

Расчет параметров и моделирование системы ионной обработки в вакууме

С. В. Сидорова^{1✉}, А. Д. Купцов¹, И. Е. Пименов²

¹Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

²Федеральное государственное унитарное предприятие "НАМИ", Москва, Россия

✉ sidorova@bmstu.ru

Аннотация

Введение. Определение физических и геометрических характеристик плазмы – актуальная задача ионно-плазменных процессов в производстве микро- и нанoeлектроники. Энергия ионов, характер взаимодействия с материалами определяют эффективность технологии. Глубина проникновения, импульс иона влияют на коэффициент распыления (Y) материала, являющийся ключевым параметром эллионных технологий. Изменение формы ионного пучка влияет на плотность распределения ионов. Ранее проводились исследования изменения конструкции ионного источника для придания пучку кольцевой формы и формы, близкой к распределению Гаусса. Изменение конструкции ионного источника – трудоемкий и дорогостоящий процесс, альтернативным вариантом является использование внешних магнитных систем.

Цель работы. Определение физических параметров системы ионной обработки подложек и функциональных слоев для изделий микро- и нанoeлектроники.

Материалы и методы. Исследования проводятся на кафедре "МТ-11" МГТУ им. Н. Э. Баумана. Исследуемым материалом является кремний и ионы аргона. Технологическое оборудование представлено вакуумной установкой МВТУ-11-1МС. Исследование поперечного скола проводится на микроскопе CROSSBEAM 550. Индукция магнитного поля определяется миллитесламетром ТП2-2У.

Результаты. Расчеты и экспериментальные исследования показали, что минимальный Y равен 0.03 атом/ион при энергии 0.05 кэВ, максимальный – 1.35 атом/ион при 7 кэВ, далее происходит уменьшение Y до 1.05 атом/ион при 250 кэВ за счет внедрения ионов в структуру. Внешняя магнитная система источника позволяет изменять угол конусности пучка, что повышает концентрацию ионов в определенной точке на подложке, следовательно, увеличивает эффективность процесса.

Заключение. Апробирована методика расчета энергии ионов Ag^+ для кольцевого источника ионов при травлении подложки Si. Обработка результатов эксперимента позволила рассчитать Y . Полученные выражения для магнитного поля и распределения магнитных полей будут использованы при моделировании дополнительной внешней магнитной системы, изменяющей форму пучка ионов.

Ключевые слова: вакуумная установка, источник ионов, коэффициент распыления, энергия ионов, кремний, сканирующая электронная микроскопия

Для цитирования: Сидорова С. В., Купцов А. Д., Пименов И. Е. Расчет параметров и моделирование системы ионной обработки в вакууме // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2026. Т. 29, № 1. С. 40–54.
doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-1-40-54

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 23.06.2025; принята к публикации после рецензирования 16.01.2026; опубликована онлайн 27.02.2026

Parameter Calculation and Simulation of a Vacuum Ion Beam Treatment System

Svetlana V. Sidorova^{1✉}, Alexey D. Kouptsov¹, Ilya E. Pimenov²

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

²Federal State Unitary Enterprise "NAMI", Moscow, Russia

✉ sidorova@bmstu.ru

Abstract

Introduction. Determination of the physical and geometric properties of plasma is a relevant problem in the field of ion-plasma processes for micro- and nanoelectronics fabrication. The energy of ions and the nature of their interaction with materials define the effectiveness of ion-plasma technologies. The penetration depth and momentum transfer of ions affect the sputtering yield (Y) of the material, which is a key parameter in ion beam technologies. Changes in the ion beam shape have an effect on the ion density distribution. Previous studies have explored the possibility of modifying the design of the ion source to achieve annular or near-Gaussian beam profiles; however, this approach is associated with significant labor and monetary costs. An alternative approach consists in the use of external magnetic systems.

Aim. Determination of the physical parameters of a system for ion beam treatment of micro- and nanoelectronic substrates and functional layers.

Materials and methods. The research was conducted at the MT-11 Department of Bauman Moscow State Technical University (BMSTU) using the MVTU-11-1MC vacuum system. The material under investigation was silicon and argon ions. Cross-sectional analysis was performed using a CROSSBEAM 550 microscope. The magnetic field strength was determined using a TP2-2U milliteslameter.

Results. Calculations and experimental investigations revealed the minimum sputtering yield (Y) to be 0.03 atoms/ion at an energy of 0.05 keV, with the maximum of 1.35 atoms/ion at 7 keV. Subsequently, the sputtering yield decreases to 1.05 atoms/ion at 250 keV due to ion implantation into the lattice structure. The external magnetic system of the source allows the beam cone angle to be modified, which increases the ion concentration at a specific point on the substrate, consequently enhancing the process efficiency.

Conclusion. A methodology for calculating the energy of Ar^+ ions generated by an annular ion source during Si substrate etching has been validated. Processing of the experimental results enabled the determination of the sputtering yield (Y). The derived expression for the magnetic field strength and magnetic field distribution will be used when simulating an additional external magnetic system designed to manipulate the ion beam shape.

Keywords: vacuum unit, ion source, sputtering coefficient, ion energy, silicon, scanning electron microscopy

For citation: Sidorova S. V., Kouptsov A. D., Pimenov I. E. Parameter Calculation and Simulation of a Vacuum Ion Beam Treatment System. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2026, vol. 29, no. 1, pp. 40–54. doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-1-40-54

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 23.06.2025; accepted 16.01.2026; published online 27.02.2026

Введение. В производстве изделий микроэлектроники в настоящее время широко используются процессы, происходящие в низкотемпературной газовой плазме низкого давления. Данные процессы используются для очистки поверхности подложек, травления диэлектрических и проводящих слоев и поверхностей подложек из кремния, кварца, керамики. Применение ионно-плазменных технологий позволяет увеличить разрешающую способность, повысить производительность труда, дает возможность автоматизировать производство изделий

микроэлектроники и перейти от жидкостных технологий к методам "сухой" вакуумной очистки [1–3]. Жидкостные технологии обработки материалов в процессе создания микро- и наноструктур в принципе не могут обеспечить создания топологий с нанометровыми размерами, поэтому в современном производстве изделий микро- и нанoeлектроники приоритет отдается направлению "сухих" процессов.

