12

Определение электродной конфигурации системы ускорения–замедления ионного имплантера ТМ-200Т

© А.К. Ральников,[1,2] Н.В. Мамедов,[1,2] М.Д. Данилов,[1] Е.В. Третьяков,[1] А.А. Азаров,[1] Т.А. Девятайкина,[3] В.А. Павлюченко,[3] А.А. Старостенко[3]

[1]Акционерное общество „Научно-исследовательский институт точного машиностроения“, Москва, Зеленоград, Россия
[2]Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“, Москва, Россия
[3]Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия
e-mail: aralnikov@niitm.ru

Поступило в Редакцию 30 марта 2026 г.
В окончательной редакции 27 июня 2026 г.
Принято к публикации 6 июля 2026 г.

Выполнено численное моделирование системы ускорения-замедления ионного имплантера ТМ-200Т, предназначенного для технологий микроэлектроники. Рассмотрены различные варианты электродной конфигурации ионно-оптической системы с целью обеспечения требуемых параметров пучка ионов Ar^+ в рассматриваемом диапазоне энергий от 2 до 270 keV. Моделирование проводилось с использованием программных пакетов CST Studio Suite и COMSOL Multiphysics с учетом эффекта пространственного заряда. Исследовано влияние геометрии электродов и параметров исходного пучка на размеры пятна, угловой разброс и параллельность ионного пучка на поверхности пластины. Предложена модифицированная конфигурация системы с дополнительными экранирующими электродами, позволяющая существенно уменьшить влияние краевых полей и улучшить характеристики профиля пучка на пластине.

Ключевые слова: ионная имплантация, ионный имплантер, ионно-оптическая система, система ускорения–замедления, моделирование ионных пучков, CST Studio Suite, COMSOL Multiphysics.

DOI: 10.61011/JTF.2027.01.64195.84-26

Введение

Ионная имплантация остается одним из ключевых технологических процессов при создании современных полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, особенно в рамках комплементарной металло-оксид-полупроводниковой (КМОП) технологии [1–6]. Данный метод является основным инструментом формирования сверхбольших интегральных схем (СБИС) с субмикронными и наноразмерными топологическими уровнями. Ионная имплантация обеспечивает точное управление профилем концентрации легирующих примесей и пространственным разрешением, что критически важно для соответствия требованиям современных и перспективных технологических норм производства интегральных микросхем. Возможность варьировать дозу имплантации и энергию ионов в широком диапазоне (на несколько порядков) делает этот метод существенно более гибким по сравнению с другими способами введения примесей [1–6]. За исключением классов специализированных имплантеров молекулярных ионов (кластеров) и simox (для внедрения высокоэнергетичных ионов кислорода) данные установки делятся на три основных класса: High current (высокотоковые/дозовые), Med-current (среднетоковые), Highenergy (высоковольтные) [7].

В настоящее время АО „НИИТМ“, АО „НИИМЭ“ и ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН разрабатывают серию ионных имплантеров для микроэлектроники. Эти установки предназначены для производства приборов с проектной нормой менее 90 nm, импортозамещения и замены устаревшего отечественного оборудования. Разрабатываемый совместно АО НИИТМ и ИЯФ СО РАН среднетоковый ионный имплантер демонстрирует крайне широкие диапазоны энергий 0.2–270 keV и токов 0.04–20 mA. Такая комбинация высокодозного, среднетокового режима практически не встречается в существующих имплантерах [2,3,8,9]. В табл. 1 представлены целевые характеристики создаваемой установки.

В настоящей работе представлены результаты моделирования системы ускорения–замедления пучка и финишного энергоанализатора, которые позволят разработать технические решения для обеспечения узкого углового и энергетического разбросов ионного пучка при высоком ионном токе в широком диапазоне энергий, что облегчит проектирование и создание отечественного ионного имплантера для микроэлектроники, не уступающего западным аналогам.

Таблица 1. Основные характеристики разрабатываемого серийного среднетокового ионного имплантера ТМ-200Т

Диапазон энергии, keV	0.2–270
Диапазон токов пучка, mA	0.04–20
Максимальная мощность пучка	1600 W
Однородность дозы по пластине, %	0.5
Направление сканирования	Вертикальное
Размер ионного луча на пластине, mm	не более 20×30
Угловая расходимость пучка	$\leq 1^\circ$
Параллельность пучка	$\leq 1^\circ$
Набор ионов для имплантации	$^{11}B^+$, $^{11}B^{++}$, $^{49}BF_2^+$, $^{31}P^+$, $^{31}P^{++}$, $^{31}P^{+++}$, P_2^+, $^{40}Ar^+$, $^{75}As^+$, $^{75}As^{++}$, As_2^+, $^{115}In^+$, $^{115}In^{++}$, $^{121}Sb^+$
Разброс по энергиям $\Delta E/E$, %	0.5 (до 80 keV), 1 (до 270 keV)
Разрешение по массе, $M/\Delta M$	не менее 50 (при более 20 keV) не менее 15 (при менее 5 keV)
Частота сканирования луча, kHz	1 ± 0.05

1. Краткое описание принципиальной схемы современного высокоточного имплантера

Анализ наиболее современных моделей показывает, что передовые имплантеры имеют во многом сходную архитектуру и технические характеристики, обусловленные жесткими требованиями актуальных и перспективных КМОП-технологий [1–6].

Принципиальная схема современного высокоточного имплантера представлена на рис. 1 и состоит из двух основных модулей: ионного инжектора (ускорителя частиц) и приемной камеры (технологического модуля). Ионный инжектор включает следующие ключевые элементы: источник ионов типа Бернаса [10] с прямым или косвенным накалом катода, расположенная после него система экстракции и ускорения (обеспечивающая первую ступень ускорения — обычно 10–80 keV в зависимости от требуемого тока пучка). Далее располагается система квадрупольных магнитных линз (дуплет) для фокусировки ионного пучка в магнитный масс-сепаратор, в котором происходит сепарация ионов по отношению m/z. На выходе магнитного масс-сепаратора расположена узкая токоограничивающая щель и система диагностики пучка. Далее следует система квадрупольных магнитных линз (триплет) для корректировки параметров пучка (уменьшение углов расходимости по вертикальной оси), которая направляет квазикруглый или квазиовальный ионный луч на вход электростатического сканера. Электростатический сканер — представляет собой две отклоняющие пластины с переменным полем (≈ 1 kHz), который разворачивает луч в вертикальной плоскости. После чего магнитный параллелизатор обеспечивает высокую степень параллельности сканирующего пучка.

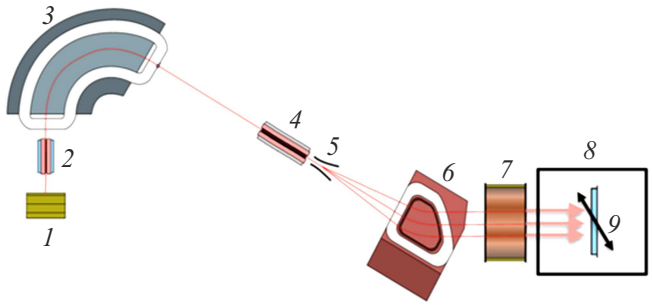


Рис. 1. Принципиальная схема современного высокоточного имплантера: *1* — источник ионов, *2* — система квадрупольных магнитных линз (дуплет), *3* — магнитный масс-сепаратор, *4* — система квадрупольных магнитных линз (триплет), *5* — электростатический сканер, *6* — магнитный параллелизатор, *7* — система ускорения–замедления, *8* — технологический модуль, *9* — обрабатываемая полупроводниковая пластина.

Далее размещена система ускорения–замедления, представляющая собой ионно-оптический узел, предназначенный для формирования требуемой энергии ионов и ее прецизионной стабилизации, подавления нейтральной компоненты, а также окончательной фокусировки пучка с обеспечением заданного углового распределения и степени параллельности на поверхности мишени. Для уменьшения влияния пространственного заряда и стабилизации транспортировки положительно заряженного пучка применяется электронный компенсатор (электронный душ), обеспечивающий частичную нейтрализацию объемного заряда ионов. Весь корпус ионного инжектора может находиться под положительным потенциалом (до 190 kV) относительно заземленного

технологического модуля. Таким образом, осуществляется двухступенчатая (двухкаскадная) схема ускорения, в которой реализуется последовательное ускорение ионного пучка. На первом этапе ионы ускоряются при экстракции из источника (10−80 keV), после прохождения ионного тракта осуществляется дополнительное ускорение (или, в ряде случаев, замедление пучка для точной подстройки энергии). Такая конфигурация позволяет гибко управлять энергетическими параметрами и качеством пучка, обеспечивая диапазон напряжений до нескольких сотен киловольт, и широко используется в среднетоковых (medium current) имплантерах, таких как CECT CI P900HP, Sumitomo MC3-II GP, SMIT NV-GSDIII-180, Nissin EXCEED3000AH-8C, Nissin EXCEED2000AH, Nissin Bey EX, IBS FLEXion 200/400, Applied Materials VIISta 900 3D, 900XP, Axcelis Purion H200, Axcelis Purion M, Axcelis NV-8200P [7]. Среднетоковые машины, использующие двухступенчитый режим ускорения, обычно имеют энергию в несколько сот килоэлектроновольт.

