потоком ионов аргона энергией 25 кэВ проводилась в течение 15 ч. до появления отчетливых следов эрозии на поверхности. После демонтажа мишени проводился визуальный осмотр и исследование поверхности. Анализировались следующие параметры: размер и форма эрозии на поверхности мишени, глубина распыления.

Численное моделирование повторяло эксперимент. Расчет состоял из последовательного решения электростатической задачи и моделирования траекторий ионов в программном пакете COMSOL Multiphysics. Электростатическое поле рассчитывалось в стандартном модуле “Electrostatics” на предварительно сконфигурированной тетраэдрической сетке путем численного решения уравнения Лапласа с граничными условиями, соответствующими заданным напряжениям на электродах и условию стремления поля на бесконечности к нулю, методом конечных элементов. Результатом решения являлось распределение электростатического поля в ячейках сетки во всей расчетной области, т.е. во внутреннем объеме ИОС. Для решения задачи моделирования траекторий ионов аргона использовался стандартный модуль “Charged particle tracing”, в котором производился расчет траекторий частиц путем численного решения уравнения движения методом Рунге–Кутты 4-го порядка в вычисленном ранее электростатическом поле. Результатом численного моделирования являлись траектории ионов аргона в ИОС и также плотность тока и размер пучка на мишени.

Начальные данные для уравнения движения ионов задавались двумя разными способами: 1) с использованием экспериментально измеренного эмиттанта; 2) с использованием метода particle-in-cell (PIC).

При моделировании по данным эмиттанта, используемая в расчетах трехмерная модель ИОС, состоящая из фокусирующего и ускоряющего электродов, а также мишени, изображена на рис. 1. В такой модели ИОС не рассматривалось влияние электродов ИИ на движение ионов, поскольку ионы запускались с плоскости выходной апертуры фокусирующего электрода ИОС, а начальным параметром моделирования являлся эмиттанс и параметры Твисса, измеренные в этой плоскости экспериментально [15]. Использование такого способа, сочетающего в себе физический эксперимент и последующее моделирование, позволяет существенно сократить время вычислений за счет того, что не моделируется процесс плазмообразования в ИИ.

Моделируемый ток составлял 80 мкА, время моделирования 300 нс с временным шагом 0.5 нс. На модель задавалась пользовательская сетка с максимальным размером ячейки 0.3 мм. Напряжение на ускоряющем электроде варьировалось от 0 до –25 кВ. Моделируемые частицы – однозарядные ионы аргона. Значения параметров Твисса представлены в табл. 1.

Другой вариант моделирования движения пучка в ИОС и распределения ионного тока на поверхности мишени заключался в моделировании по данным метода PIC [16,17]. Данный метод

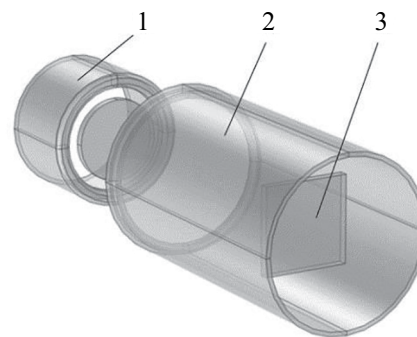


Рис. 1. Упрощенная трехмерная модель ИОС с мишенью: 1 – фокусирующий электрод; 2 – ускоряющий электрод; 3 – мишень.

Таблица 1. Значения параметров Твисса при различных напряжениях на ускоряющем электроде.

$U_{\text{уск}}, \text{ кВ}$	$\epsilon, \text{ мм}$	$\beta, \text{ мм}$	α
–25	0.175	8.43	2.11
–10	0.228	9.25	1.82
0	0.935	3	–0.36

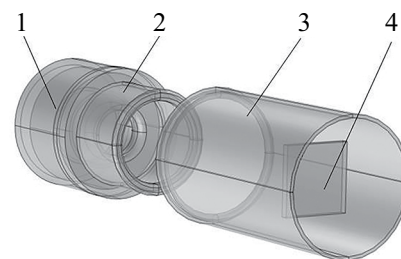


Рис. 2. Трехмерная модель ИИ с ИОС и мишенью: 1 – ИИ; 2 – фокусирующий электрод; 3 – ускоряющий электрод; 4 – мишень.

вводит понятие макрочастицы. Макрочастица – это вычислительная частица, симулирующая поведение большого количества частиц плазмы. Такие частицы повторяют траектории реальных частиц в плазме. Движение макрочастиц меняет распределение электрического поля в системе. Фактически метод PIC является одним из методов решения уравнения Власова–Максвелла. В работе [17] подробно описаны численные методы и подходы, использованные при компьютерной реализации PIC метода.