Актуальными материалами для травления являются диэлектрики – это первые слои на пластине с самыми малыми размерами струк-

тур, которые должны обеспечить комплекс структурных и динамических характеристик процесса для заданной технологической нормы [4]. Другим важным процессом является травление спейсеров затворов транзисторов первого слоя, которое главным образом характеризуется высокой точностью контроля и аккуратностью проведения процесса. Весьма высокие аспектные требования предъявляются и к травлению волноводов из оксида кремния в сложных устройствах фотоники [5]. Кроме того, требуется очистка и травление материалов подложек, в частности кремниевых. Данный материал проявляет ряд характерных электрофизических и оптических свойств, позволяющих эффективно применять его в таких областях, как оптоэлектроника, микроэлектроника, фотоника, медицина, биоинженерия и др. [6].

Помимо ионного травления применение ионно-лучевой обработки актуально для очистки, активации и изменения морфологии поверхностей подложек, что важно при формировании покрытий нанометрового размера. При создании наноразмерных структур необходимо наличие центров кристаллизации, чтобы рост структур нанометрового размера происходил наиболее равномерно. Для обеспечения равномерного роста наноразмерных структур и плотности формирования тонкопленочных слоев также применяется ионная обработка и ионное ассистирование процессов осаждения [7].

Физические явления, происходящие в плазме и на поверхности подложек при ее воздействии, до конца не исследованы. Однако эти технологии с использованием низкотемпературной неравновесной газоразрядной плазмы низкого давления весьма перспективны для изготовления различных изделий микро- и нанoeлектроники, получения качественных топологий с высокой анизотропией травления, создания условий для роста наноразмерных структур и слоев, уменьшения остаточных напряжений в тонкопленочных структурах и на интерфейсе "пленка–подложка".

Обработка материалов ионами проводится в широком диапазоне энергий, определяющем характер взаимодействия ионов с поверхностью или объемом вещества. Для определения типа процессов обработки существует класси-

фикация из пяти пунктов, описывающая принцип и результат ионной обработки [8, 9]. Минимальная энергия (E_{\min}) обеспечивает сорбцию и десорбцию частиц, что характерно для химической обработки. При $E_1 > E_{\min}$ ионы позволяют активировать поверхность и даже нагревать до температур испарения. Очистка поверхности от неорганических загрязнений, выбивание атомов и формирование рельефа происходит при $E_2 > E_1$. Для обеспечения генерации излучения из материала или модификации материала имплантацией необходимо еще увеличить энергию $E_3 > E_2$. Максимальная энергия (E_{\max}) позволяет прошивать тонкие мембраны насквозь для формирования наноструктур и фильтров. Стоит отметить, что каждый пункт данной классификации не может иметь четких количественных границ. Энергия ионов и частиц зависит от широкого перечня параметров: массы, скорости движения, наличия ядерного и упругого торможения при столкновении с материалом подложки, ускоряющего напряжения, температуры частицы.

Для технологии тонких пленок существует разграничение по значениям энергий в зависимости от обрабатываемого материала. Например, в [10] описывается, что процесс распыления частиц поликристаллических пленок металлов при ионной обработке возможен, если энергия частицы превышает значение 30 эВ.

В процессе ионной обработки материалов ключевым параметром, определяющим эффективность и характер взаимодействия, является энергия ионов и частиц. Взаимодействие иона с поверхностью влияет на два фактора: глубину его проникновения и величину передаваемого импульса. Одним из важнейших результатов этого взаимодействия является распыление, представляющее собой процесс удаления атомов материала под действием ионной бомбардировки. Вышеупомянутые факторы определяют нелинейность процесса для определения коэффициента распыления материалов при обработке ионами с разными значениями энергий, что основано и подтверждается большой статистической эмпирической выборкой как классических и фундаментальных исследователей [11–13], так и современных коллективов [14, 15].

С учетом актуальности применения ионно-плазменных процессов в производстве изделий микро- и нанoeлектроники важным являются вопросы изучения физических характеристик самой плазмы и оценки геометрии системы в целом. Одним из ключевых параметров оценки физических характеристик плазмы является коэффициент распыления [16], который показывает эффективность распыления, определяя среднее число атомов, удаляемых с поверхности твердого тела одним бомбардирующим ионом.

Цель исследования – определение физических параметров системы ионной обработки подложек и функциональных слоев для изделий микро- и нанoeлектроники.

Материалы, методы и методика исследований. Исследования проводятся на кафедре "Электронные технологии в машиностроении" МГТУ им. Н. Э. Баумана. В качестве технологического оборудования применяется вакуумная установка MBTU-11-1MC [17].

Методика исследования заключается в том, что подложка кремния очищается в кислород-аргоновой плазме (1:1) от органических загрязнений и помещается в установку для обработки ионами аргона при стабилизируемых параметрах ионного тока 30 мА и мощности 81 Вт. Предварительно половина поверхности подложки закрывается маской для формирования перехода в форме ступеньки. Измерение поверхности подложки на оптическом микроскопе при увеличении 10х позволяет получить площадь поверхности, подверженной распылению. Измерение высоты ступеньки на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) позволяет рассчитать объем удаленного материала для определения коэффициента распыления.

Технологический источник ионов представляет собой кольцевой водоохлаждаемый анод, над которым с зазором установлена металлическая крышка с отверстием в форме кольца. Внешний и внутренний диаметры кольца, соответственно, равны 25 и 23 мм.