Технологический модуль имплантера включает SMIF-загрузчик (герметичная система транспортировки пластин) для работы с пластинами в чистой среде, вакуумную транспортную систему, процессную камеру и рабочий стол с четырехкоординатным роботизированным приводом (для перемещения и наклона пластины с целью минимизации градиентов дозы). Рабочий стол с облучаемой пластиной перемещается в горизонтальной плоскости. Процессная камера оснащена системой мониторинга параметров ионного пучка (ток, профиль, положение), а также интегрированной системой управления, обеспечивающей согласованную работу всех узлов имплантера и автоматизацию технологического процесса. Криосорбционные насосы обеспечивают высокий рабочий вакуум в процессной камере не менее 10^{-4} Pa. В камере практически отсутствуют трущиеся механические элементы для минимизации генерации частиц. Четырехпортовая система загрузки пластин (через промежуточные шлюзы) обеспечивает механическую производительность до 250 пластин в час.

Таким образом, современные установки ионной имплантации представляют собой высокоинтегрированные системы, в которых сочетаются передовые методы формирования, масс-сепарации, ускорения, сканирования и нейтрализации ионных пучков, что позволяет удовлетворять все более жестким требованиям технологий производства интегральных микросхем. Причем одними из ключевых элементов данных установок являются система ускорения–замедления пучка и электростатический финишный энергоанализатор [11–13].

2. Методика расчетов

Компьютерное моделирование ионно-оптических систем (ИОС) является важнейшим этапом при проектировании современных электрофизических установок [14,15]. Оно позволяет прогнозировать параметры ионного пучка, оптимизировать геометрию элементов и режимы работы системы еще на стадии разработки [16]. Моделирование формирования и транспортировки ионного пучка выполнялось в два этапа с использованием CST Studio Suite [17] и COMSOL Multiphysics [18]. Начальные параметры ионного пучка на входном фланце системы ускорения–замедления (ИОС) были получены в результате сквозного трехмерного моделирования всего предшествующего ионно-оптического тракта имплантера, выполненного в среде CST Studio Suite. Моделирование охватывало следующие элементы тракта: ионный источник, магнитный квадрупольный дуплет, магнитный масс-сепаратор, квадрупольный магнитный триплет, электростатический сканер и магнитный параллелизатор — вплоть до входа в систему ускорения-замедления (рис. 2).

В CST Studio Suite сначала задавалась трехмерная геометрия прибора, где статическим решателем электростатики вычислялось распределение потенциала и поля (решалось уравнение Пуассона для заданных потенциалов электродов). Затем модули Particle Tracking или Electrostatic PIC использовались для трассировки частиц. В частности, Particle Tracking Solver в CST вычислял траектории ионов в рассчитанном поле с учетом или без учета пространственного заряда [17].

Пространственный заряд был учтен с помощью ES-PIC решателя: в этом режиме на каждом временном шаге по распределению ионов пересчитывалась плотность заряда и решалось уравнение Пуассона [19]. При слабой связи пучка с полем (низкой плотности заряда) обычно оказывалось достаточно однократного расчета поля с последующей трассировкой частиц, а при сильной связи рекомендовалось применять итеративный PIC-решатель, который автоматически учитывал влияние заряда пучка [19]. В CST задавались условия эмиссии пучка (поверхность источника частиц с заданным распределением) и поле электродов с фиксированными потенциалами; частицы Ar^+ выпускались с начальной энергией, соответствующей потенциалу источника, и описывались уравнением движения (обычно классическими законами Ньютона–Лоренца). Аргон был выбран потому, что он используется не только для легирования, но и для первичных работ при настройке ионного тракта [20]. Величина тока 1 mA для пучка Ar^+ была выбрана как базовый режим для исследования транспортировки и торможения пучка в экспериментальном образце ИОС. Следует отметить, что максимальный проектный ток 20 mA соответствует режимам с энергиями порядка 80 keV. При более высоких энергиях ионов рабочий ток ограничивается максимальной мощностью пучка (~ 1600 W) и составляет величины порядка нескольких mA.

В среде COMSOL Multiphysics также решалась стационарная электростатическая задача, после чего выполнялась трассировка частиц. Импортировалась 3*D*-модель

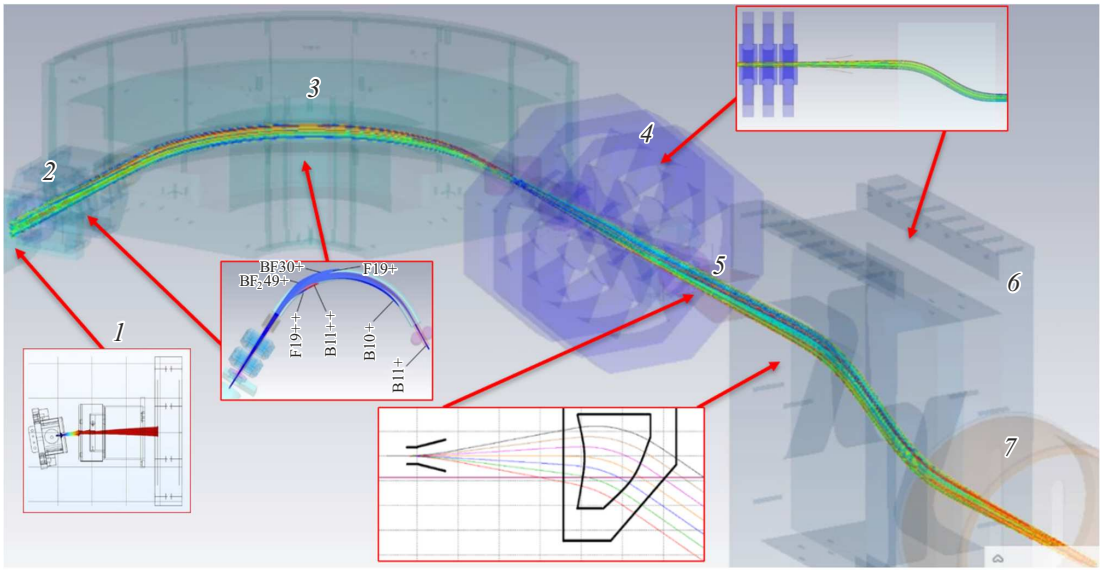


Рис. 2. Траектория ионного пучка аргона при сквозном моделировании ионно-оптического тракта имплантера, выполненного в среде CST Studio Suite. *1* — источник ионов, *2* — система квадрупольных магнитных линз (дуплет), *3* — магнитный масс-сепаратор, *4* — система квадрупольных магнитных линз (триплет), *5* — электростатический сканер, *6* — магнитный параллелизатор, *7* — система ускорения–замедления.

ускоряющей системы (формат STEP), задавались непериодические граничные условия модели вакуума и потенциалы электродов. Интерфейс Electrostatics решал стационарную задачу Пуассона для вычисления потенциала и поля [21]. Далее модуль Charged Particle Tracing вычислял траектории ионов (а при необходимости — нейтралов или электронов) в полученном поле. При большом пространственном заряде в COMSOL автоматически добавлялся мультифизический узел Electric Particle–Field Interaction, при котором плотность заряда пучка включалась в правую часть уравнения Пуассона. Это реализовывалось через Bidirectionally Coupled Particle Tracing Study. При необходимости учитывались столкновения и вторичная эмиссия: в COMSOL использовался встроенный алгоритм Монте-Карло для столкновений с остаточным газом (упругие столкновения, обмен зарядом, генерация вторичных частиц) [22]. Таким образом, COMSOL позволял получать самосогласованное решение — сначала рассчитывалось электростатическое поле (с учетом заряда пучка), затем вычислялись новые траектории, и цикл повторялся до сходимости. Для получения физически верного решения поставленной задачи были подобраны размеры конечных элементов, применявшихся для аппроксимации геометрии модели, и шаг по времени, а также проведена проверка сходимости модели.

Корректировка параметров транспортируемого пучка (размеров, углового разброса, токов) осуществлялась путем варьирования градиентов квадрупольных линз и геометрии обрезающих диафрагм. Сформированные фазовые распределения частиц экспортировались в текстовом формате и использовались в качестве входных данных для последующего моделирования в среде COMSOL Multiphysics. Профили пучков на входе в систему ускорения–замедления с указанием их габаритов и токов представлены на рис. 3.

3. Результаты моделирования

В качестве прототипов системы ускорения-замедления выбраны несколько конструкций, представленных в патентах [23–25]. В [23] предлагается использовать электростатический оптический элемент, который представляет собой ряд электродов, расположенных последовательно вдоль пути ионного пучка для одновременной парализации, коллимации, ускорения/замедления и фокусировки в одном компактном модуле. В [24] описывается система электродов для одновременного ускорения/замедления, фокусировки и отклонения пучка с целью минимизации энергетического разброса ионов, попавших на мишень. В [25] описывается система замедления для угловой фильтрации нейтралов и выделения ионов нужной энергии.

Основным критерием оценки эффективности рассматриваемых конфигураций ИОС являлось обеспечение требуемых параметров пучка на пластине, определяющих однородность дозы имплантации. В качестве ключевых параметров рассматривались размеры ионного пятна на пластине (не более 20×30 mm), угловая расходимость пучка ($\leq 1^\circ$) и параллельность развернутого пучка ($\leq 1^\circ$). Поэтому при анализе различных вариантов ИОС расчеты проводились для тех токов пучка, при которых удавалось обеспечить параметры пучка, близкие к заданным технологическим требованиям.