Исходные данные, полученные методом PIC, представляли из себя начальные координаты и скорости ионов аргона для разных этапов горения разряда в ИИ. Используемая геометрия электродов представлена на рис. 2. Учитывалось влияние

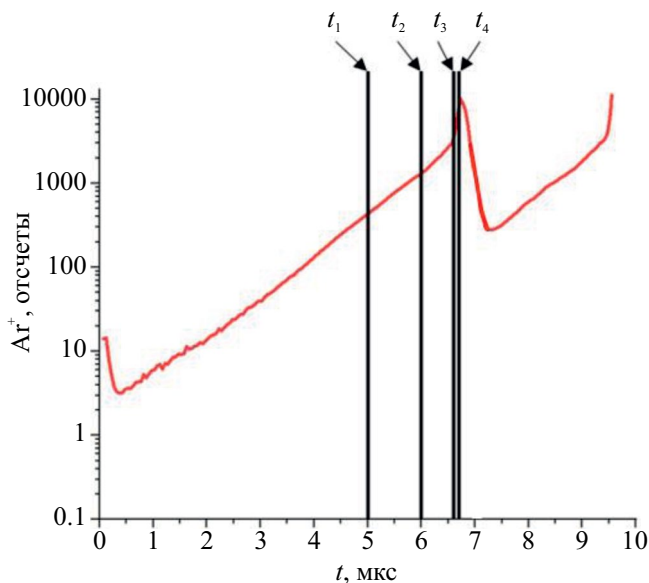


Рис. 3. Зависимость количества ионов аргона в разрядной камере от времени.

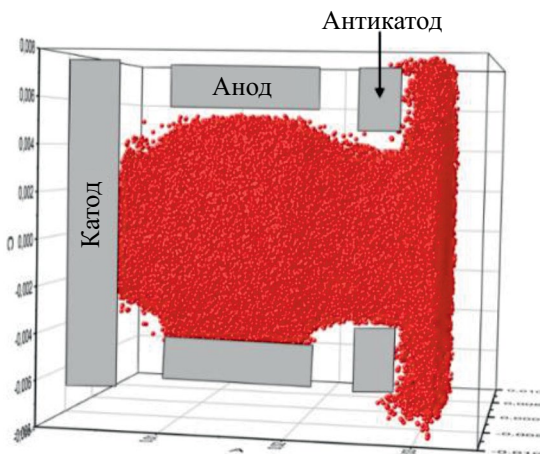


Рис. 4. Распределение частиц в разрядной камере ионного источника.

ИОС, мишени и электродов разрядной камеры ИИ, которая не учитывалась в случае моделирования по данным эмиттанта. Получение результатов в виде пространственного распределения положений и скоростей ионов в газоразрядной камере ИИ малогабаритного ускорителя ионов занимает порядка двух-трех месяцев в отличие от способа, где используется эмиттанс, и ИИ физически в моделировании не рассматривается.

Давление в системе составляло 0.5 мТорр, напряжение на ускоряющем электроде от 0 кВ до –25 кВ, напряжение на аноде ИИ – 2 кВ, моделируемый ток – 80 мкА. Время моделирования

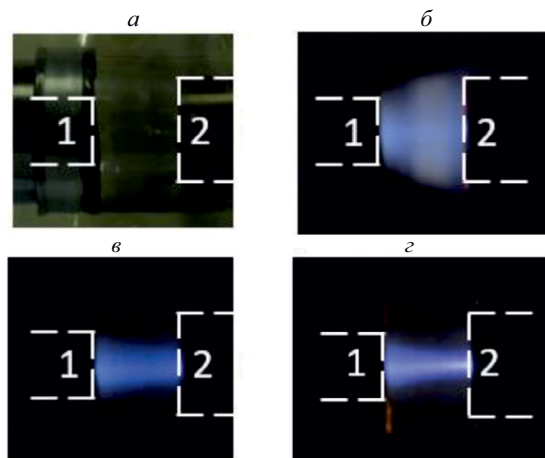


Рис. 5. Фотоизображение ИОС: 1 – выходная апертура ионного источника; 2 – апертура ускоряющего электрода. (а) – до начала эксперимента при включенном освещении; (б)–(г) – во время эксперимента при выключенном освещении и ускоряющем напряжении: (б) 0 кВ; (в) –10 кВ; (г) –25 кВ.