Измерение поперечного скола кремниевой подложки после ионного травления происходит на СЭМ – CROSSBEAM 550 (Carl Zeiss Microscopy GmbH, Германия), предназначен-

ном для высоковакуумного детектирования отраженных электронов с целью получения изображения. Микроскоп работает в таком режиме, что система позволяет получать изображения объектов при увеличении 10^5 х, при ускоряющем напряжении электронов 5 кВ, токе зонда 113 пА, с разрешающей способностью менее 1.9 нм при режиме шумоподавления – усреднение по каждой линии.

Магнитная индукция постоянного магнитного поля определялась при помощи миллитесламетра ТП2-2У. Прибор оснащен зондами цилиндрической и плоской формы.

Аналитическое определение коэффициента распыления. Коэффициент распыления (Y) количественно характеризует процесс и определяет среднее число атомов, удаленных с поверхности мишени одним ионом. Определяется свойствами материалов, типом ионов и углом падения.

Для расчета коэффициента распыления материала существует модель Зигмунда [11], основанная на линейном уравнении переноса Больцмана для описания каскада столкновений в полубесконечной и случайной среде при движении частиц к подложке по нормали. Уравнение данной модели представлено формулой

$$Y(E_i) = \frac{3.56}{U_0} \frac{Z_{Si} Z_{Ar}}{(Z_{Si}^{2/3} + Z_{Ar}^{2/3})^{1/2}} \frac{M_{Ar}}{M_{Si} + M_{Ar}} \alpha S_n(\epsilon), \quad (1)$$

где E_i – энергия ионов; U_0 – энергия связи частиц ($Si = 7.83$ эВ [18–20]); Z_{Si}, Z_{Ar} – атомный номер кремния и аргона; M_{Si}, M_{Ar} – масса частиц кремния и аргона; α – функция соотношения масс кремния и аргона; $S_n(\epsilon)$ – приведенное ядерное или упругое торможение; ϵ – приведенная энергия. Подписи к коэффициентам адаптированы под технологию и цель работы по определению энергии ионов, бомбардирующих подложку Si.

Функция соотношения масс α теоретически определена в [11] и выведена авторами [18], имеет количественный вид:

$$\alpha = 0.15 + 0.13 \frac{M_{Si}}{M_{Ar}}. \quad (2)$$

Подставив (2) в (1) и раскрыв скобки, получим:

$$Y(E_i) = \frac{3.56}{U_0} \frac{Z_{Si}Z_{Ar}}{(Z_{Si}^{2/3} + Z_{Ar}^{2/3})^{1/2}} \times \frac{0.15M_{Ar} + 0.13M_{Si}}{M_{Si} + M_{Ar}} S_n(\epsilon).$$

В свою очередь, функцию $S_n(\epsilon)$ Уильсон, Хагмарк и Бирсак представили в [21] как

$$S_n(\epsilon) = \frac{\frac{1}{2} \ln(1 + \epsilon)}{\epsilon + 0.141\epsilon^{0.42}}.$$

Приведенная энергия определяется из зависимости [18]

$$\epsilon = \frac{E_i}{32.5 \left(1 + \frac{M_{Ar}}{M_{Si}}\right) Z_{Si}Z_{Ar} (Z_{Si}^{2/3} + Z_{Ar}^{2/3})^{1/2}}. \quad (3)$$

Для бомбардировки ионами аргона поверхности подложки из кремния знаменатель уравнения (3) численно определен как 67.05:

$$\epsilon = \frac{E_i}{67.05}.$$

На основании обзора работ [18, 20, 22–34] построена общая зависимость (рис. 1) коэффициента распыления (Y) от энергии ионов (E_i) для аргона

Ar^+ . Часть данных переписана численно из таблиц, остальные рассчитаны количественно из графических зависимостей с учетом масштаба осей. Ошибка копирования количественных параметров не превышает 1 % для обеих осей.

Усредненная зависимость коэффициента распыления монокристаллического Si от различных энергий представлена на рис. 2.

Процесс параметрической рационализации системы заключался в определении наиболее простого уравнения, описывающего усредненную кривую, при наибольшей ошибке отклонения уравнения от усредненных данных, не превышающей 5 %. Таким образом, зависимость на рис. 2 можно описать системой, состоящей из двух уравнений: экспоненциальной зависимости для диапазона энергий от 0.05 (включительно) до 10 кэВ; квадратичной зависимости для диапазона от 10 (включительно) до 250 кэВ.

Для последующего сопоставления параметров проведена идентификация графической кривой к численному уравнению:

$$Y(E) = \begin{cases} \frac{1.45E^{1.3}}{0.75 + E^{1.3}} e^{-0.005(E-7)^2}; E \in [0.05; 10); \\ 4.07 \cdot 10^{-6} E^2 - 2.28 \cdot 10^{-3} E + 1.37; E \in [10; 250). \end{cases} \quad (4)$$