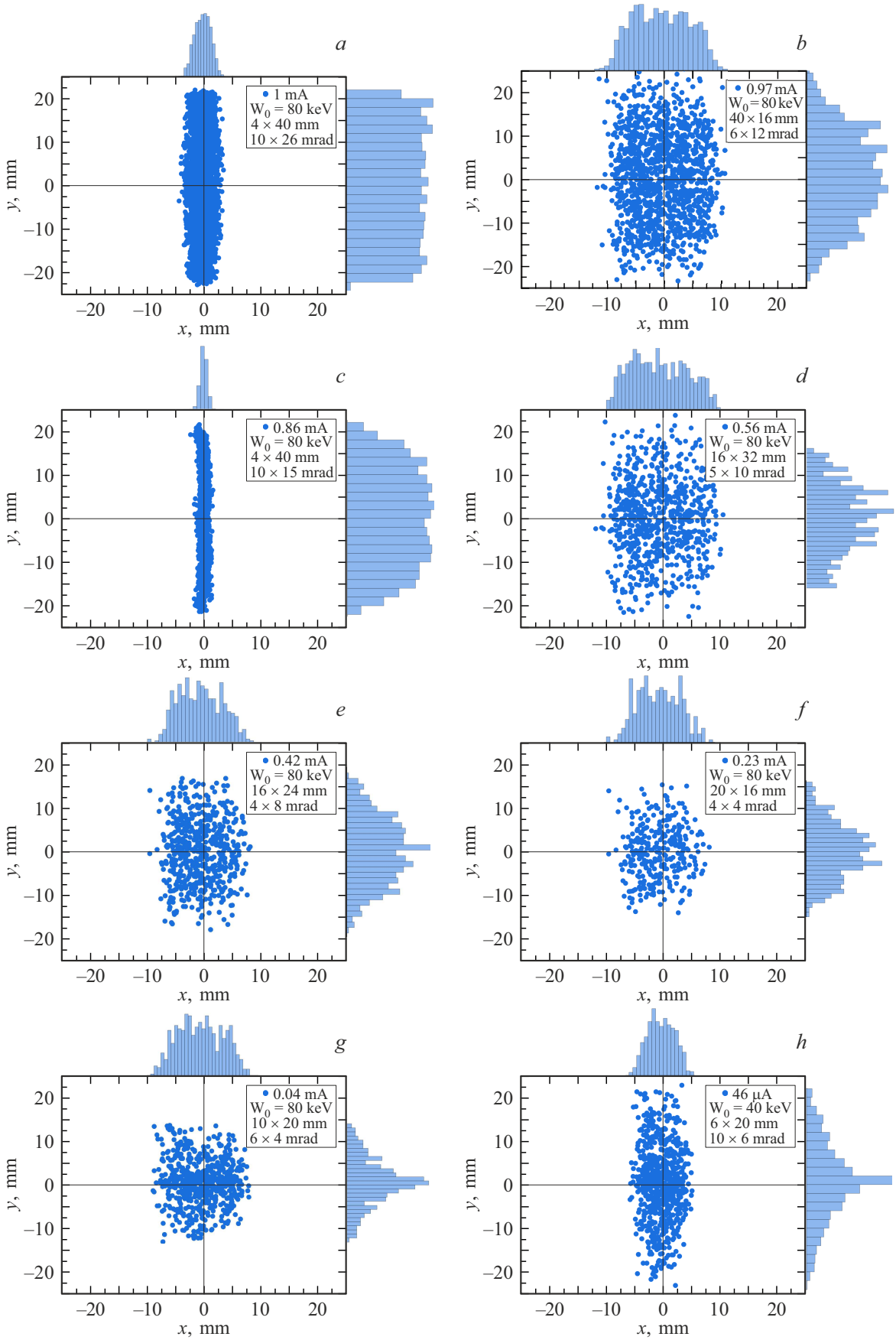


Рис. 3. Различные профили используемых входных пучков с указанием габаритов и токов: *a* — 1, *b* — 0.97, *c* — 0.86, *d* — 0.56, *e* — 0.42, *f* — 0.23, *g* — 0.04 mA, *h* — 46 μA.

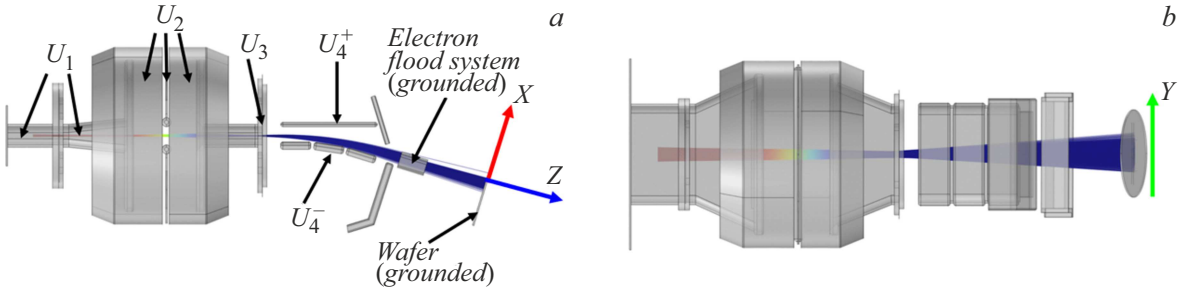


Рис. 4. *a* — траектория пучка тока 1 mA (вид сверху), *b* — вид сбоку в экспериментальном образце системы ускорения–замедления. Цветом обозначена энергия ионов. Конечная энергия ионов — 10 keV.

3.1. Экспериментальный образец ИОС

Конструктивно система ускорения–замедления для экспериментального образца имплантера реализована в виде трехэлектродной экстракционно-фокусирующей линзы (U_1, U_2, U_3, рис. 4), совмещенной с поворотным энергоанализатором. Электродная система имеет вытянутую по вертикали конфигурацию, что позволяет сформировать необходимое распределение электрического потенциала в межэлектродных промежутках и обеспечить эффективное управление фокусировкой пучка при сканировании по высоте (по вертикальной оси). Селективный отбор ионов по энергии осуществляется за счет задания соответствующих потенциалов на поворотных электродах (U_{4+}, U_{4-}, рис. 4), благодаря чему реализуется энергетическая фильтрация частиц перед их транспортировкой к обрабатываемой кремниевой пластине. На выходе ИОС установлен ограничивающий апертурный электрод, определяющий рабочее поперечное сечение пучка и устраняющий частицы с избыточным угловым или энергетическим разбросом, а также нейтральные компоненты. Данная система должна обеспечивать требуемые параметры пучка на пластине в диапазоне конечных энергий 80–270 keV, но также была рассмотрена ее работа и при низких энергиях (ниже 80 keV). Следует отметить, что рассматриваемая конфигурация ИОС относится к экспериментальному образцу имплантера, в котором энергия пучка на выходе источника составляет до 80 keV, тогда как весь инжектор находится под потенциалом до +190 kV относительно земли. Поэтому диапазон 80–270 keV является базовым режимом работы данной конфигурации, а режимы более низких энергий рассматривались как режимы глубокого торможения пучка. Численное моделирование траектории ионного пучка проводилось при использовании начального пучка Ar^+ с током 1 mA (рис. 2) и в соответствии с методикой, описанной в разд. 1. При этом для каждой конечной энергии (270, 170, 80, 40, 10 keV) из диапазона расчеты проводились при различных начальных вертикальных смещениях пучка Y_0 (0, 30, 60 и 90 mm), что соответствует прохождению пучка через ИОС в разных положениях вертикальной развертки. Случаи конечной энергии ниже 80 keV (40 и 10 keV) были рассмотрены для определения возможности работы данной конструкции ИОС при энергиях ионов, меньших требуемых для экспериментального образца имплантера. Используемые в расчетах значения потенциалов на электродах U_1, U_2, U_3, U_{4+}, U_{4-} (относительно земли) приведены в табл. 2.

Таблица 2. Численные значения потенциалов на электродах U_1, U_2, U_3, U_{4+}, U_{4-} (относительно земли) экспериментального образца ИОС

Конечная энергия, keV	U_1, kV	U_2, kV	U_3, kV	U_{4+}, kV	U_{4-}, kV
270	190	100	0	0	−33
170	90	50	0	0	−20.75
80	0	−100	0	0	−9.8
40	−40	−100	0	0	−4.95
10	−70	−40	0	0	−1.35

В результате моделирования были получены профили пучка на пластине (рис. 4, 5) и распределения по координатам пластины x, y и углам падения α, β (здесь $\alpha = \arctan(v_x/v_z)$ и $\beta = \arctan(v_y/v_z)$, где v_x, v_y, v_z — проекции скоростей частиц на соответствующие координатные оси пластины), по которым были вычислены характерные параметры пучка на пластине, представляющие собой ширины распределений на уровне половины высоты $\mathrm{FWHM}_{x,y,\alpha,\beta}$ (Full Width at Half Maximum) и величины параллельности развернутого ионного луча $\Delta\beta = \beta_{Y0=90\,\mathrm{mm}} - \beta_{Y0=0\,\mathrm{mm}}$.

