12

Компактный масс-спектрометр для контроля ионной коррекции формы поверхности

© И.Д. Оськин, М.С. Михайленко, А.Е. Пестов, А.К. Чернышев, И.Г. Забродин, Д.С. Дмитриев, Н.И. Чхало

Институт физики микроструктур РАН,
607680 Нижний Новгород, Россия
e-mail: oskilya@ipmras.ru

Поступило в редакцию 5 мая 2026 г.
В окончательной редакции 5 мая 2026 г.
Принято к публикации 5 мая 2026 г.

Разработан прибор, предназначенный для регистрации ионов Si^{28+} для контроля количества распыленного материала при проведении процедуры финишной коррекции локальных ошибок формы поверхности подложек рентгеновской оптики методом ионно-пучковой коррекции.

Ключевые слова: распыление, масс-спектрометрия, ионное травление, кремний, IBF.

DOI: 10.61011/JTF.2026.10.63619.148-26

Введение

В связи с прогрессом в технологии напыления многослойных рентгеновских зеркал нормального падения [1–4] стоит задача создания светосильной оптики дифракционного качества (под дифракционным качеством понимается то, что пространственное разрешение оптической системы определяется эффектами дифракции излучения, а не ошибками изготовления оптических элементов) для мягкого рентгеновского и экстремально ультрафиолетового диапазонов длин волн. Для достижения этих целей требуется существенное повышение качества оптических поверхностей, как с точки зрения точности их формы (допустимые среднеквадратичные ошибки формы лежат в субнанометровом диапазоне), так и шероховатости (атомарного уровня) [5]. Такие точность и гладкость поверхности достигаются только при использовании ионно-пучковых технологий обработки оптических деталей на финальной стадии [6]. Для этого чаще всего используются низкоэнергетичные ($E_{ion} < 1.5\,\mathrm{keV}$) пучки ускоренных ионов Ar, Ne и Xe. В основе ионно-пучкового травления лежит эффект физического распыления, который был описан для аморфных и поликристаллических мишеней Зигмундом в работе [7].

В процессе обработки поверхности мишени (основной материал подложек для рентгеновской оптики — плавленый кварц и монокристаллический кремний) методом ионно-пучкового травления основное значение имеет возможность предсказания результата точного значения толщины распыленного слоя. На основании проведенных ранее опытов можно говорить о вполне стабильном распылении частиц с поверхности образца на больших временах работы установки [8]. Однако на финишных стадиях коррекции формы поверхности глубины травления уже $\sim 1\,\mathrm{nm}$, что приводит к уменьшению и времени воздействия ионного пучка в каждой точке поверхности $\approx 0.001\,\mathrm{s}$. Следствием этого является увеличение вклада в процесс ионного травления различных технологических особенностей, в первую очередь, это наличие на поверхности загрязнений либо окислов, скорость удаления которых, как правило, значительно отличается от скорости травления основного материала обрабатываемой детали. Другим немаловажным фактором является быстродействие процессов включения/выключения ускоряющего напряжения в процессе обработки, поскольку процедура коррекции производится при поточечной обработке поверхности, причем при перемещении от точки к точке происходит выключение ускоряющего напряжения ионного источника. Следствием этих особенностей технологического процесса является увеличение ошибок процедуры коррекции от расчетной карты травления. Естественным путем повышения точности обработки является переход от косвенного контроля и измерений по результатам травления (*ex situ*) к прямому мониторингу количества удаленного вещества непосредственно в процессе травления (*in situ*).

Существуют методы контроля толщины как оптические, так и на основе изменения частоты генератора. Так, в работе [9] использовались лазерная интерферометрия и рефлектометрия для отслеживания изменения толщины слоя в процессе плазмо-химического и реактивного ионного травления, а в работе контроль толщины напыленной пленки производится с помощью кварцевых генераторов [10]. Однако оптические методы не применимы за счет быстрого запыления поверхностей элементов оптической системы и, как следствие, переходу в нерабочее состояние за счет потери интенсивности сигнала. Методы на основе кварцевых генераторов ограничены способом применения максимальной толщиной пленки, которую могут задетектировать (единицы микрометров). Хотя стоит отметить, их высокую точность $\sim 1\,\mathrm{nm}$, однако, необходимо постоянно менять кварцевые генераторы, что при современных задачах глубокой асферизации

($10-100\,\mu$m) является скорее недостатком. Поэтому для решения задачи контроля за процессом ионно-пучковой коррекции формы поверхностей оптических элементов ключевое значение имеет выбор типа масс-анализатора, способного работать в условиях быстропротекающего процесса с высоким временным разрешением.