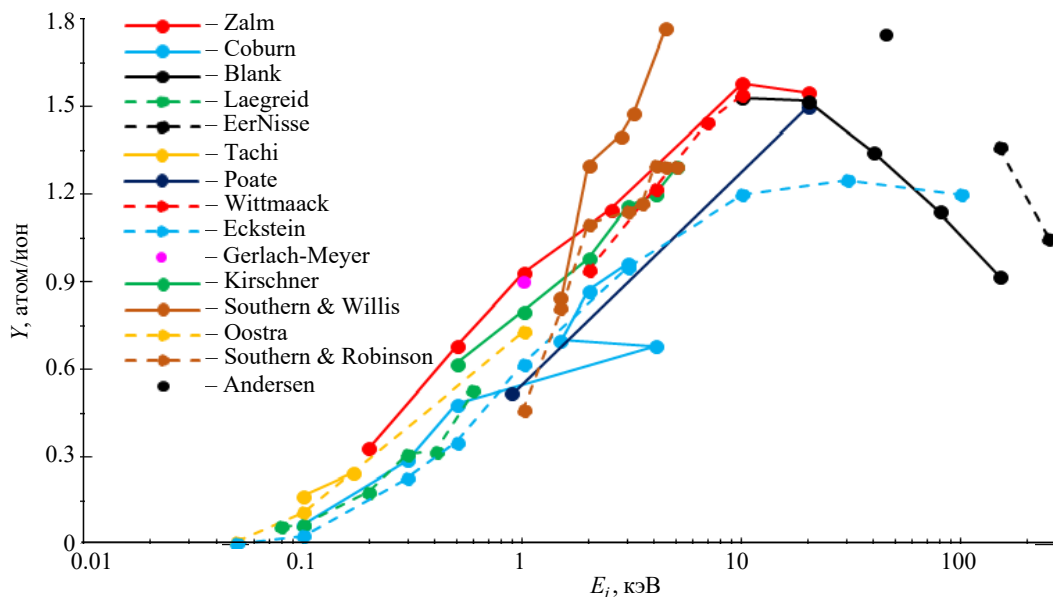


Рис. 1. Зависимость коэффициента распыления от энергии ионов Ar^+ по данным источников [18, 20, 22–34]

Fig. 1. Dependence of the sputtering coefficient of Ar^+ ions energy according to [18, 20, 22–34]

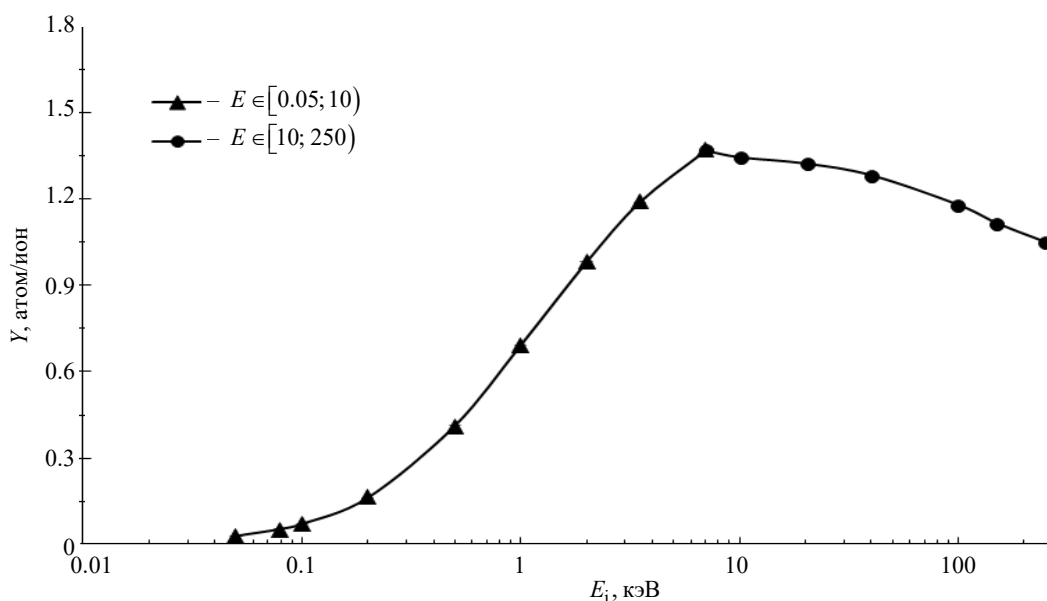


Рис. 2. Усредненная зависимость коэффициента распыления от энергии ионов Ar^+

Fig. 2. Average dependence of sputtering coefficient on the energy of Ar^+ ions

Максимальная абсолютная погрешность Y составляет 0.032 для первого диапазона E_i и 0.016 для второго. Максимальная относительная погрешность Y составляет 4.34 % для первого диапазона E_i и 1.21 % для второго. Система уравнений имеет малую погрешность относительно усредненных данных Y при широком диапазоне значений E_i .

Эмпирическое определение коэффициента распыления. В исследовании используются регуляторы расхода газа для источника ионов, которые определяют объемный поток в таких единицах, как sccm (standard cubic centimeter per minute), приведенный к стандартным условиям (0 °C и 1 атм). Тогда рабочее давление в камере и давление в подающей магистрали 0.7 бар не влияют на фактический расчет количества вещества, проходящего через расходомер.

Для стандартных условий ($T = 273.15$ К; $p = 101\,325$ Па) 1 моль идеального газа занимает объем $V = 22.4$ л.

Определим объемный расход газа в качестве системной единицы:

$$2\text{ sccm} = 2\text{ см}^3/\text{мин} = 3.33 \cdot 10^{-8}\text{ м}^3/\text{с}.$$

Молярный расход n рассчитывается по уравнению идеального газа:

$$n = \frac{pV}{RT},$$

где p – давление среды (при н. у.); V – объем газа при номинальном расходе процесса; R – универсальная газовая постоянная; T – температура среды.

Количественный параметр n соответствует:

$$n = \frac{101325 \cdot 3.333 \cdot 10^{-8}}{8.314 \cdot 273.15} = 148.71 \cdot 10^{-8}\text{ моль/с}.$$

Расчет количества атомов аргона в секунду оценено согласно

$$N = nN_A,$$

где N_A – постоянная Авогадро.

Тогда N принимает значение

$$N = 148.71 \cdot 10^{-8} \cdot 6.022 \cdot 10^{23} \cong 8.95 \cdot 10^{17}\text{ атом/с}.$$

На рис. 3 представлена эмпирическая схема распространения ионов от источника до подложки.