По полученным результатам можно сделать вывод о том, что в диапазоне конечных энергий 80–270 keV требования к параметрам ионного пучка на пластине оказываются полностью выполненными: $\mathrm{FWHM}_{x,y} \le 30$ mm, $\mathrm{FWHM}_{\alpha,\beta} \le 1^\circ$, $\Delta\beta \le 1^\circ$, и, таким образом, рассматриваемая конструкция ИОС является пригодной для экспериментального образца ТМ-200Т. Тем не менее видно, что с уменьшением конечной энергии пучка его качество ухудшается, а величины характерных параметров на пластине приближаются к

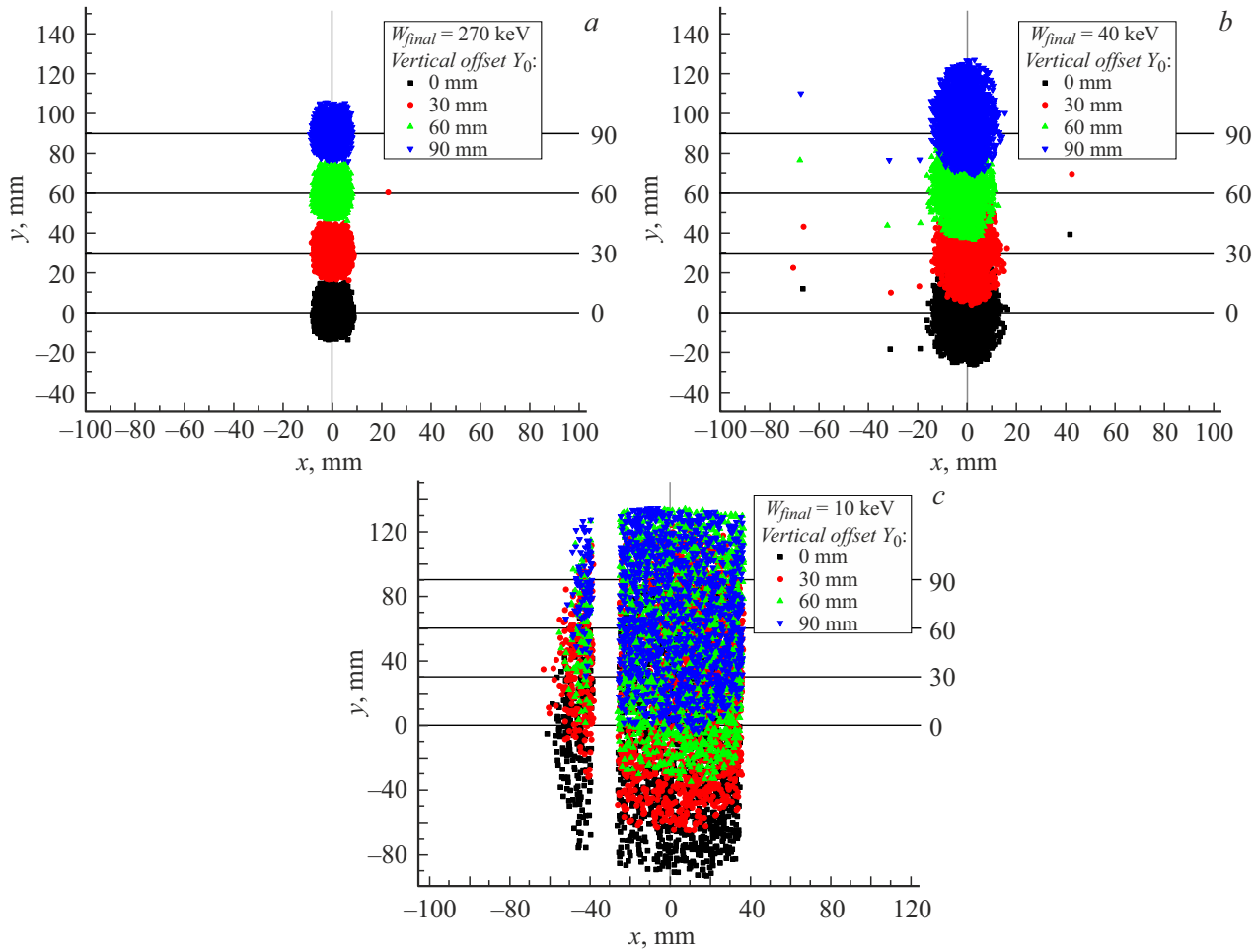


Рис. 5. Профили пучка на пластине при конечной энергии ионов: *a* — 270, *b* — 40, *c* — 10 keV.

предельно допустимым значениям, и при конечной энергии 40 keV уже немного выходят за рамки требований к качеству пучка, а значит нижний энергетический предел приемлемой работы ИОС составляет около 40 keV.

На энергии пучка 10 keV наблюдается существенное увеличение его угловой расходимости после выхода из ИОС. В результате часть ионов перехватывается входной апертурой электронного душа, расположенной на траектории транспортировки пучка. Это приводит к формированию характерных особенностей распределения плотности тока на мишени: в правой части профиля наблюдается резкая граница, обусловленная полным отсечением части пучка апертурой, тогда как область пониженной плотности тока в левой части („белое пятно“) соответствует тени, создаваемой торцевой поверхностью апертуры. Для наглядного отображения указанных эффектов распределение пучка на рис. 5 представлено в увеличенном масштабе. Анализируя полученные габариты пучка при конечной энергии 10 keV (более 60 mm по горизонтали и более 100 mm по вертикали), можно сделать вывод о том, что рассматриваемая конструкция системы ускорения–замедления не обеспечивает требуемых характеристик пучка на мишени при этой энергии. Причиной этому, как видно из полученных траекторий (рис. 4), является уширение профиля пучка из-за перефокусировки при резком торможении в области поворотных электродов.

Таким образом, для достижения требуемых технологических параметров пучка при низких энергиях необходимо устранить этот недостаток ИОС, реализовав более плавное торможение ионов [26], но используя минимальное количество дополнительных электродов.

3.2. Модифицированная геометрия ИОС

Опытный образец имплантера в отличие от экспериментального должен обеспечивать качество имплантации во всем диапазоне конечных энергий ионов (0.2–270 keV). Однако, как показали расчеты из разд. 3.1, существующая конструкция ИОС не удовлетворяет этому требованию. Тем не менее, учитывая, что она полностью покрывает диапазон конечных энергий 80–270 keV, целесообразно взять ее в качестве отправной точки для модификации.

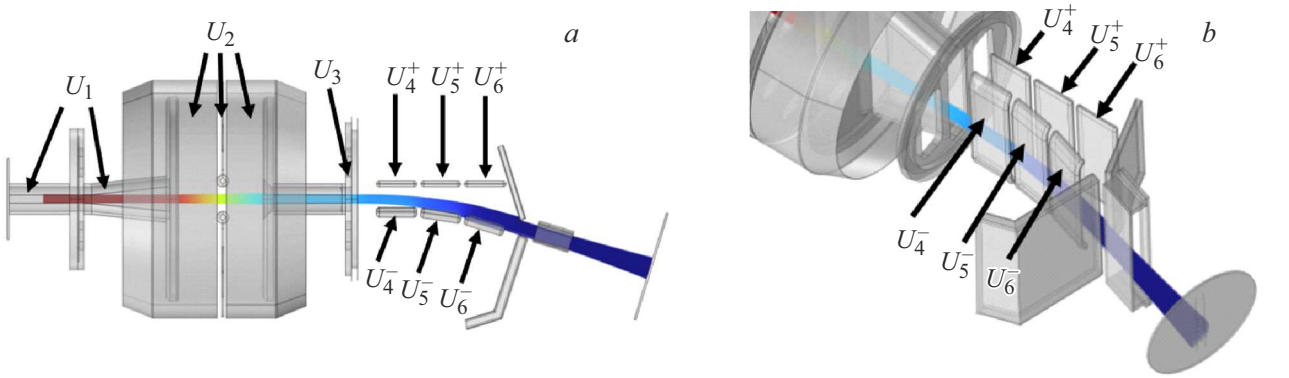


Рис. 6. Конфигурация системы ускорения–замедления с разделенными поворотными электродами и траектория ионного пучка 1 mA в ней: *a* — вид сверху, *b* — 3*D*-вид. Цветом обозначена энергия ионов.

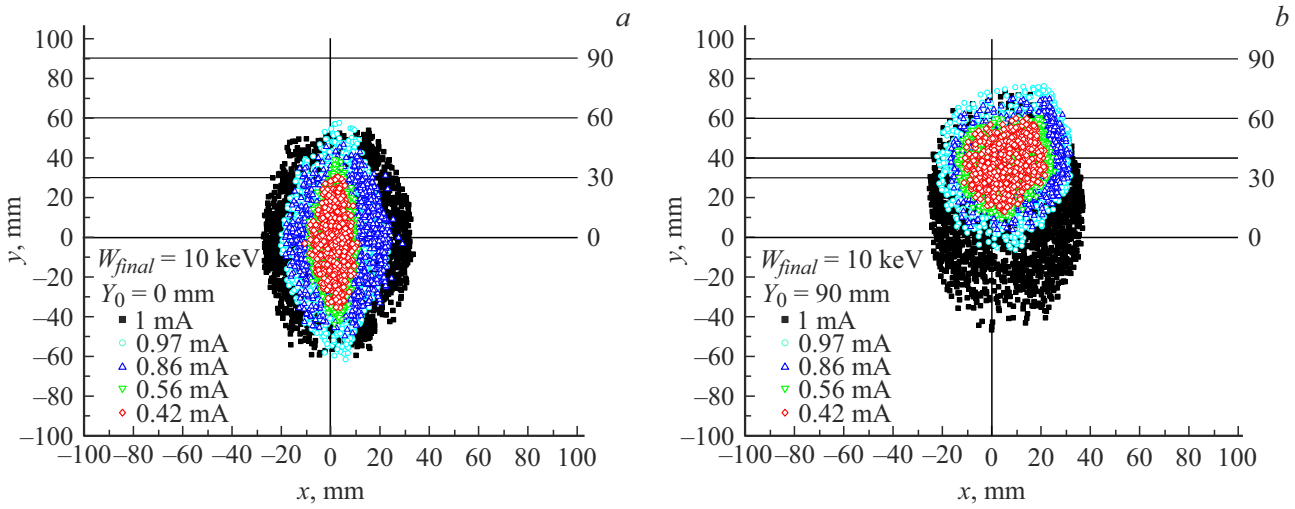


Рис. 7. Профили пучков на пластине при *a* — центральном прохождении и *b* — прохождении в крайнем положении развертки при использовании конфигурации ИОС с разделенными поворотными электродами. Конечная энергия ионов — 10 keV.