Среди непрерывных масс-анализаторов традиционно выделяются магнитные и квадрупольные. Магнитные секторные приборы обеспечивают высокое разрешение и чувствительность, разделяя ионы в однородном магнитном поле в зависимости от их массы, однако их использование в условиях реального технологического вакуумного поста затруднено из-за больших габаритов [11]. Наиболее распространенными на сегодняшний день являются квадрупольные анализаторы, где ионный пучок фильтруется за счет высокочастотного переменного напряжения, подаваемого на четыре параллельных электрода [12]. Они компактны и обладают достаточной чувствительностью для анализа остаточных газов, однако стандартный диапазон масс и, что критичнее для нашей задачи, принципиальная неспособность разделять частицы по кинетической энергии ограничивают их применение при контроле распыления.

Импульсные масс-анализаторы, такие как времяпролетные (ToF-MS), работают по принципу зависимости скорости движения заряженных частиц от их массы в бесполевом пространстве. Эти приборы обладают теоретически неограниченным диапазоном масс, высоким быстродействием и отлично подходят для анализа микроскопических количеств вещества. Однако получение количественной информации о потоке частиц в реальном времени с их помощью затруднено из-за импульсного характера работы и необходимости накопления сигнала при низких концентрациях [13]. Альтернативой являются спектрометры ионно-циклотронного резонанса с фурье-преобразованием (FT-ICR), обеспечивающие рекордное масс-разрешение за счет вращения ионов в сильном магнитном поле, но требующие сверхвысокого вакуума и сложной прецизионной магнитной системы, что исключает их интеграцию в установку ионно-пучковой коррекции [14]. Еще одной разновидностью импульсных устройств является ионная ловушка, где используются кольцевые и концевые электроды для накопления и селективного выброса ионов на детектор. Несмотря на компактность и возможность селективного накопления вещества, квадрупольные ловушки имеют схожие с непрерывными квадруполями ограничения по работе с частицами, имеющими значительный разброс по начальной энергии [10].

Альтернативный подход основан на регистрации продуктов распыления с помощью масс-спектрометрии. Так, масс-спектрометрия вторичных ионов (ВИМС англ. SIMS) успешно применена в работе [15], где авторы отслеживали сигнал вылетающих частиц для определения момента о достижении „стоп-уровня“ в образце. Принцип работы и возможности метода ВИМС подробнее рассмотрены в работе [16]. Однако при использовании масс-спектрометров для контроля процесса травления сталкиваются с рядом ограничений. Так, коммерческие ВИМС-системы, как правило, имеют большие габариты и неудобны в установке, а также рассчитаны на накопление сигнала за длительное время, либо на анализ в импульсном режиме с ограниченной скважностью. В результате их временное разрешение оказывается недостаточным для мониторинга быстропротекающих процессов, что является необходимым в случае субнанометровых точностей контроля формы поверхности. Таким образом, существует задача о разработке специализированного высокочувствительного детектора основного изотопа кремния 28 с минимальными габаритами. Более того, атомная масса кремния 28 совпадает с молекулярным азотом N_2, вклад которого в парциальное давление остаточных газов в камере является доминирующим и при использовании вышеперечисленных методов может приводить к ошибке.

В рамках настоящей работы предлагается конструкция компактного масс-спектрометра, настроенного на детектирование основного изотопа кремния 28.

1. Схема масс-спектрометра

Для разработки облика масс-спектрометра на первом этапе были проведены оценки количества распыляемых в процессе ионно-пучковой обработки поверхности атомов в единицу времени. С помощью методики, изложенной в работе [17], было определено, что за 1 s распыляется порядка 10^{15} атомов. Данный результат позволяет рассчитывать на уверенную количественную регистрацию изменения объема распыляемого материала при изменении параметров процесса.

С учетом вышесказанного была предложена следующая структура специализированного масс-спектрометра (рис. 1)

Как можно видеть, предложено разделить масс-спектрометр на пять блоков:

1. Коллиматор частиц — его задача выделить только частицы, имеющие вектор скорости, направленный от области воздействия ионным пучком, и отбросить хаотичное тепловое движение в камере.

2. Ионизатор частиц — камера ионизации, в которой происходит ионизация частиц для их дальнейшего анализа. Необходимый элемент масс-спектрометра, поскольку масс-анализ производится для заряженных частиц, за счет их взаимодействия с электромагнитным полем.

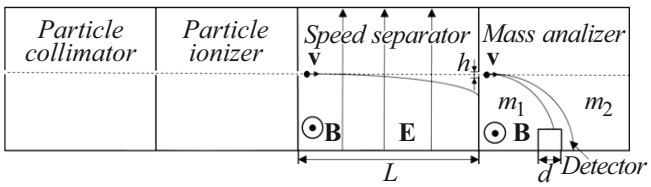

Рис. 1. Схема масс-спектрометра.

3. Сепаратор скоростей — в данной камере производится сепарация частиц по скорости движения (выделяются только частицы, движущиеся со скоростью, соответствующей характерной энергии распыляемых атомов Si при его облучении ионами Ar с энергией 1000 eV и отсекаются рассеянные в данном направлении ионы молекулярного азота).

4. Масс-анализатор — в данной камере производится сепарация частиц по атомной массе.

5. Детектор — элемент, демонстрирующий сигнал при попадании частиц.