При этом зона обработки подложки площадью $A_{\text{П}} = 46.359\text{ мм}^2$, находящаяся на расстоянии 156 мм от источника ионов, располагается в зоне бомбардировки ионов площадью $A_{3,6} = 2643.429\text{ мм}^2$. Величина $A_{3,6}$ определена экспериментально, что учитывается при позиционировании подложки при проведении экспериментального исследования. Подложка располагается плоскопараллельно торцевой крыш-

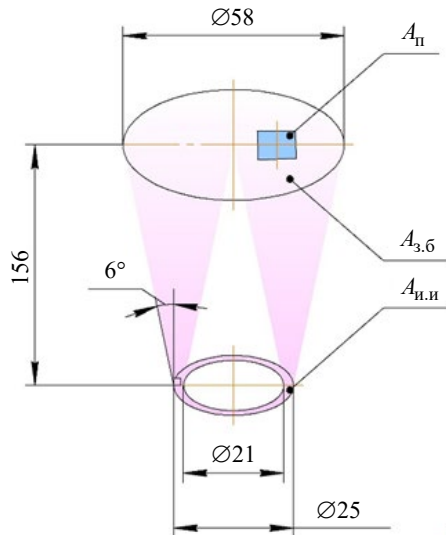


Рис. 3. Сравнительная диаграмма площадей ионной обработки
 Fig. 3. Comparison diagram of ion treatment areas

ке источника ионов, ось симметрии подложки находится над диаметром кольца источника ионов 23 мм, поток ионов бомбардирует поверхность подложки под прямым углом. Отклонение угла от 90° считается нулевым ввиду геометрического расположения "подложка–источник ионов" (рис. 3). Площадь испускания ионов из зазора анод/катод ($A_{и.и}$) составляет 144.513 мм^2 . Тогда коэффициент заполнения определяет долю ионов, обрабатываемых подложку, и рассчитывается как

$$k = \frac{A_{п}}{A_{и.и} A_{з.б}} = \frac{46.36}{144.51 \cdot 2643.43} = 1.21 \cdot 10^{-4}. \quad (5)$$

При расчете количества ионов N_i , бомбардировавших подложку в течение 9 ч, учитывается распределение ионов по поверхности подложкодержателя, отклонение которых от нормали происходит по вероятности, близкой к гауссову, и равно:

$$N_i \approx 2.45 \cdot 10^{20} \text{ шт.}$$

В исследовании авторы допускают, что данная методика расчета числа ионов имеет приближенный характер. Однако учтено, что коэффициент ионизации близок к единице, что подтверждается измерением вольт-амперной характеристики, в ходе которого определено оптимальное значение расхода газа, используемое в расчете, – $2 \text{ см}^3/\text{мин}$. Пространственное распределение учтено при расчете коэффици-

ента k (5). Для более точного определения числа ионов необходимо проведение эмпирических исследований, например четвертьсферическим электростатическим энергоанализатором.

Исходя из распределения ионов можно заключить, что для повышения плотности ионного потока на подложке, следовательно для повышения скорости обработки подложки, необходимо уменьшать расстояние от источника ионов до подложки, если площадь поверхности подложки оставить без изменения.

Изображение Si-подложки после травления представлено на рис. 4. Ионное травление Si происходит анизотропно. Угол относительно плоскости подложки составил $(105 \pm 0.2)^\circ$. Показатель анизотропии равен [35]

$$K_a = \frac{\delta_y}{\delta_x} = \frac{43.99}{12.28} = 3.58,$$

где δ_y – толщина стравленного слоя; δ_x – величина бокового подтравла.

Вышеизложенное может быть связано с кристаллографической ориентацией Si, а также неидеальностью закрывающей маски. Это, в свою очередь, подтверждается тем, что вблизи границы раздела маска/Si обнаружено высокопористое покрытие, толщина которого составляет 1.1 мкм.

Для обеспечения вертикальности стенок необходимо, чтобы $K_a \gg 1$ и чтобы скорость бокового травления практически не участвовала в процессе. В случае когда $K_a < 1$, происходит преимущественно латеральное травление широкого канала с малой глубиной. Для случая $K_a = 1$ процесс характеризуется изотропным травлением со стенками постоянного радиуса при равенстве скоростей травлений вбок и вглубь.

Воздействовать на скорость бокового распыления (δ_x) возможно при отклонении потока ионов от нормального на угол до 15° для компенсации наклона стенки 105° .

В латеральном направлении наблюдается уменьшение стравленного слоя, длина участка которого составляет 230 мкм. Остальная поверхность Si травилась равномерно без изменения средней толщины слоя.

При расчете объема Si учитываются выявленные геометрические отклонения – площади S_1 , S_2 и S_3 , рассчитанные через встроенную команду ПО Компас-3D (ver. 24) (рис. 4). Таким