Для решения выявленных проблем ИОС было сделано следующее преобразование: поворотные электроды энергоанализатора были разделены на три пары (U_4, U_5, U_6) с независимой подачей напряжения (рис. 6), что должно обеспечить возможность более плавного торможения пучка и более гибкой настройки его фокусировки. Значения потенциалов на электродах модифицированной ИОС (относительно земли) для случая конечной энергии ионов 10 keV были выбраны следующим образом: $U_1 = -70$ kV, $U_2 = -40.5$ kV, $U_3 = -20.5$ kV, $U_{4+} = -15.5$ kV, $U_{4-} = -18.5$ kV, $U_{5+} = -10.5$ kV, $U_{5-} = -12$ kV, $U_{6+} = 0$ kV, $U_{6-} = -1.58$ kV.

Сделанные преобразования системы действительно привели к положительному результату (рис. 7) — габариты пучка в обоих направлениях удалось значительно уменьшить; тем не менее параметры на пластине, полученные при таком исходном пучке, остались неприемлемыми из-за большой начальной расходимости ионного пучка. Поэтому следующим шагом исследования стало варьирование характеристик (профиля, эмиттанса и тока) исходных пучков. Используемые далее в настоящей работе варианты начальных пучков описаны в разд. 1.

Было проведено численное моделирование траекторий пучков с токами 0.42, 0.56, 0.86 и 0.97 mA при использовании модифицированной геометрии ИОС. Расчеты проводились только при наиболее показательных случаях центрального прохождения пучка ($Y_0 = 0$ mm) и прохождения в крайнем положении развертки ($Y_0 = 90$ mm). Полученные в результате профили пучков на пластине и траектории приведены на рис. 7 и 8 соответственно. Как видно из рис. 8, при таком варианте электродов при сканировании пучка по вертикали наблюдается его фокусировка к центру пластины в вертикальном направлении и значительное изменение формы профиля пучка (рис. 7), что сильно затрудняет задачу обеспечения однородности дозы на всей площади пластины. Было установлено, что этот эффект вызван влиянием краевых

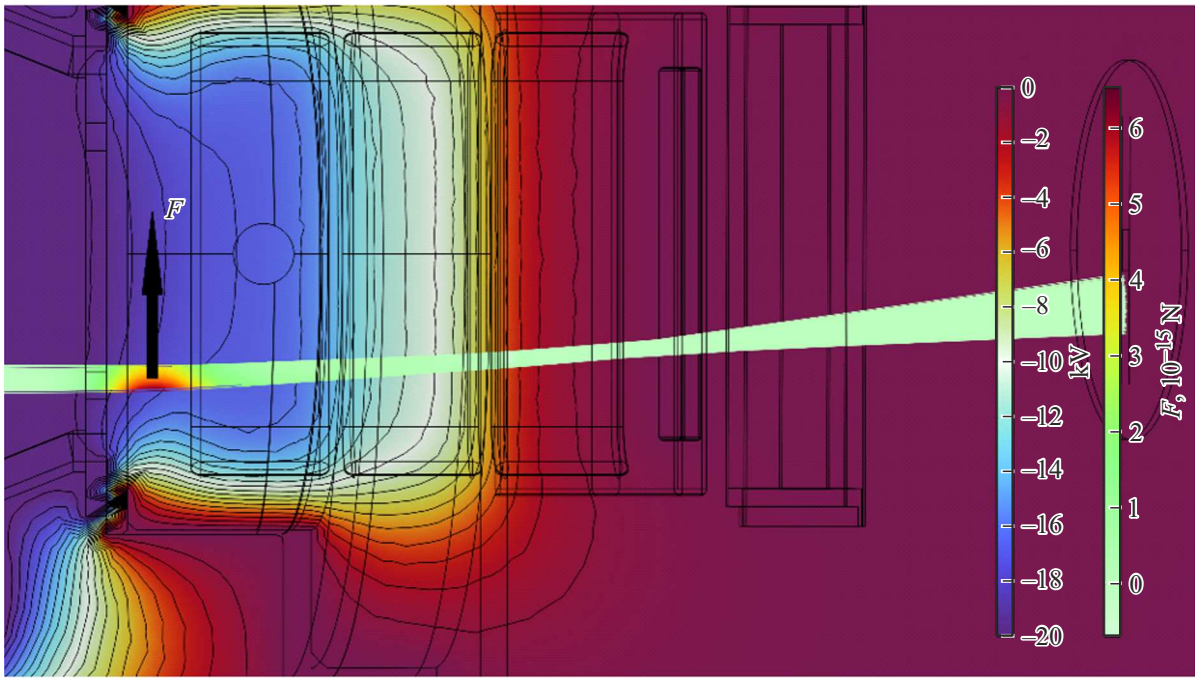


Рис. 8. Траектория пучка с током 0.42 mA при прохождении в крайнем положении развертки. Вид сбоку с указанием распределения электрического потенциала и силы, действующей на ионы пучка.

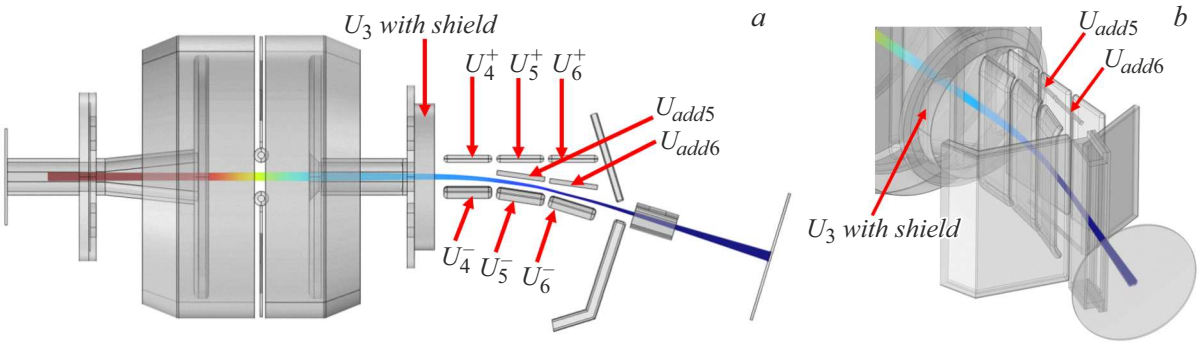


Рис. 9. Конфигурация системы ускорения–замедления с добавленными экранирующими цилиндрическими электродами и пример траектории ионного пучка в ней: *a* — вид сверху, *b* — 3*D*-вид.

Таблица 3. Варианты геометрии и выбора напряжения для экранирующих электродов

Геометрия	Выбор напряжения	U_{add5}	U_{add6}
С экраном без цилиндров	–	–	–
С экраном и цилиндрами	U^+	$U_{add5} = U_{5+}$	$U_{add6} = U_{6+}$
	U^-	$U_{add5} = U_{5-}$	$U_{add6} = U_{6-}$
	U_{mean}	$U_{add6} = (U_{5+} + U_{5-})/2$	$U_{add6} = (U_{6+} + U_{6-})/2$

полей (рис. 8), которые в большей степени проявляют себя вблизи конечных положений развертки в области поворотных электродов. Кроме того, полученные в этой конфигурации значения габаритов пучка и его углового разброса на пластине, хотя и уменьшились по сравнению с предыдущим случаем, но все еще не удовлетворяют технологическим требованиям. Наилучшие же характеристики дает пучок с наименьшим током — 0.42 mA. Из-за значительного воздействия краевых эффектов данная конфигурация также не является пригодной для технологического использования.

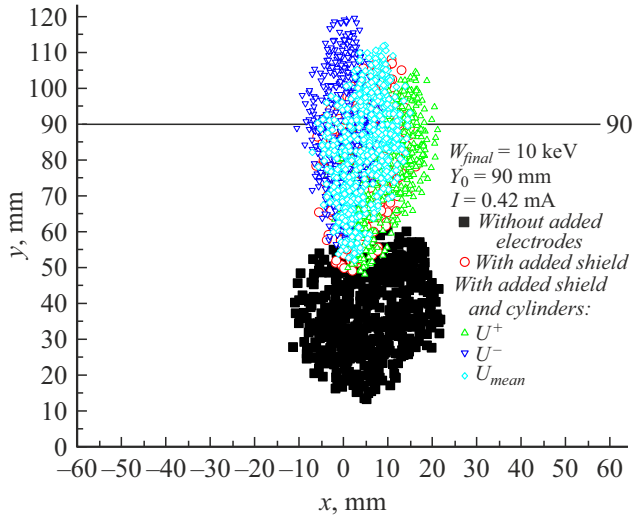


Рис. 10. Профили пучка 0.42 mA на пластине при прохождении в крайнем положении развертки ($Y_0 = 90$ mm) при использовании и без использования экранирующих электродов. Конечная энергия ионов — 10 keV.