составило 500 нс при временном шаге в 1 нс. Максимальный размер ячейки пользовательской расчетной сетки составлял 0.3 мм. Число ионов в разрядной камере не было постоянно. Каждой стадии горения разряда в ИИ соответствовало свое количество образовавшихся ионов аргона (см. рис. 3). Распределение частиц в ионном источнике, представленное на рис. 4 соответствует максимальному разрядному току.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Фоторегистрация пучков ионов

На рис. 5 показаны фотографии светящегося следа пучка ионов в межэлектродном промежутке при ускоряющем напряжении 0, –10, –25 кВ. При увеличении ускоряющего напряжения пучок становится более сфокусированным.

Изучение профиля эродированной мишени

На рисунке 6а показан след на мишени от облучения пучком ионов и две характерные области интенсивности (S_1 и S_2). Центральная область пучка (S_2) подвергается наибольшему воздействию ионного тока и имеет размер порядка 1.0 ± 0.1 мм в осевых направлениях с глубиной распыления 250 ± 10 мкм. Периферийная часть – область малой интенсивности S_1 . Размер области S_1 составляет $4.5 \text{ мм} \pm 0.1 \text{ мм}$ и $5.5 \pm 0.1 \text{ мм}$ в продольном и поперечном направлениях соответственно. Стоит отметить, что пятно имеет ассиметричную форму. Из рис. 6б, на котором показано металлографическое

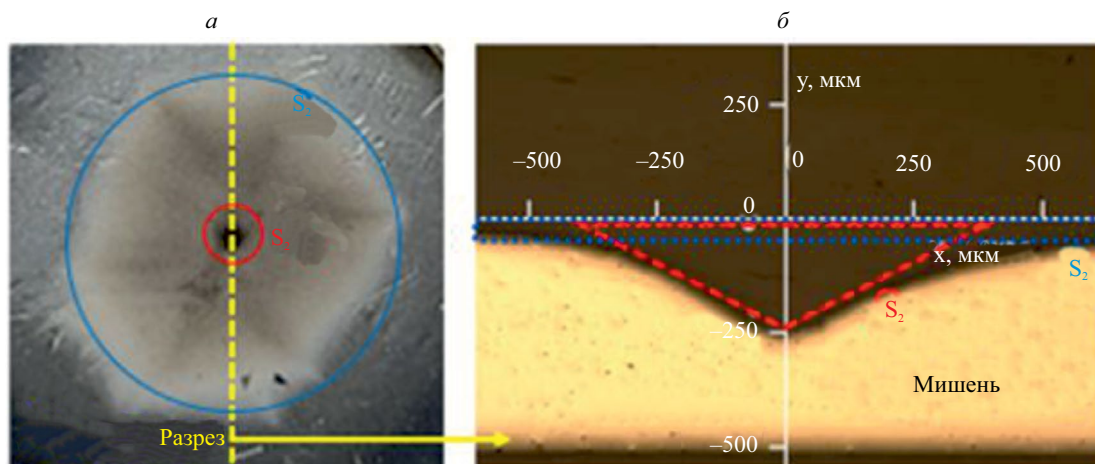


Рис. 6. Изображение мишени: распыленная поверхность (а); металлографическое изображение (б).