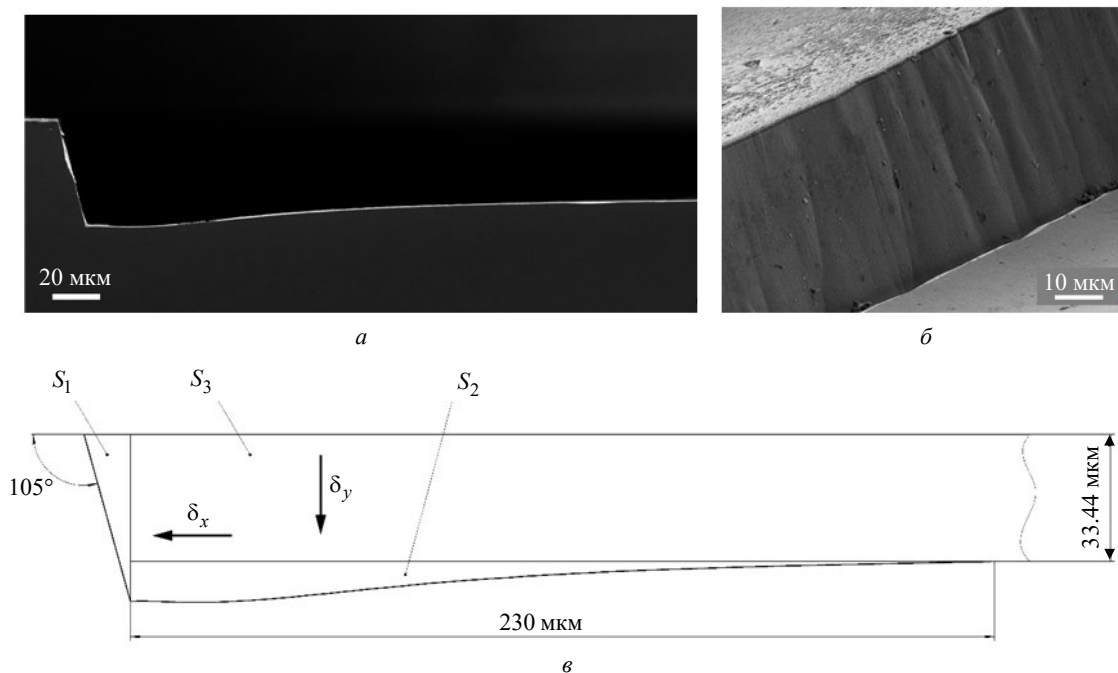


Рис. 4. СЭМ-изображения поперечного скола (а) и в изометрии (б) подложки Si после травления и расчетная схема площади травления (в)

Fig. 4. Scan images of a cross section (a), isometric (b) of a Si substrate after etching, area (c)

образом, объем стравленного Si составил $(1.56 \pm 0.12)10^{18} \text{ нм}^3$, что соответствует $(1.56 \pm 0.12)10^{-3} \text{ см}^3$. За 9 ч произошло более 11.5 % распыления объема подложки.

Для расчета коэффициента Y на основе литературного обзора [35–37] определена плотность атомов Si в структуре подложки – $5 \cdot 10^{22} \text{ атом/см}^3$.

С учетом численных параметров Y принимает значение

$$Y = 0.319 \pm 0.025 \text{ атом/ион.}$$

Учитывая (4), для $Y = 0.319 \pm 0.025 \text{ атом/ион}$ параметр E_1 принимает значение

$$E_{\text{сред}} = 0.371 \pm 0.031 \text{ кэВ.}$$

Поскольку экспериментально определена энергия ионов, то для теоретической модели Зигмунда основные параметры принимают значения: $\epsilon = 5.53 \cdot 10^{-3}$; $S_n(\epsilon) = 1.29 \cdot 10^{-1}$. Тогда $Y_3 = 0.587 \text{ атом/ион}$. Итоговая разница коэффициентов распыления составляет 84 %. Следовательно, сравнивать методики расчета коэффициентов энергий и распыления матери-

ала на текущем уровне нерационально. Необходимо учитывать взаимодействие потока ионов и кристаллографическую ориентацию подложки Si. Тем не менее зависимость коэффициента распыления от энергии ионов находится в пределах допустимого.

Таким образом, результаты проведенных расчетов с учетом корректировки модели Зигмунда представлены на рис. 5.

Результаты исследования показывают, что оба подхода к анализу коэффициента распыления позволяют получить значения, которые находятся в пределах выборки параметров из многочисленных работ.

Определение физических характеристик источника ионов. На установке применяется кольцевой источник ионов – Пеннинга, который представляет собой ускоритель с замкнутым азимутальным дрейфом ионов. Силовые линии электрического и магнитного полей перпендикулярны. На ионы, ускоренные электрическим полем в поперечном магнитном поле, действует сила Лоренца, отклоняющая вектор движения от нормали. Данный эффект вызывает деформацию пучка от цилиндрической формы к конической.

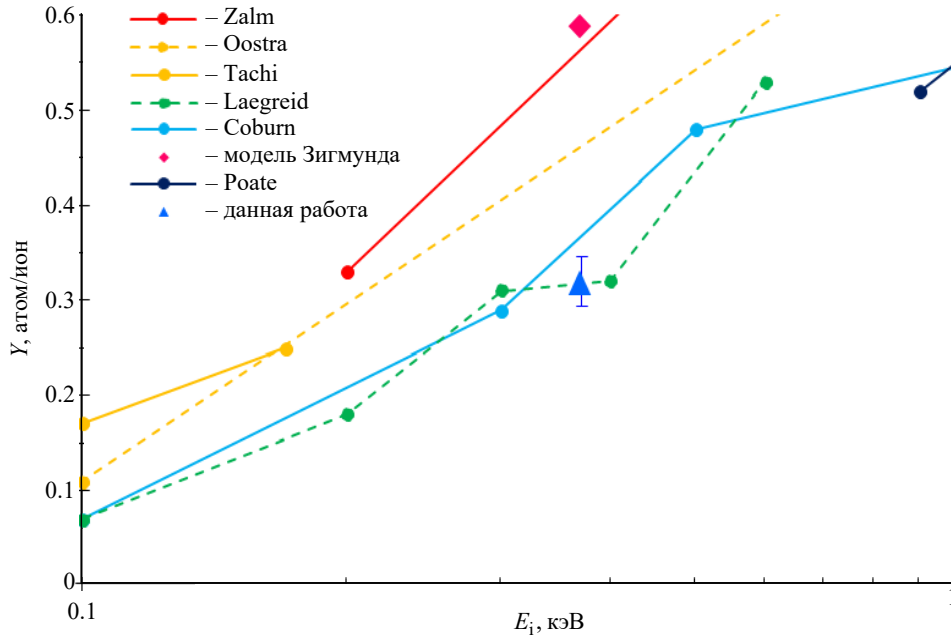


Рис. 5. Зависимость коэффициента распыления от энергии ионов Ar^+ (обновленные данные)

Fig. 5. Sputtering yield versus Ar^+ ion energy (updated data)

На рис. 6 приведена схема ионного источника с траекторией движения ионов под действием электрического и магнитного полей. Траектория движения иона лежит на плоскости касательной к образующей цилиндрического канала выхода ионов [38].