3.3. Финальная геометрия

Эффективным решением для подавления краевых полей оказалось добавление в систему ускорения–замедления цилиндрических экранирующих электродов, представляющих собой продолжение электрода U_3 (так называемый экран — shield), и цилиндрических элементов вблизи краев области поворота пучка с независимой подачей напряжения (U_{add5} и U_{add6}) (рис. 9). Было рассмотрено несколько вариантов геометрии таких электродов и выбора напряжения, приложенного к ним (табл. 3).

Для всех этих вариантов было проведено моделирование траектории ионного пучка с током 0.42 mA и получены соответствующие профили пучка на пластине (рис. 10). Используемые при этом потенциалы на электродах U_1, U_2, U_3, U_{4+}, U_{4-}, U_{5+}, U_{5-}, U_{6+}, U_{6-} те же, что и в разд. 3.2.

Рис. 10 демонстрирует, что добавление экранирующих электродов приводит к практически полному устранению сноса пучка к центру пластины, что подтверждает их эффективность в подавлении краевых эффектов. Тем не менее при такой конфигурации по-прежнему наблюдается изменение профиля пучка при сканировании, хотя и существенно менее значительное, чем в предыдущем варианте без экранировки. Это свидетельствует о том, что некоторая степень неоднородности поля по вертикали все же остается. Наиболее действенным оказался выбор напряжения на цилиндрах $U_{add5} = U_{5-}$, $U_{add6} = U_{6-}$, при котором смещение пучка и изменение его профиля оказываются наименьшими. Также расчеты показали, что габариты пучка на пластине уменьшаются по сравнению с предыдущим случаем, но все равно остаются существенно бóльшими в сравнении с намеченными целевыми показателями (рис. 11).

Следующим этапом стало рассмотрение начальных пучков с другим профилем и с еще меньшим током — 0.23 и 0.04 mA — с целью выявления пучка, обеспечивающего выполнение требуемых параметров на пластине. Расчеты проводились при наиболее эффективном выборе напряжения на цилиндрах U^-, а значения потенциалов на электродах U_1, U_2, U_3, U_{4+}, U_{4-}, U_{5+}, U_{5-}, U_{6+}, U_{6-}, U_{add5}, U_{add6} (относительно земли) задавались в соответствии с табл. 4. Полученные в результате профили и характеристики пучков на пластине представлены на рис. 12. Показано, что при использовании пучка с током 0.23 mA технологические требования на характеристики пучка на пластине почти полностью удовлетворяются, за исключением углового разброса в вертикальном направлении (имеет место превышение величины ширины на половине высоты распределения на $\approx 1.5^\circ$ сверх допустимого) и углового разброса в горизонтальном направлении (превышение на $\approx 0.4^\circ$).

При использовании же начального пучка с еще меньшим током 0.04 mA требования к характеристикам пучка также оказываются выполненными с превышением углового разброса в горизонтальном направлении всего на $\approx 0.4^\circ$. Стоит отметить, что на данном этапе такие превышения ($\sim 1^\circ - 2^\circ$) угловой расходимости считались приемлемыми. Таким образом, можно утверждать, что модифицированная ИОС позволяет достичь соблюдения технологических требований на характеристики пучка в диапазоне токов до 0.23 mA при конечной энергии ионов 10 keV. Также рассмотрены случаи получения более низкой энергии ионов на пластине. В частности, был рассмотрен случай торможения до 5 keV, при этом в качестве начального был сразу взят пучок 0.04 mA, поскольку 0.23 mA дает характеристики, близкие к максимально допустимым, уже при конечной энергии 10 keV. Полученные в результате расчетов профили и характеристики пучка на пластине приведены на рис. 12 и 13 соответственно. Как видно, технологические требования на характеристики пучка на пластине полностью выполняются, за исключением углового разброса в горизонтальном направлении (превышение на $\approx 0.4^\circ$).

Попытки получить пучок приемлемого качества при торможении с 80 keV до энергии, меньшей 5 keV (в частности, 2, 1, 0.2 keV), не увенчались успехом, что связано с несколькими причинами.

Во-первых, во время торможения продольная составляющая скорости v_z уменьшается при сохранении поперечной составляющей в вертикальном направлении v_y, что приводит к росту поперечного угла:

$$\Delta\beta_{\perp_T} = v_y/v_z.$$

Начальная поперечная составляющая скорости неизбежно появляется вследствие наличия температуры пучка. Ясно, что для проведения пучка через ИОС необходимо задать начальный угол схождения пучка $\Delta\beta_{\perp_0}$,

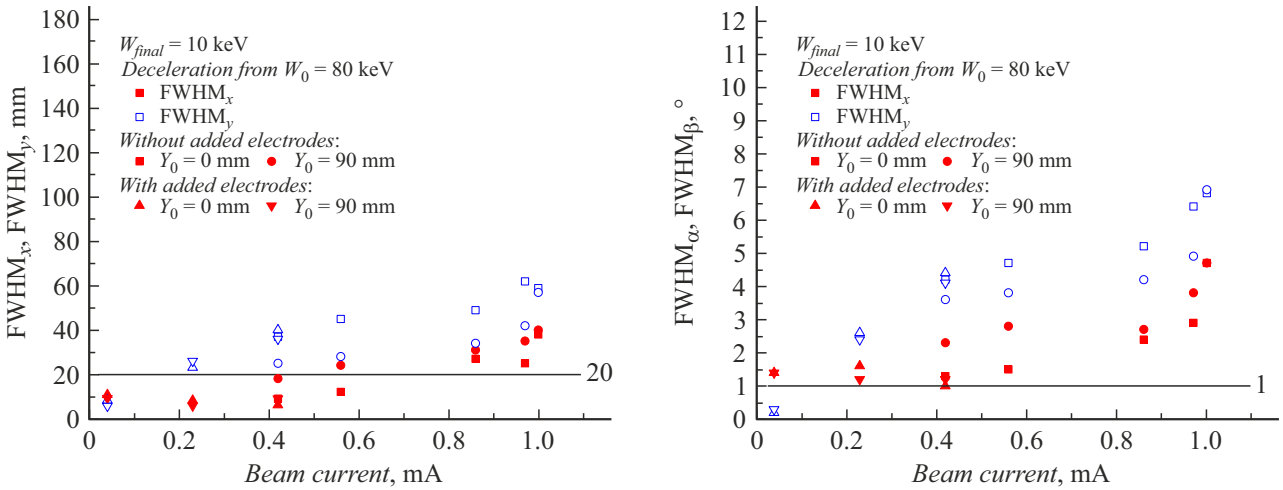


Рис. 11. Характеристики пучков на пластине при использовании и без использования экранирующих электродов. Конечная энергия ионов — 10 keV.

Таблица 4. Численные значения потенциалов на электродах (относительно земли) ИОС в финальной геометрии

Конечная энергия, keV	U_1, kV	U_2, kV	U_3, kV	U_{4+}, kV	U_{4-}, kV	U_{5+}, kV	U_{5-}, kV	U_{6+}, kV	U_{6-}, kV	U_{add5}, kV	U_{add6}, kV
10	−70	−40.5	−20.5	−15.5	−18.5	−10.5	−12	0	−1.58	−12	−1.58
5	−75	−40.5	−20.5	−15.5	−17.5	−10.5	−12.3	0	−0.94	−12.3	−0.94
2	−38	−20	−10	−5.45	−6.05	−2.5	−3.4	0	−0.18	−3.4	−0.18
1	−39	−21	−10.7	−5.6	−6	−2.5	−3.1	0.1	−0.12	−3.1	−0.12

превышающий этот температурный разброс. Тогда увеличение поперечных углов будет определяться отношением начальной W_0 и конечной W_{final} энергий пучка:

$$\Delta\beta_\perp \approx \Delta\beta_{\perp_0} \cdot \sqrt{W_0/W_{final}}.$$

Таким образом, с уменьшением конечной энергии ионов неизбежно растет поперечный угловой разброс пучка в вертикальном направлении. Например, чтобы при торможении с 40 до 1 keV получить конечный разброс по углам $\Delta\alpha_\perp$, равный 0.02 rad ($\approx 1\,^\circ$), необходимо обеспечить начальный угол схождения $\Delta\alpha_{\perp_0} \approx 0.003$ rad, что требует наличия системы коллимации пучка по углам. Также при схождении пучка в области вблизи кроссовера, следует учитывать возрастание влияния пространственного заряда, которое приводит к дополнительной дефокусировке и нарастанию углов.

Во-вторых, изменение электрического поля вдоль траектории пучка должно быть тем более плавным, чем меньше энергия пучка, так как по теореме о циркуляции электрического поля E имеем

$$E_x = -\frac{x}{2}\frac{\delta E_z}{\delta z},$$

т. е. при быстром изменении продольного поля возникающее поперечное поле перефокусирует низкоэнергетичный пучок, который в результате придет на пластину расфокусированным.