1.1. Регистрирующий элемент (детектор)

В качестве детектора было решено использовать коммерчески доступный вторичный электронный умножитель ВЭУ-6 (Баспик, Россия), схема и фотография прибора преставлены на рис. 2.

Как видно на схеме, прибор обладает так называемой непрерывной динодной системой (каналом, изготавливаемым из свинцово-силикатных стекол с удельным сопротивлением $10^9-10^{10}\,\Omega\cdot$cm), в которой электронные потоки умножаются вдоль поверхностей с непрерывным изменением потенциалов. Каналовые электронные умножители ВЭУ-6, обладают низкими шумами, менее 1 pulses/s [18], а также позволяют работать при низком, порядка 10^{-5} mm Hg, вакууме [19], характерном при ионно-пучковом распылении. В работе [18] было проведено исследование линейности регистрации детекторов, в том числе ВЭУ-6 и было показано, что нелинейность на уровне 1 % начинает проявляться при загрузках более 30 000 pulses/s.

1.2. Ионизатор

Для ионизации атомов, прошедших коллиматорное отверстие, предложено использовать схему, изображенную на рис. 3.

Таким образом, пролетая в зазоре между катодом и анодом частица будет ионизоваться и пролетать в следующую камеру.

1.3. Камера масс-анализатора

Рассмотрим камеру масс-анализатора, для которой необходимо определить характерные размеры с целью

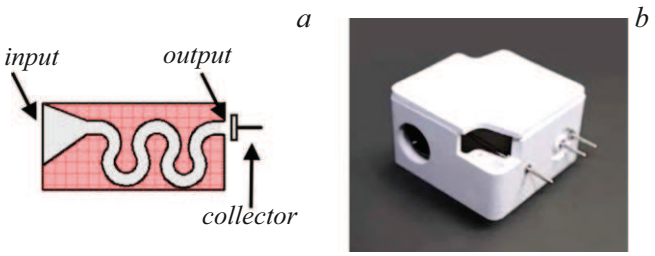

Рис. 2. Схема (*a*) и фотография (*b*) каналового электронного умножителя ВЭУ-6.

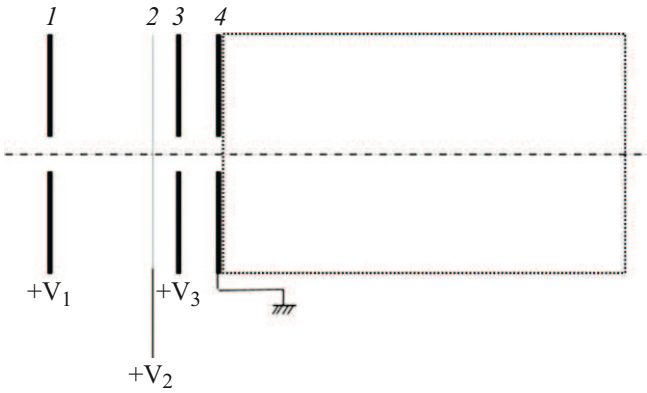

Рис. 3. Схема ионизатора: *1* — входная диафрагма, *2* — катод, *3* — анод, *4* — выходная диафрагма.

последующего расчета индукции отклоняющего магнитного поля и оценки ларморовского радиуса. Для корректного размещения масс-спектрометра в вакуумной камере предполагается ограничиться размерами: поперечное сечение порядка — 5 cm, длина — порядка 10 cm.

Частица, попадая в постоянное магнитное поле, направленное перпендикулярно плоскости ее движения, начинает двигаться по окружности. Радиус данной окружности определяется выражением

$$R = \frac{m \cdot v}{e \cdot B},$$

где R — ларморовский радиус частицы с зарядом e, массой m, движущейся со скоростью v, в поле с магнитной индукцией B. Какой величины необходимо взять магнитную индукцию, чтобы диаметр окружности не превосходил размеров прибора? Ввиду того, что основной материал подложек, применяемых в рентгенооптике является кремний, то рассмотрим частицы массы 28 amu. В таком случае

$$B > \frac{m \cdot v}{e \cdot R} = \frac{28 \cdot 1.6 \cdot 10^{-27} \cdot 4.6 \cdot 10^3}{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 5 \cdot 10^{-2}} = 0.02576\,\text{T}.$$

Таким образом, для дальнейших расчетов было взято поле $B = 0.05152$ T. Частицы, которые нас не интересуют, должны двигаться по отличному радиусу, что может быть вызвано только отличием по массе. Рассмотрим, на какое расстояние улетит частица, отличающаяся массой на 1 amu ($\Delta m = 1$ amu) при пролете 1/4 окружности:

$$\Delta x = \frac{2 \cdot v \cdot \Delta m}{e \cdot B} = \frac{2{\cdot}4.6 \cdot 10^3 \cdot 1{\cdot}1.6 \cdot 10^{-27}}{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 515.2 \cdot 10^{-4}} \approx 0.0018\,\text{m}.$$