Для определения индукции магнитного поля были проведены замеры в направлении по

нормали к плоскости и вдоль плоскости ионного источника. Измерения проводились миллитесламетром, оборудованным зондами с датчиками Холла, параллельным и перпендикулярным к плоскости измерения. На рис. 7 приведены результаты интерполяции полученных значений и составлены тепловые карты, которые сопоставлены со схемой ионного источника.

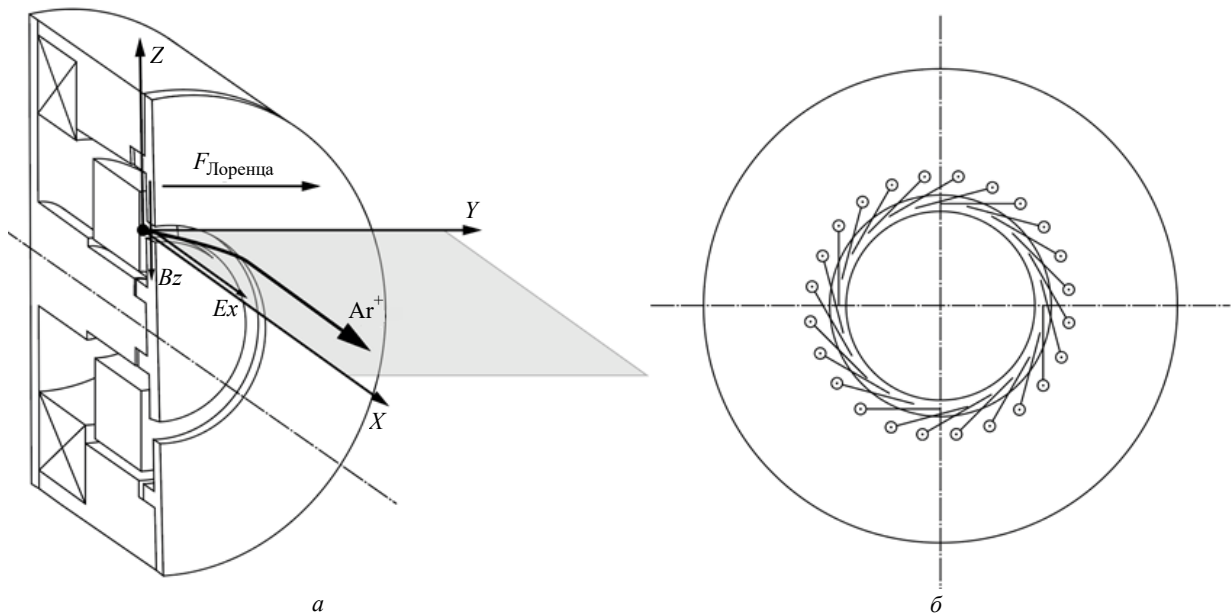


Рис. 6. Траектории движения иона под действием магнитного и электрического полей (а) и пучка ионов с увеличением радиуса распространения (б)

Fig. 6. Trajectory of ion movement under the influence of magnetic and electric fields (a); trajectory of ion movement forming a beam of a larger radius than the ion exit channel (b)

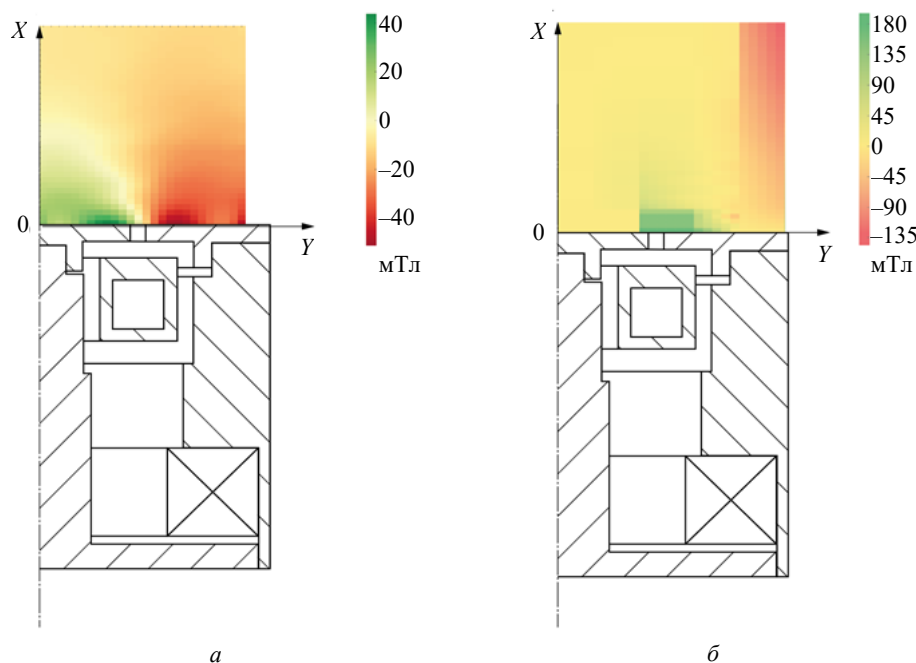


Рис. 7. Цветовая диаграмма магнитного поля: *a* – в плоскости ионного источника; *б* – в пространстве "источник–подложка"