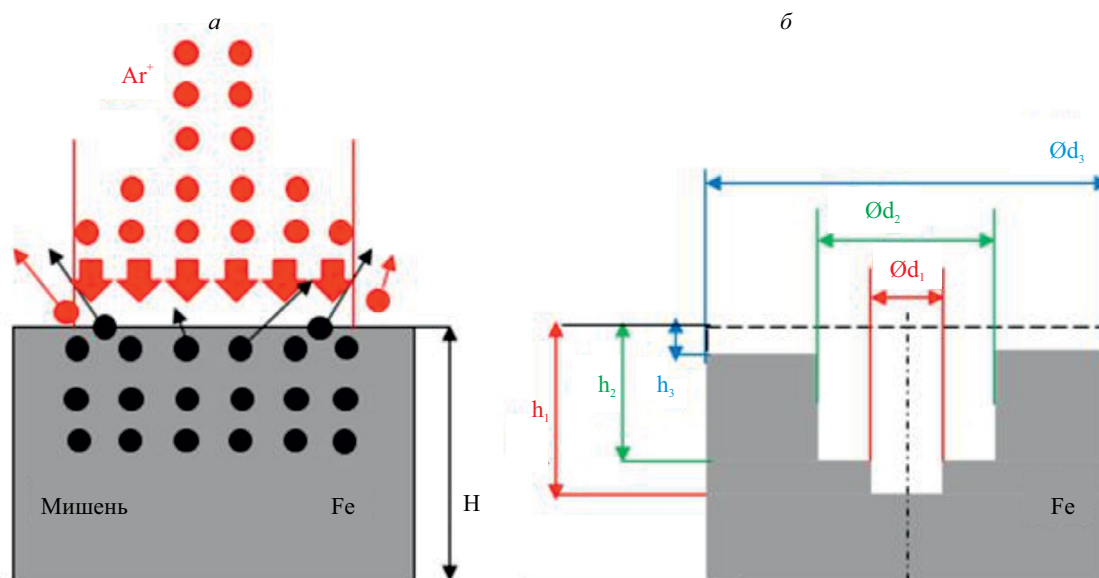


Рис. 7. Схема эрозии мишени.

изображение мишени после поперечного разреза видно, что глубина распыления области S_1 составила порядка 50 ± 20 мкм. Снимок поперечного сечения мишени сделан при помощи металлографического микроскопа.

Проведено измерение массы мишени до и после эксперимента. До начала испытаний масса мишени равнялась 955 мг, а после наработки составила 947 мг. Таким образом, распыленная масса мишени составила 8 мг и соответствует областям S_1 и S_2 (см. рис. 6б). Для расчета распыленной массы измерен объем распыленного материала в области S_2 , представленный в виде конуса высотой 250 мкм и основанием 500 мкм, а в области S_1 — в виде

двух цилиндров высотой 50 мкм и основанием 2000 мкм. Материал — нержавеющая сталь. По результатам вычисления массы распыленного материала в каждой области получили, что потерянная масса в области высокой интенсивности S_2 составила 0.50 ± 0.02 мг, а для области малой интенсивности S_1 — 7.7 ± 3 мг. Распыленная масса для области S_1 значительно больше, чем для области S_2 .

Изучение распределения тока на мишени

Предположим, что объем распыленного слоя, соответствующего следу пучка в одной из областей на поверхности мишени пропорционален величине

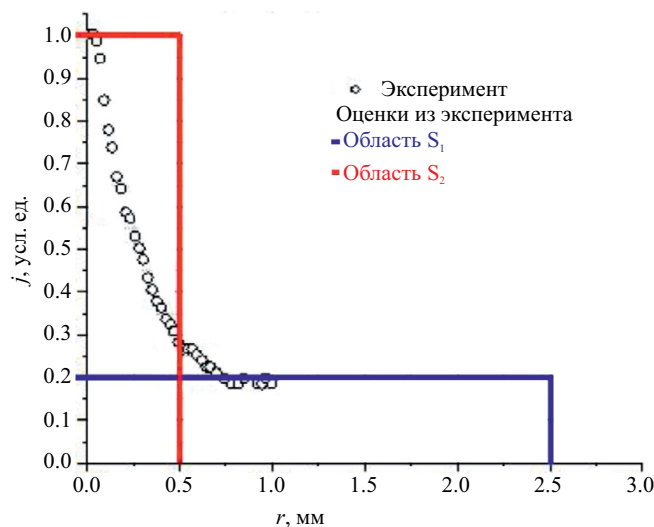


Рис. 8. Экспериментальное распределение плотности тока на поверхности мишени.

тока в выделенном цилиндрическом объеме (см. рис. 7 — принципиальная схема эрозии мишени). Ниже приведена оценка толщины распыленного слоя.

Сила тока однозарядных ионов:

$$I = e \cdot n \cdot S \cdot v, \quad (1)$$

где e — элементарный заряд, n — концентрация ионов в пучке, S — площадь поперечного сечения пучка, v — скорость ионов в пучке.

Число распыляемых атомов:

$$N = Y \cdot n \cdot S \cdot v \cdot t, \quad (2)$$

где Y — коэффициент распыления, t — время распыления.

Число распыленных атомов в слой мишени толщиной h :

$$N = \frac{\rho \cdot S \cdot h \cdot N_a}{M}, \quad (3)$$

где ρ — плотность вещества материала мишени, N_a — число Авогадро, M — молярная масса вещества.

Толщина распыленного слоя:

$$h = \frac{j \cdot Y \cdot M \cdot t}{\rho \cdot e \cdot N_a}, \quad (4)$$

где j — плотность тока пучка.

Из формулы (4) видно, что толщина распыленного материала мишени в определенной области пропорциональна плотности тока в этой области.

Исходя из данного вывода, глубина эрозии мишени была переведена в плотность тока падающих ионов. На рис. 8 представлен график экспериментальной зависимости плотности тока. Максимальное значение плотности тока нормировано на единицу.