Таким образом, получается, что частицы другого вещества (с массой, отличающейся на 1 amu) будут пролетать мимо детектора, если установить его диаметр меньше 1.8 mm. Предполагая далее, что детектор имеет отверстие диаметром 1 mm ($\Delta x = 0.5$ mm), можно определить погрешность скорости движения частицы,

которую можно допустить на входе в масс-анализатор:

$$\Delta v = \frac{\Delta x B e}{2m} = \frac{5 \cdot 10^{-4} \cdot 515.2 \cdot 10^{-4} \cdot 1.6 \cdot 10^{-19}}{2 \cdot 28 \cdot 1.6 \cdot 10^{-27}} \approx 46\,\text{m/s}.$$

Таким образом, для точного количественного масс-анализа пролетающих частиц необходимо провести сепарацию частиц по скорости их движения.

1.4. Сепаратор

Для сепарации частиц по скоростям предлагается использовать дополнительную камеру со скрещенными электрическим и магнитным полями. Камера, как и в случае с коллиматорной, будет иметь малоразмерные входное и выходное отверстия, через которые прямолинейно смогут пройти лишь частицы с выбранной скоростью, т. е. в этом случае можно подобрать напряженность электрического и индукцию магнитного полей таким образом, чтобы дрейф частицы в электрическом поле компенсировался циркуляцией в магнитном поле.

На частицу, пролетающую в электромагнитном поле, будет действовать сила

$$\mathbf{F} = e(\mathbf{E} + [\mathbf{v}, \mathbf{B}]),$$

где e — заряд частицы (однократно ионизованная частица), $\mathbf{E}$ — вектор напряженности электрического поля, v — вектор скорости частицы, $\mathbf{B}$ — вектор магнитной индукции.

Определим скорость из кинетической энергии, ориентируясь на частицы кремния:

$$T = \frac{m \cdot v^2}{2},$$

где T — кинетическая энергия частицы. ($T = 3\,\text{eV}$ — пик распределения по энергиям, согласно работе [20]), m — масса частицы (основной изотоп кремния Si^{28} – $m = 28\,\text{amu} = 28 \cdot 1.6 \cdot 10^{-27}\,\text{kg}$), v — скорость частицы.

Для обоснования выбора энергии вторичных атомов было проведено моделирование методом молекулярной динамики в программном пакете LAMMPS. По ранее апробированной методике [21] было проведено моделирование с разными комбинациями межатомных потенциалов. Наилучшее качественное согласие с экспериментом в диапазоне энергий до 1 eV достигается при использовании потенциала Stillinger–Webber и Lennard–Jones для Ar–Ar. Достоверность модели подтверждена путем сравнения с экспериментом: получено качественное согласие рассчитанных коэффициентов распыления с экспериментальными данными, а вычисленные глубины пробегов хорошо воспроизводят результаты моделирования в программе TRIM. Далее на основе предложенной модели были получены энергетические распределения распыленных частиц, представленные на рис. 4. Откуда видно, что полученные распределения коррелируют с литературными данными [22–24].

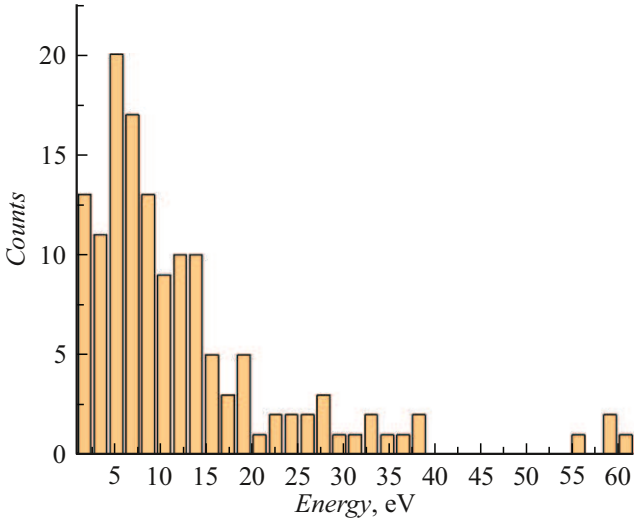

Рис. 4. Энергетическое распределение распыленных ускоренными ионами аргона с энергией 1 keV атомов кремния 28.

В таком случае условием прохождения частиц с атомной массой 28 через камеру сепаратора скоростей будет отношение полей

$$\frac{E}{B} = v = \sqrt{\frac{2T}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 3 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19}}{28 \cdot 1.6 \cdot 10^{-27}}} = \sqrt{\frac{3}{14}} \cdot 10^4 \approx 4.6 \cdot 10^3\,\text{m/s},$$

где E — скалярное значение вектора напряженности электрического поля, B — величина индукции магнитного поля.