У последней проблемы существует несколько способов решения: увеличить количество электродов, как это было сделано в [26] или уменьшить энергию пучка на входе в ИОС, как это было сделано в [11]. Очевидно, что можно снизить энергию вылета ионного пучка из источника. В [11]энергия снижена до 4 keV, что, естественно, в нашем случае приведет к потерям при прохождении основного тракта ионного инжектора. В настоящей работе тем же способом, который был описан в разд. 1, устанавливая напряжение на вытягивающем электроде источника в 40 kV, мы рассчитали новый пучок с энергией на входе в ИОС 40 keV и с током 46 μA (рис. 3). Было осуществлено моделирование торможения этого пучка в ИОС с 40 до 2 keV и до 1 keV (рис. 12, 13). Как видно, полученные параметры пучка пластине удовлетворительны для энергии 2 keV (и выше). Резкий рост пространственных и угловых характеристик пучка при низкой энергии свойственен многим ионным имплантерам [27–29]. В [27], например, показано, что в некоторых случаях увеличение размера пучка до $\sim 40 \times 40$ mm положительно влияет на однородность легирования. В работах [28,30] указывается, что при энергиях ниже 5 keV

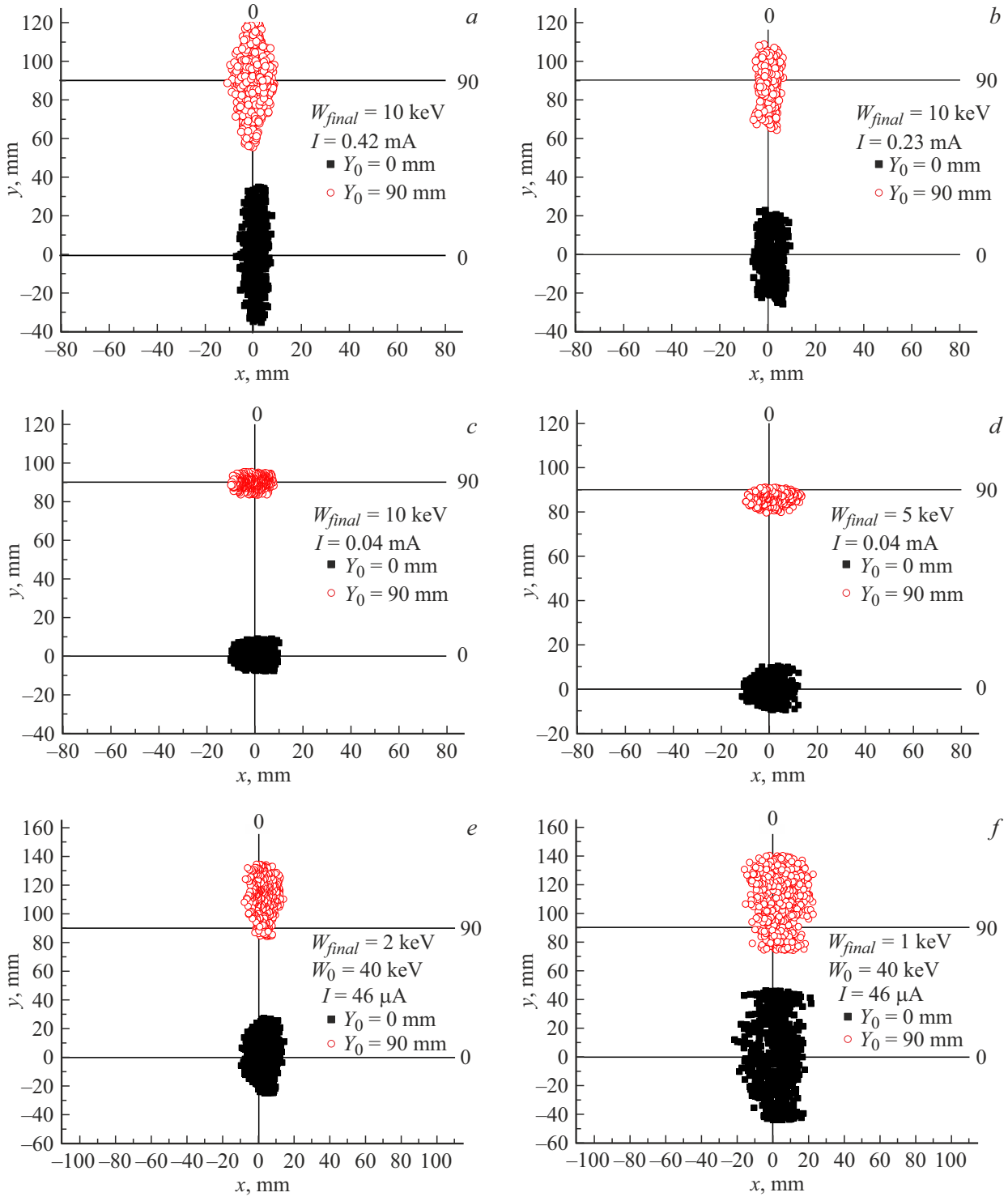


Рис. 12. Профили пучка *a* — 0.42, *b* — 0.23, *c* — 0.04 (W_{final} = 10 keV), *d* — 0.04 mA (W_{final} = 5 keV), *e* — 46 μA (W_{final} = 2 keV), *f* — 46 μA (W_{final} = 1 keV) на пластине при центральном прохождении (Y_0 = 0 mm) и при прохождении в крайнем положении развертки (Y_0 = 90 mm) при использовании экранирующих электродов с выбором напряжения U^-.

угловая расходимость лежит в диапазоне 1.5–2.5°. Однако современные требования для специализированных имплантеров на пучок растут [20,31]. Это говорит о том, что предпринятых мер по уменьшению начальной энергии пучка может оказаться недостаточно. А значит, для обеспечения работы с энергиями 2 keV и ниже требуются другие способы устранения недостатков данной конструкции ИОС. Например, при низких энергиях используют „электронные души“ для компенсации положительного пространственного заряда поперечным

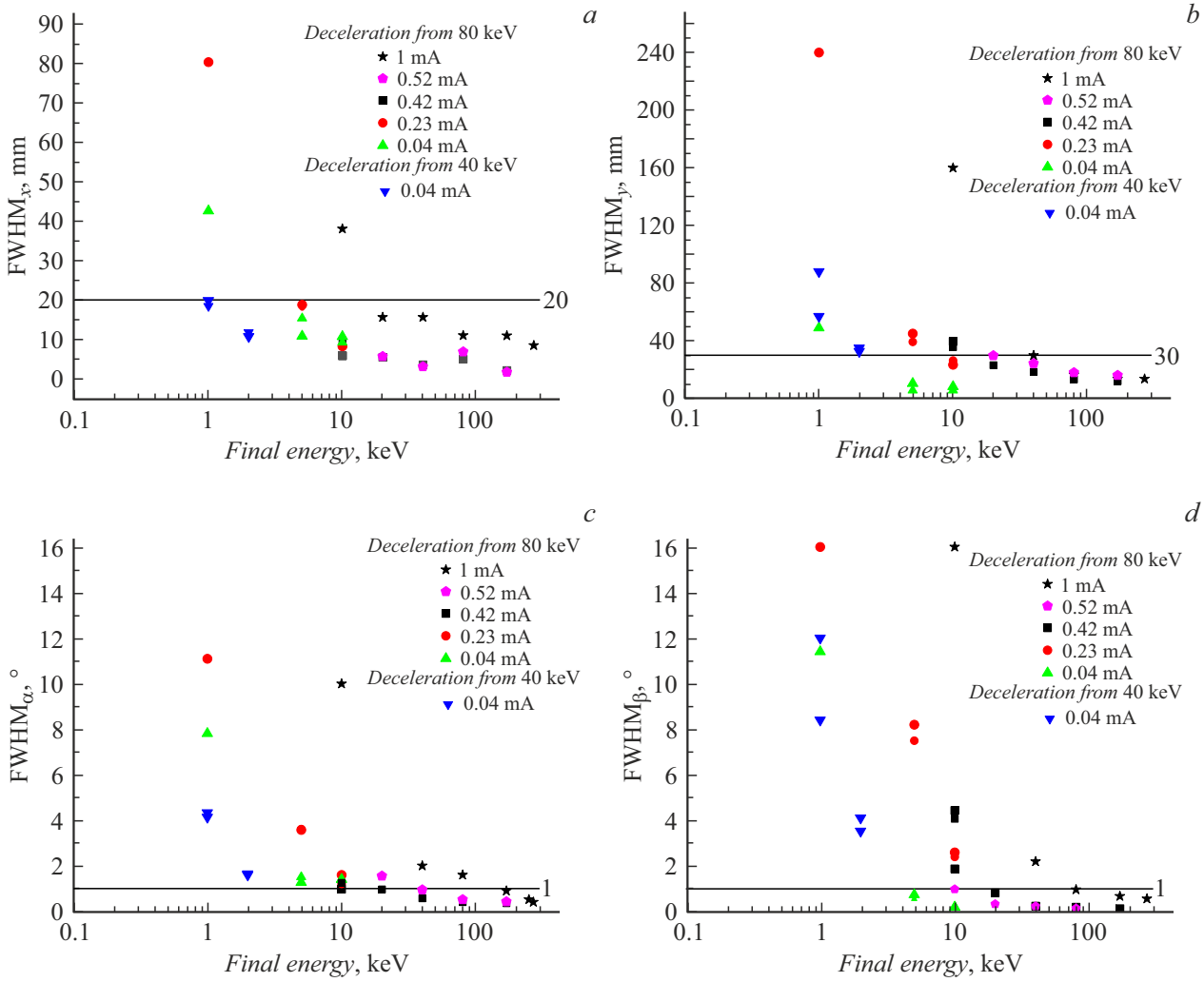


Рис. 13. Полученные характеристики ионных пучков на пластине при различных конечных энергиях: *a* — $FWHM_x$, *b* — $FWHM_y$, *c* — FWHM

электронным потоком [31–33]. Следует отметить, что моделирование процессов компенсации пространственного заряда электронами представляет собой отдельную сложную расчетную задачу, требующую самосогласованного описания движения ионов, электронов и формируемых ими электромагнитных полей. В отличие от выполненного в настоящей работе моделирования ионной оптики такое исследование требует применения методов Particle-In-Cell (PIC) [34]. В рамках настоящей работы рассмотрены возможности улучшения параметров пучка за счет оптимизации геометрии и электростатической структуры ионно-оптической системы. Исследование процессов электронной компенсации пространственного заряда и их влияния на транспортировку пучков с энергиями ниже 2 keV планируется выполнить в рамках отдельной работы.