Из графика можно заметить, что максимальное значение плотности тока для области высокой интенсивности S_2 в пять раз выше, чем в области малой интенсивности S_1 . Однако в силу того, что область S_1 занимает значительно большую площадь, следовательно, общая масса распыленного металла приходится именно на область малой интенсивности, что коррелирует с экспериментальными данными.

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 9 и 10 показаны результаты моделирования распределения потенциалов и движения пучка в ИОС при использовании эмиттанта и метода particle-in-cell соответственно. Наблюдается высокая сходимость моделирования траекторий по данным эмиттанта (рис. 9) с экспериментальными данными (рис. 5). Однако анализ по траекториям не отражает действительного профиля пучка (плотности тока).

На рис. 11 представлено 2D распределение плотности тока ионов на мишени при моделировании с использованием эмиттанта. Шкала значений тока на рис. 11–14 нормирована на единицу. На рис. 12 показано распределение тока на поверхности мишени ИОС. Распределение плотности тока, полученное по результатам моделирования, коррелирует с результатами эксперимента эродируемой мишени в области высокой интенсивности S_2 . Однако начиная с радиуса 0.5 мм расчетная плотность тока падает до нуля, т.е. отсутствует периферийная область (область с низкой интенсивностью S_1).

Как показало дополнительное моделирование с учетом влияния вторичных процессов при движении ионов в ИОС в среде рабочего газа (нейтрализация ускоренных ионов (“подхват” электронов), ионизация газа ускоренными ионами, упругое рассеяние на газе, резонансная перезарядка) эти процессы практически не приводят к существенным изменениям в профиле пучка. Как показали расчеты при давлениях 0.5 мТорр, взаимодействие ионного пучка с рабочим газом в ИОС пренебрежимо мало. Предполагается, что несоответствие результатов моделирования, полученных с использованием эмиттанта, с экспериментальными результатами происходит вследствие влияния нестационарных параметров разряда, которые эмиттанс пучка не учитывает по определению.

Поэтому проведено моделирование распределения ионов на мишени на основе данных,

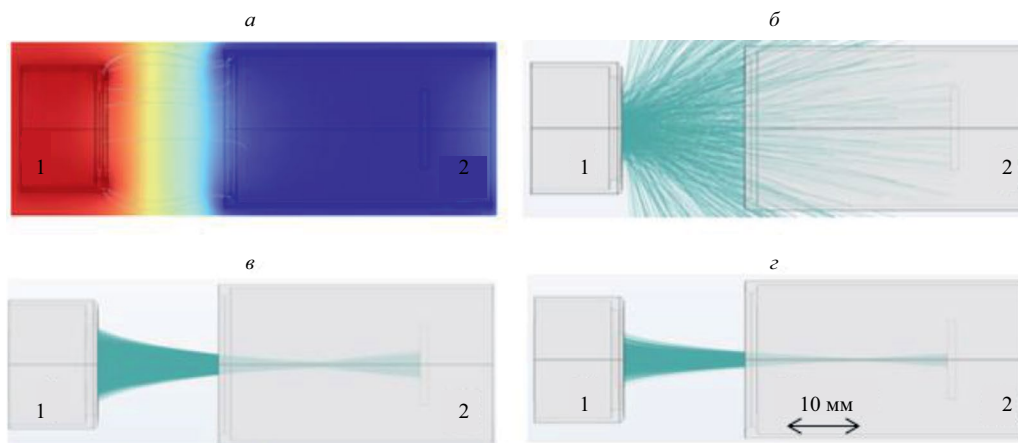


Рис. 9. Моделирование движения пучка в ИОС по данным экспериментально измеренного эмиттанта: 1 – выходная апертура фокусирующего электрода; 2 – ускоряющий электрод. (а) – распределение потенциалов; (б)–(г) – траектории ионов при ускоряющем напряжении: (б) $U_{\text{уск}} = 0$ кВ; (в) $U_{\text{уск}} = -10$ кВ; (г) $U_{\text{уск}} = -25$ кВ.