Для удобства реализации предлагается в камере сепаратора использовать такое же магнитное поле, как и в камере масс анализатора, тем более, что для большинства коммерчески доступных магнитов характерны значения индукции магнитного поля на уровне $B \sim 0.1-0.2\,\text{T}$, на расстоянии несколько сантиметров можно ожидать поля на уровне $B \sim 0.05\,\text{T}$. Тогда для $B = 0.05152\,\text{T}$ необходима напряженность электрического поля $E = 237\,\text{V/m}$.

Выясним линейные размеры камеры, которые нужны для достижения требуемой точности. Для этого рассмотрим движение частицы, вылетающей с некоторой скоростью $v + \Delta v$. Если v удовлетворяет условию на поля, то получаем, что на частицу со скоростью, близкой к необходимой, будет действовать сила

$$\Delta F = e \cdot B \cdot \Delta v.$$

Данная сила приводит к отклонению частицы от прямолинейной траектории. Далее, считая изменения вектора и модуля скорости малыми, оценим поперечное

смещение h (рис. 1), используя формулу для равноускоренного движения вдоль вертикальной оси:

$$h = \frac{at^2}{2} = \frac{\Delta F t^2}{2m}.$$

Время можно определить из условия прохождения расстояния L вдоль прибора с постоянной продольной скоростью v: $t = L/v$.

Предположим, что у нас отверстие, которое соединяется со следующим блоком масс-спектрометра, будет диаметром 1 mm. Тогда, чтобы с данной погрешностью скорости частица попала в отверстие, должны выполняться условия

$$h = \frac{at^2}{2} = \frac{\Delta F L^2}{2mv^2} < 5 \cdot 10^{-4}\,\text{m}.$$

Подставляя $\Delta F = eB\Delta v$, получаем

$$\frac{eB\Delta v L^2}{2mv^2} < 5 \cdot 10^{-4}\,\text{m}.$$

Тогда для выполнения условия по скорости нужна длина $L > 0.072\,\text{m}$.

1.5. Коллиматор

Рассчитаем диаметр входного отверстия $(d = 2 \cdot r)$ масс-спектрометра из следующих соображений.

1. Как было показано ранее, при рабочих параметрах ионного источника КЛАН-12М при распылении монокристаллического кремния ($U_{acc.} = 1000\,\text{V}$, $J_{ion} = 0.3\,\text{mA}$) в полупространство (телесный угол 2π) распыляется $N \sim 10^{15}$ атомов кремния в секунду.

2. Для работы детектора в линейном режиме необходимо, чтобы на вход детектора приходило не более $n_{\max} = 9 \cdot 10^4$ ions.

Для случая изотропного распыления количество частиц, распыленных в некоторый телесный Ω, будет определяться следующим соотношением:

$$n_\Omega = N \cdot \frac{\Omega}{2\pi}.$$

Для установки, описанной в работе [8], удобное расстояние, на котором может быть расположен масс-спектрометр, равняется $R = 200\,\text{mm}$. Это расстояние до расположения источников ионов с фокусировкой ионного пучка, которое рассчитывалось из соображений возможности поворота гониометра с закрепленной на его столике детали с максимальными габаритными размерами (Ø300 mm и толщина 50 mm). В этом случае телесный угол, соответствующий полупространству, будет определяться площадью полусферы с радиусом R, а телесный угол входного отверстия будет определяться его радиусом (r):

$$n_\Omega = N \cdot k_E \cdot \frac{S_\Omega}{S_{2\pi}} \approx 10^{15} \cdot k_E \cdot \frac{\pi r^2}{2\pi R^2} \leq 9 \cdot 10^4, \qquad (1)$$

где k_E — количество атомов, энергия которых отвечает условию прохождения сепаратора.

Оценим количество частиц, попадающих в детектор за секунду при рассчитанных параметрах. Анализируя графики, представленные в работе [15], можно сказать, что в диапазоне для атомов с энергией $E_{atom} = (3 \pm 2.8 \cdot 10^{-4})\,\text{eV}$ $(v = (4600 \pm 46)\,\text{m/s})$ приходится $k_E = 2.0 \cdot 10^{-5}$ от всех частиц. Подставляем k_E в уравнение (1) и найдем r:

$$n_\Omega = N \cdot k_E \cdot \frac{S_\Omega}{S_{2\pi}} \approx 2 \cdot 10^{10} \cdot \frac{\pi r^2}{2\pi R^2} \leq 9 \cdot 10^4.$$

Отсюда

$$r^2 \leq 0.36\,\text{mm}^2 \rightarrow r \leq 0.6\,\text{mm}.$$

Таким образом, удобно взять диаметр входного отверстия $d = 2r = 1\,\text{mm}$.

2. Моделирование

Таким образом, проведены оценочные расчеты габаритных размеров, напряженности электрического и индукции магнитного полей компонентов разрабатываемого масс-спектрометра. Для разработки ЭКД (эскизная конструкторская документация) прибора необходимо провести более детальные расчеты с помощью математического моделирования, например, методом конечных элементов.