Заключение

В работе было проведено комплексное численное моделирование траектории ионного пучка в системе ускорения–замедления ионного имплантера ТМ-200Т. Следует подчеркнуть, что приведенные результаты относятся, прежде всего, к экспериментальному образцу ИОС и режимам работы с пучком Ar^+, используемым при настройке и диагностике ионного тракта. Было исследовано несколько вариантов модификации конструкции системы и начальных параметров пучков. Был найден вариант геометрии ИОС (с добавленными экранирующими цилиндрическими электродами), который позволяет скомпенсировать краевые эффекты и, как следствие, предотвратить фокусировку пучка к центру мишени и искажения формы пятна пучка при сканировании, что обеспечило параллельность развернутого ионного луча $\leq 0.1\,^\circ$. Показано, что предложенная конструкция обеспечивает выполнение технологических требований для конечных энергий ионов от 2 до 270 keV. Кроме того, было показано, что найденная конфигурация гарантирует требуемые размеры пятна (FWHM $6 - 13 \times 6 - 30$ mm) и угловой расходимости ($\leq 1\,^\circ$) ионного пучка на мишени в диапазоне токов до 230 μA при конечных энергиях ионов ≥ 10 keV и до 40 μA

при конечных энергиях ≥ 2 keV. Формирование пучка приемлемого качества с конечной энергией менее 2 keV потребует дополнительных мер по устранению оставшихся недостатков полученной конструкции системы ускорения–замедления, среди которых могут быть увеличение числа электродов ИОС для более плавного торможения и образование входного пучка с максимально возможной параллельностью в вертикальном направлении. Этим задачам будут посвящены следующие работы.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] L.M. Rubin, R. Simonton. *Applications of ion implantation in CMOS process technology*. In J.F. Ziegler (editor). *Ion Implantation: Applications, Science and Technology* (2018)

[2] M.I. Current, L.M. Rubin, F. Sinclair. *Commercial Ion Implantation Systems*. In W. Lerch, M. Current (editors). *Ion Implantation Science and Technology-2018* (Edgewater: Ion Implantation Technology Co., 2018), p. 03-1–03-41.

[3] M. Tanyo, M. Naito. SEI Techn. Rev., **73**, 22 (2011).

[4] M. Nastasi, J.W. Mayer. *Ion Implantation and Synthesis of Materials* (Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 2006)

[5] А.В. Афанасьев, В.А. Ильин, В.В. Лучинин. Изв. вузов. Электроника, **27** (4), 439 (2022). DOI: 10.24151/1561-5405-2022-27-4-439-462

[6] L. Rubin, J. Poate. Industrial Physicist, **9** (3), 12 (2003).

[7] M. Current. *Ion Implantation for Fabrication of Semiconductor Devices and Materials*. In book: *Industrial Accelerators and Their Applications*. Chapter 1 (World Scientific, 2012). DOI: 10.1142/9789814307055_0002

[8] L.A. Larson, J. Williams, M. Current. Rev. Accelerator Sci. Technol., **4**, 11 (2011).

[9] Bo Vanderberg, P. Heres, E. Eisner, B. Libby, J. Valinski, W. Huff. *Introducing Purion H, a scanned spot beam high current ion implanter. 2014 20th International Conference on Ion Implantation Technology (IIT)* (2014), p. 1–4.

[10] A. Hershcovitch, B.M. Johnson, V.A. Batalin, G.N. Kropachev, R.P. Kuibeda, T.V. Kulevoy, A.A. Kolomiets, V.I. Pershin, S.V. Petrenko, I. Rudskoy, D.N. Seleznev, A.S. Bugaev, V.I. Gushenets, I.V. Litovko, E.M. Oks, G.Yu. Yushkov, E.S. Masunov, S.M. Polozov, H.J. Poole, P.A. Storozhenko, A.Ya. Svarovski. Rev. Sci. Instrum., **79**, 02C507 (2008). DOI: 10.1063/1.2801648

[11] N. White, J. Chen, C. Mulcahy, S. Biswas, R. Gwilliam. AIP Conf. Proceed., **866**, 335 (2006). DOI: 10.1063/1.2401525

[12] H. Yokoo, H. Suzuki, R. Fukui, T. Hisamune, M. Tomita, T. Nishihashi, K. Tonari, S. Ogata. AIP Conf. Proceed., **866**, 633 (2006). DOI: 10.1063/1.2401597

[13] C. Campbell, A. Cucchetti, F. Sinclair, P. Kellerman, S. Radovanov, S. Falk. AIP Conf. Proc., **1496**, 296 (2012). DOI: 10.1063/1.4766547

[14] А.С. Бердников, Л.Н. Галль, В.Д. Саченко, Ю.И. Хасин, А.В. Сапрыгин, В.А. Калашников, Ю.Н. Залесов, А.Б. Малеев. Научное приборостроение, **13** (4), 3 (2003).

[15] О.Н. Петрович, И.С. Русецкий. Вестник Полоцкого гос. ун-та. Серия С, Фундаментальные науки, **12**, 2 (2019).

[16] H. Ito, N.R. White. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, **55**, 527 (1991). DOI: 10.1016/0168-583X(91)96225-A

[17] CST Studio Suite®2023. URL: https://www.3ds.com/products/simulia/electromagnetic-simulation/particle-dynamics

[18] COMSOL Multiphysics® (2023). URL: https://www.comsol.com

[19] https://www.researchgate.net/profile/SmrityDwivedi/post/CST_Studio_Suite_2021-Kinetic_Settings/attachment/653b3d133e8c356740d61852/AS%3A11431281201475843%401698381074753/download/CST+Studio+Suite+-+Charged+Particle+Simulation.pdf

[20] B. Vanderberg, S. Drummond, J. Valinski. MRS Advances, **7**, 1482 (2022). DOI: 10.1557/s43580-022-00446-5

[21] Электронный ресурс. Режим доступа: https://doc.comsol.com/6.4/doc/com.comsol.help.particle/particle_ug_modeling.05.04.html

[22] I.A. Kanshin, N.V. Mamedov, A.A. Solodovnikov, N.E. Efimov. Vacuum, **202** (3), 111194 (2022). DOI: 10.1016/j.vacuum.2022.111194

[23] W.D. Lee, F. Sinclair. Patent US 9 978 556 B2. URL: https://patents.google.com/patent/US9978556B2/en

[24] R.D. Rathmell, B.H. Vanderberg, Yo. Huang. Patent US 6 777 696 B1. 2004. URL: https://patents.google.com/patent/US6777696B1

[25] J.-L. Chen, L. Chen. Patent US 6 489 622 B1. URL: https://patents.google.com/patent/US6489622B1/en

[26] P.J. O'Connor, G.E. Leroi, J. Allison. American Society for Mass, **2**, 322 (1991). DOI: 10.1016/1044-0305(91)80024-2

[27] S. Takemura, S. Sakai, E. Murayama. MRS Advances, **7**, 1463 (2022). DOI: 10.1557/s43580-022-00467-0

[28] Sh. Sakai, M. Tanjyo, N. Hamamoto, S. Umisedo, T. Kobayashi, T. Yamashita, T. Matsumoto, T. Ikejiri, K. Tanaka, Yu. Koga, S. Yuasa, M. Naito, N. Nagai. AIP, **866**, 605 (2006). DOI: 10.1063/1.2401590

[29] S. Takemura, M. Imura, S. Sakai. MRS Advances, **10**, 481 (2025). DOI: 10.1557/s43580-025-01179-x

[30] J. DeLuca, C. Ryu, S. Choi, G. Cai, E. Eisner. MRS Advances, **7**, 1279 (2022). DOI: 10.1557/s43580-022-00395-z

[31] T.N. Horsky, M.I. Current, S.K. Hahto, D.G. Bilbrough, D.C. Jacobson, W.A. Krull, R.D. Goldberg, N. Hamamoto, S. Umisedo. AIP Conf. Proc., **1066**, 403 (2008). DOI: 10.1063/1.3033648

[32] C. Lan, I.D. Kaganovich. Phys. Plasmas, **27**, 043108 (2020). DOI: 10.1063/1.5128521

[33] Ya. Gotoh, H. Tsuji, Sh. Taguchi, K. Ikeda, T. Kitagawa, J. Ishikawa, Sh. Sakai. AIP Conf. Proceed., **1496**, 368 (2012). DOI: 10.1063/1.47665653

[34] C. Lan, I.D. Kaganovich. Phys. Plasmas, **27**, 043108 (2020). DOI: 10.1063/1.5128521