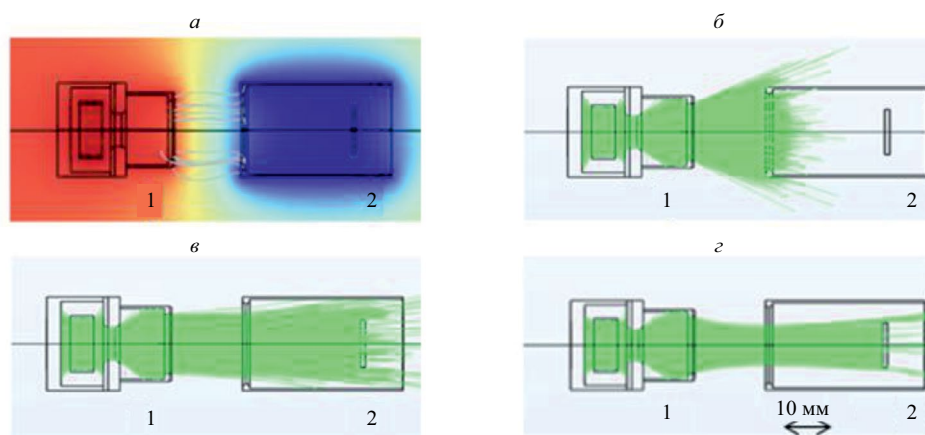


Рис. 10. Моделирование движения пучка в ИОС по данным метода particle-in-cell: 1 – выходная апертура фокусирующего электрода; 2 – ускоряющий электрод. (а) – распределение потенциалов; (б)–(г) – траектории ионов при ускоряющем напряжении: (б) $U_{\text{уск}} = 0$ кВ; (в) $U_{\text{уск}} = -10$ кВ; (г) $U_{\text{уск}} = -25$ кВ.

полученных методом PIC, для учета влияния параметров разряда. Далее представлены результаты моделирования на основе данных метода PIC. На рисунке 13 изображены 2D распределения тока на поверхности мишени от времени работы ИИ. На рис. 14 показаны распределения тока на мишени от времени работы ИИ в сравнении с экспериментальными результатами (см. рис. 14). Для распределения плотности тока, полученного при моделировании по данным PIC, построена “огibaющая” кривая и сопоставлена с экспериментальными результатами (см. рис. 15).

Результаты распределения ионного тока на мишени, полученные при моделировании по данным PIC для первой области мишени S_2 , качественно коррелируют с результатами, полученными из эксперимента. В отличие от моделирования

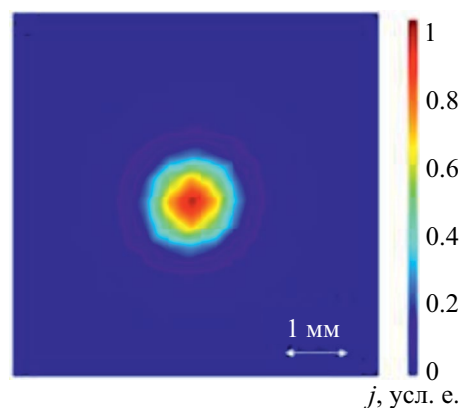


Рис. 11. 2D распределение плотности тока на мишени. $U_{\text{уск}} = -25$ кВ.

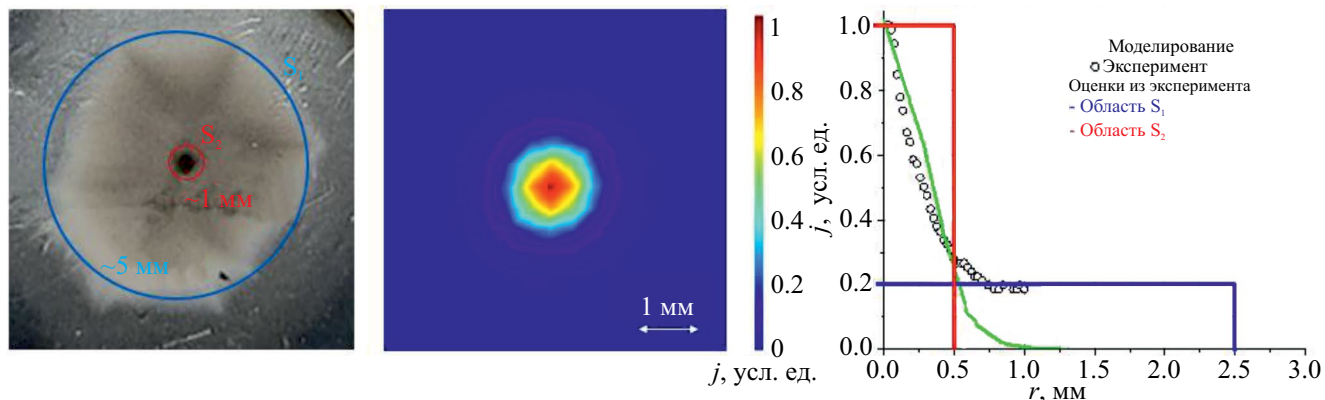


Рис. 12. Распределение плотности тока на поверхности мишени для моделирования с использованием эмиттанта.