Для расчета электрических и магнитных полей в приборе использовался программный пакет FEMM [16], а обработку данных производили с помощью алгоритма, реализованного на языке программирования Python. Остановимся на размерах камеры для отбора по скоростям: сечение $0.05\,\text{m} \times 0.05\,\text{m}$, а длина — $L = 0.075\,\text{m}$. Электрические поля планируется формировать с помощью пластин, на которые будут подаваться фиксированные потенциалы. Магнитные поля будут формироваться постоянными магнитами.

Основным и принципиальным отличием теоретических расчетов от реальной конструкции является неоднородность, связанная с конечными размерами магнитов и электродов. В связи с этим важно убедиться в том, что неоднородности либо будут давать малую погрешность в траектории частицы, либо окажутся вне рабочей области. Для электрического поля решением может быть профилирование электродов по модели Ченга [25], который позволяет добиться однородности в центральной области между электродами, используя пластины меньших размеров. Для проработки конструкции в рассмотрении использовались коммерчески доступные постоянные магниты NdFeB N52 с магнитным полем на границе $B = 0.15\,\text{T}$. Распределение магнитных и электрического полей вдоль продольной координаты в центральном сечении представлено на рис. 5.

Наличие неоднородных полей, связанное с конечными размерами электродов и магнитов, на входах и выходах

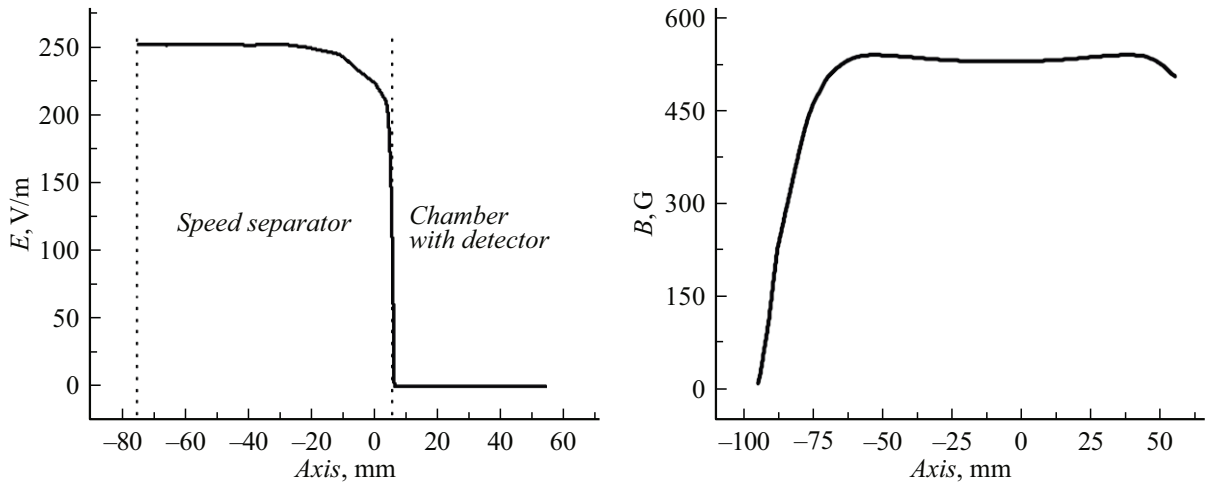

Рис. 5. Сечение распределения магнитного и электрического полей вдоль центральной оси прибора.

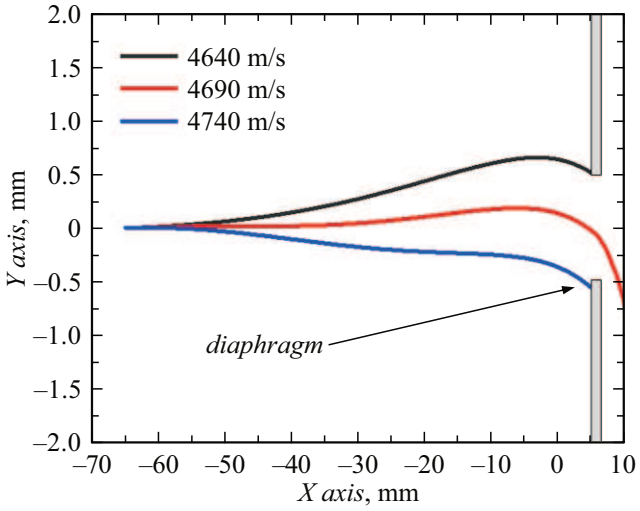

Рис. 6. Траектория движения частицы Si^{28+} со скоростью $(v \pm \Delta v)$.

составляющих элементов прибора может привести к несоответствию желаемой траектории движения частиц с реальной. С целью проверки работоспособности предложенной конструкции был проведен расчет траектории движения частиц для данной конфигурации электрического и магнитного полей.

Для проверки работоспособности основных элементов прибора, а именно, сепаратора скоростей и масс-анализатора, было проведено моделирование траектории частицы для скоростей частицы $v \pm \Delta v$, а также $m \pm \Delta m$, где скорость отличается от расчетной на Δv (рис. 6), рассчитанное выше, а $\Delta m = 1$ amu (рис. 7).