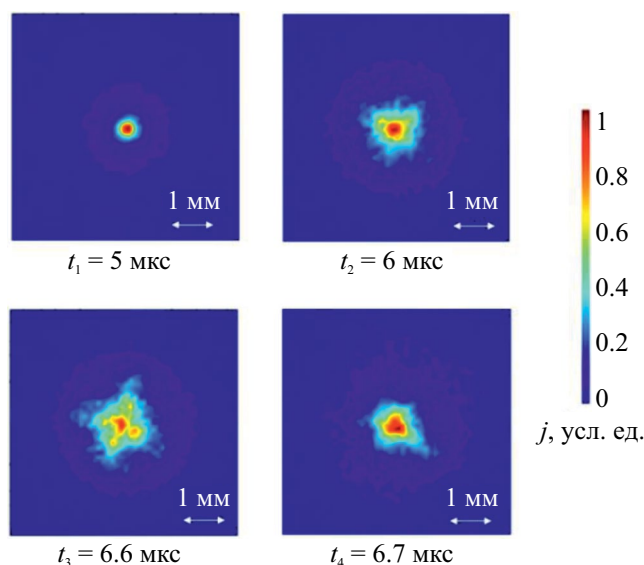


Рис. 13. 2D распределение плотности тока на мишени от времени. $U_{\text{уск}} = -25$ кВ, $U_{\text{ист}} = +2$ кВ.

с использованием эмиттанта, в периферийной области малой интенсивности S_1 для моделирования по данным PIC наблюдается плавно убывающая расчетная плотность тока, которая сходится с экспериментальными данными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, выполнена валидация расчетной модели распыления мишени в МЛУ для дальнейших оценок размера и глубины эрозии мишени. Экспериментально исследовано распределение тока ионов Ag на поверхности мишени. Построена модель ИОС с мишенью и проведено моделирование, в котором в качестве начальных данных старта ионов выступал эмиттанс пучка.

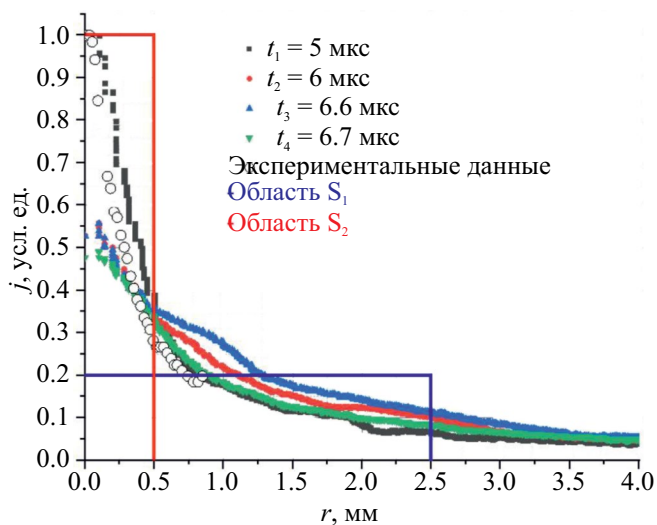


Рис. 14. Распределение тока на мишени для разных времен работы источника.

Построена модель ИИ и ИОС с мишенью и выполнено моделирование, с использованием данных, полученных методом PIC. Показано, что расчетная плотность тока, полученная в моделировании с использованием эмиттанта коррелирует с центральной областью (с областью высокой интенсивности S_2) распыленной мишени. Однако начиная с радиуса 0.5 мм расчетная плотность тока падает до нуля, что не коррелирует с экспериментальными результатами, где наблюдается область с низкой интенсивностью (S_1). Показано, что моделирование, проведенное с использованием данных PIC, совпадает с экспериментальной кривой в центральной области и сходится с экспериментальными данными в области малой интенсивности. Исходя из этого можно полагать, что причиной появления периферийной области эрозии мишени является флуктуация параметров

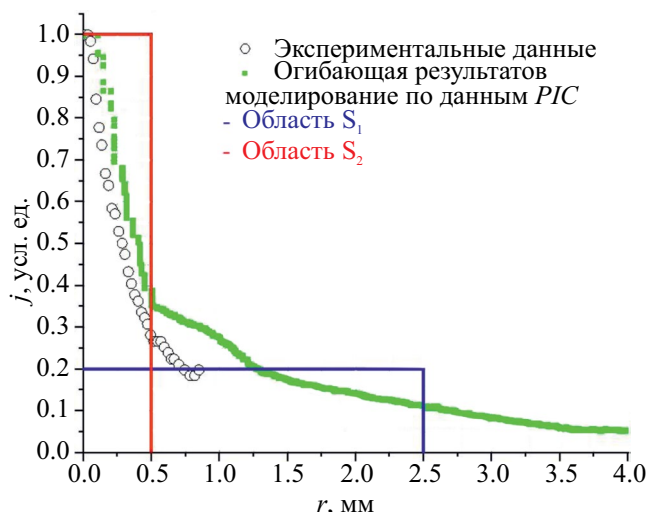


Рис. 15. График огибающей распределения тока на мишени.

разряда в процессе работы ИИ. Моделирование с использованием данных PIC наиболее точно описывает экспериментальные результаты в виде плотности ионного тока на поверхности мишени, которая может в дальнейшем использоваться, например, для моделирования генерации нейтронного потока МЛЮ, где является критичным подробное описание токовой нагрузки на малый участок площади мишени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Valkovic V. 14 MeV neutrons. Physics and applications. London, New York: CRC Press Taylor&Francis Group, 2016. 500 p.
2. http://www.vniia.ru/production/incl/prospekt_element.pdf.
3. Дашков И.Д., Федоров Н.А., Грозданов Д.Н. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 10. С. 1436; Dashkov I.D., Fedorov N.A., Grozdanov D.N. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 10. P. 1113.
4. <http://escholarship.org/uc/item/9vn757hp>.
5. Kanshin I.A., Mamedov N.V., Solodovnikov A.A. et al. // Vacuum. 2022. V. 202. Art. No. 111194.
6. Sy A., Ji Q. // AIP Conf. Proc. 2011. V. 1336. P. 533.
7. Мамедов Н.В., Прохорович Д.Е., Юрков Д.И. и др. // ПТЭ. 2018. Т. 61. № 4. С. 62; Mamedov N.V., Prokhorovich D.E., Yurkov D.I. et al. // Instrum. Exp. Tech. 2018. V. 61. No. 4. P. 530.
8. Mamedov N.V., Prokhorovich D.E., Kanshin I.A. et al. // AIP Conf. Proc. 2018. V. 2011. Art. No. 080006.
9. Coupland J.R., Green T.S., Hammond D.P., Riviere A.C. // Rev. Sci. Instrum. 1973. V. 44. P. 1258.
10. Беграмбеков Л.Б., Довганюк С.С., Евсин А.У. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. № 2. С. 134; Begrambekov L.B., Dovganyuk S.S., Eysin A.U. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. No. 2. P. 117.
11. Rashchikov V.I. // Phys. Procedia. 2015. No. 74. P. 97.
12. Dolgov A.N., Markov V.G., Kanshin I.A. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2016. V. 666. Art. No. 012023.
13. Каншин А.А., Солодовников А.А. // ПТЭ. 2020. Т. 63. № 3. С. 62; Kanshin A.A., Solodovnikov A.A. // Instrum. Exp. Tech. 2020. V. 63. No. 3. P. 315.
14. Белых С.Ф., Евтухов Р.Н., Луткова Л.В. и др. // ЖТФ. 1992. Т. 62. № 6. С. 179; Belykh S.F., Evtukhov R.N., Lutkova L.V. et al. // Tech. Phys. 1992. V. 62. No 6. P. 179.
15. Kanshin I.A. // Proc. EFRE2020. (Tomsk, 2020). P. 474.
16. Rokhmanenkov A.S., Kuratov S.E. // J. Phys. Conf. Ser. 2019. V. 1250. Art. No. 012036.
17. Mamedov N.V., Rokhmanenkov A.S., Solodovnikov A.A. // J. Phys. Conf. Ser. 2021. V. 2064. Art. No. 012039.

The computational model validating of target sputtering in a miniature linear accelerator

I. M. Mamedov^{1, 2 *}, I. A. Kanshin¹, M. S. Lobov¹, N. V. Mamedov^{1, 2}

¹Dukhov Automatics Research Institute, Moscow, 127055 Russia

²National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115522 Russia

*e-mail: schildkrote5552@yandex.ru

We presented the results of an experimental study and numerical simulation of the ion beam current distribution on the target of a collapsible miniature linear accelerator. The comparison of the experimental results with the simulation results is carried out. It is shown that the computational model makes it possible to estimate the effect of an ion beam on target sputtering in a miniature linear accelerator.