Как можно видеть, для массы $m \pm 1$ amu смещение составляет порядка 1.5 mm, что удовлетворяет условию на диаметр выходного отверстия $d = 1$ mm. Таким образом, моделирование траекторий подтвердило возможность настройки прибора на подходящие параметры и продемонстрировало расчетную разрешающую способность прибора.

С учетом проведенных расчетов была предложена конструкция прибора, показанная на рис. 8. В конструкции добавлена возможность точной юстировки прибора на фланце через сильфон, также предусмотрены крепления для лазера и фотодетектора для выведения

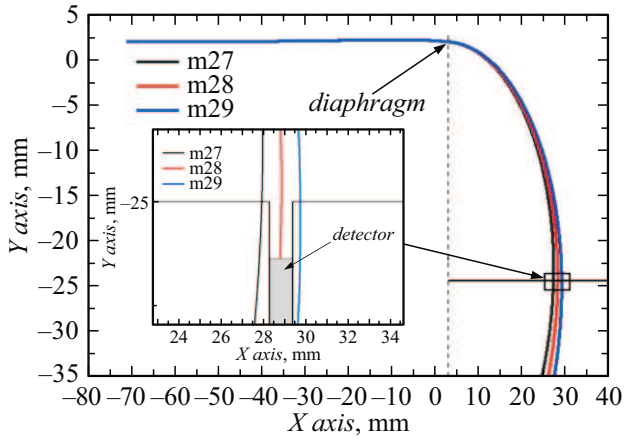

Рис. 7. Траектория движения частицы со скоростью v и массой $(m \pm \Delta m)$.

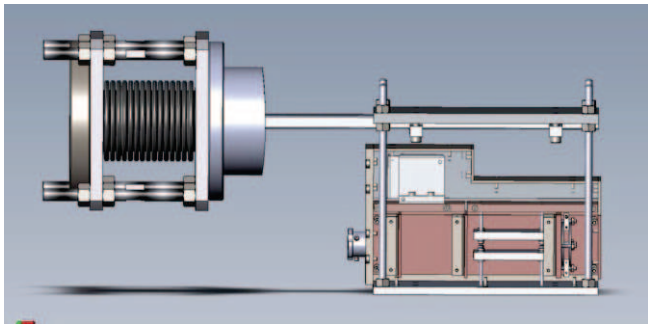

Рис. 8. Схема прибора.

оси спектрометра на центр гониометра (в точку, где происходит распыление).

Таким образом, проведенные аналитические оценки и численное моделирование подтвердили реализуемость предложенной концепции компактного масс-спектрометра и корректность выбора его основных параметров. Показано, что при заданных геометрических размерах и конфигурации электрических и магнитных полей обеспечивается требуемая селективность по массе и скорости частиц, а также эффективное подавление фоновых сигналов. Разработанная конструкция, представленная на рис. 8, учитывает как физические принципы работы отдельных узлов, так и ограничения, накладываемые условиями интеграции прибора в вакуумную камеру установки ионно-пучковой обработки. Полученные результаты позволяют перейти от этапа расчетного обоснования к созданию экспериментального образца прибора и его последующей апробации в условиях реального технологического процесса.

Заключение

В работе предложена и обоснована конструкция компактного масс-спектрометра, предназначенного для регистрации ионов основного изотопа кремния Si^{28+} с целью *in situ* контроля количества распыленного материала при ионно-пучковой коррекции формы поверхности оптических элементов. Показано, что переход к прямому мониторингу процесса распыления позволяет преодолеть ограничения традиционных *ex situ* методов и повысить точность обработки в субнанометровом диапазоне.

На основе аналитических оценок определены оптимальные параметры прибора, включая геометрические размеры, значения электрических и магнитных полей, а также требования к селективности по массе и скорости частиц. Предложенная архитектура, включающая коллиматор, ионизатор, сепаратор скоростей, масс-анализатор и каналовый электронный умножитель, обеспечивает эффективное подавление фоновых сигналов, в том числе от молекулярного азота, и выделение частиц кремния с заданными характеристиками.

Проведенное численное моделирование с учетом реальной неоднородности электромагнитных полей подтвердило работоспособность предложенных решений и показало, что прибор обеспечивает требуемую разрешающую способность по массе и скорости. Продемонстрировано, что частицы с отклонениями по массе и энергии эффективно отсеиваются, а расчетные параметры согласуются с условиями регистрации сигнала в линейном режиме детектора.

Оценки чувствительности показали возможность регистрации быстрых изменений режима работы ионного источника с временным разрешением до 10^{-3} s, что соответствует требованиям задач финишной коррекции формы поверхности. Разработанная конструкция адаптирована для интеграции в вакуумные технологические установки ионно-пучковой обработки.

Таким образом, предложенный масс-спектрометр является перспективным инструментом для высокоточного контроля процессов ионного распыления и может быть использован для повышения точности формирования оптических поверхностей дифракционного качества. Полученные результаты создают основу для дальнейшей экспериментальной реализации прибора и его внедрения в технологии ионно-пучковой обработки.

Финансирование работы

Работа по оценкам и моделированию выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 21-72-30029П, https://rscf.ru/project/21-72-30029/. Подготовка конструкторской документации выполнена в рамках государственного задания ИФМ РАН FFUF-2024-002.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] S.S. Andreev, M.S. Bibishkin, N.I. Chkhalo, E.B. Kluenkov, K.A. Prokhorov, N.N. Salashchenko, M.V. Zorina, F. Schafers, L.A. Shmaenok. J. Synchrotron Radiation, **10** (5), 358 (2003). DOI: 10.1107/S090904950301112X

[2] S.M. Feng, G.L. Zhu, J.D. Shao, K. Yi, Z.X. Fan, X.M. Dou. Appl. Phys. A, **74**, 553 (2002). DOI: 10.1007/s003390100960

[3] F. Schafers. Physica B, **283**, 119 (2000). DOI: 10.1016/S0921-4526(99)01904-9

[4] S.A. Bogachev, N.I. Chkhalo, S.V. Kuzin, D.E. Pariev, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, S.V. Shestov, S.Y. Zuev. Appl. Opt., **55** (9), 2126 (2016). DOI: 10.1364/AO.55.002126

[5] U. Dinger, F. Bisert, H. Lasser et al. Proc. SPIE, **4146**, 35 (2000). DOI: 10.1117/12.406680

[6] G. Zhou et al. Second Target Recognition and Artificial Intelligence Summit Forum. SPIE, **11427**, 1019 (2020). DOI: 10.1117/12.2552166

[7] P. Sigmund. Phys. Rev., **184** (2), 383 (1969). DOI: 10.1103/PhysRev.184.383

[8] M.S. Mikhailenko, N.I. Chkhalo, I.A. Kaskov, I.V. Malyshev, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, M.N. Toropov, I.G. Zabrodin. Precision Engineering, **48**, 338 (2017). DOI: 10.1016/j.precisioneng.2016.12.011

[9] В.А. Батурин и др. ВАНТ, **1**, 72 (2002).

[10] N. Camara, K. Zekentes. Solid-State Electron., **46** (12), 2123 (2002). DOI: 10.1016/S0038-1101(02)00129-6

[11] J.H. Gross. *Mass spectrometry: a textbook* (Springer Science & Business Media, 2006), 518 p. ISBN 978-3-540-36758-4

[12] P.H. Dawson. *Quadrupole Mass Spectrometry and Its Applications* (AIP Press, Woodbury, NY., 1997), 349 p. ISBN 978-1-56396-453-9

[13] R.J. Cotter. *Time-of-Flight Mass Spectrometry: Instrumentation and Applications in Biological Research* (American Chemical Society, Washington, DC, 1997), 326 p. ISBN 978-0-8412-3471-6
[14] A.G. Marshall, C.L. Hendrickson, G.S. Jackson. Mass Spectrometry Rev., **17** (1), 1 (1998). DOI: 10.1002/(SICI) 1098-2787(1998)17:1<1::AID-MAS1>3.0.CO;2-K
[15] X. Meng, L. Li. Appl. Surf. Sci., **254**, 5421 (2008). DOI: 10.1016/j.apsusc.2008.02.096
[16] Y. Shen, L. Howard, X.-Y.Yu. Materials, **17** (2), Art. 528 (2024). DOI: 10.3390/ma17020528
[17] N. Chernyshev, N. Chkhalo, I. Malyshev et al. Precision Engineering, **69**, 29 (2021). DOI: 10.1016/j.precisioneng.2021.01.006
[18] М.С. Бибишкин, И.Г. Забродин, А.Е. Пестов и др. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, **7**, 5 (2003).
[19] М.Р. Айнбунд, Б.В. Поленов. *Вторично-электронные умножители открытого типа и их применение* (Энергоиздат, М., 1981), 140 с.
[20] N. Mahne, M. Cekada, M. Panjan. Coatings, **13**, 1448 (2023). DOI: 10.3390/coatings13081448
[21] A.A. Nazarov, M.V. Zorina, D.V. Nefedov, V.N. Trushin, A.E. Pestov. Russ. Microelectron., **54** (1), 167 (2025). DOI: 10.1134/S1063739726600184
[22] M. Stepanova, S.K. Dew. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, **215** (3–4), 357 (2004). DOI: 10.1016/j.nimb.2003.09.035
[23] D. Kalanov, A. Anders, C. Bundesmann. J. Vacuum Sci. Technol. A, **37** (5), Art. 051301 (2019). DOI: 10.1116/1.5111420
[24] Электронный ресурс. *Finite Element Method Magnetics* (FEMM). URL: https://www.femm.info/wiki/HomePage
[25] T.Y. Chang. Rev. Scientific Instrum., **44** (4), 405 (1973). DOI: 10.1063/1.1686144