Fig. 7. Color diagram of the magnetic field magnitude: *a* – in the plane of the ion source; *b* – the source–substrate space

Следует отметить, что в канале выхода ионов магнитное поле, направленное по нормали к плоскости ионного источника, имеет нулевое значение, а магнитное поле вдоль плоскости имеет максимальное значение – 200 мТл. На основе результатов измерения было получено уравнение, описывающее магнитное поле, направленное вдоль плоскости ионного источника на расстоянии x от оси источника ионов:

$$B = 0.0003x^5 + 0.001x^4 - 0.4149x^3 + 8.9785x^2 - 71.316x + 201.4.$$

Внешняя магнитная система позволяет изменять форму пучка: уменьшать или увеличивать угол конусности пучка. Изменение геометрии пучка позволяет сфокусировать его и повысить концентрацию ионов в определенной точке на подложке. На рис. 8 представлены схемы внешних магнитных систем.

Стоит отметить, что магнитная система с вектором магнитного поля, направленным к оси источника иона, эффективна только при установке непосредственно у канала выхода ионов, при установке выше плоскости источника ионов данная система изменяет только диаметр пучка.

На основе проведенного измерения магнитного поля будет построена математическая мо-

дель ионного источника, на основе которой будет проведено моделирование влияния внешней магнитной системы на движение ионов, будет установлено влияние типа магнитов, их количества, расположения относительно оси и поверхности ионного источника на форму пучка ионов. По результатам моделирования будет определена конструкция внешней магнитной системы, позволяющей сфокусировать поток ионов на обрабатываемой области.

Заключение. Апробирована методика расчета энергии ионов Ar^+ для кольцевого источника ионов при травлении подложки монокристаллического Si.

Систематизация, обобщение и усреднение параметров коэффициента распыления и энергии ионов определило тенденцию: минимальный коэффициент распыления 0.03 атом/ион соответствует энергии 0.05 кэВ; максимальный – 1.35 атом/ион при 7 кэВ, далее происходит уменьшение коэффициента распыления до 1.05 атом/ион при 250 кэВ, что связано с внедрением и имплантацией ионов в структуру материала.

Снимок СЭМ свидетельствует об анизотропном ионном травлении Si. Угол относительно плоскости подложки составил $(105 \pm 0.2)^\circ$. Показатель анизотропии $K_a = 3.58$.

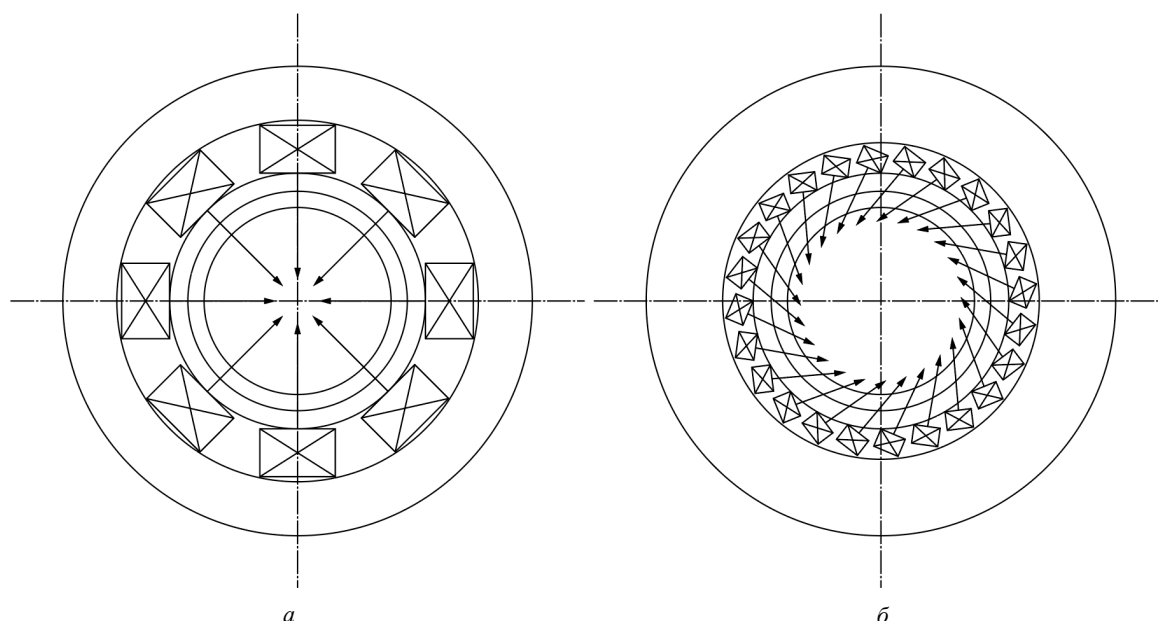


Рис. 8. Схемы внешних магнитных систем с векторами магнитного поля: *a* – в направлении оси ионного источника; *b* – по касательной к каналу выхода ионов

Fig. 8. Schemes of external magnetic systems with magnetic field vectors: *a* – in the direction of the ion source axis; *b* – in the direction of the ion output channel

Обработка результатов эксперимента позволила рассчитать коэффициент распыления, равный 0.319 ± 0.025 атом/ион, который по зависимости (4) $Y(E)$ соответствует 0.371 ± 0.031 кэВ, что, в свою очередь, по теории Зигмунда – аналитическому выражению (1) – рассчитывается как 0.587 атом/ион. Данные значения не выбиваются из общего ряда экспериментальных ре-

зультатов, представленных различными научными группами в мире.

Полученные выражения для магнитного поля и распределения магнитных полей будут использованы при расчете и моделировании дополнительной внешней магнитной системы, изменяющей форму пучка ионов.

Список литературы

1. Плазменная технология в производстве СБИС / Д. Толливер, Р. Новицки, Д. Хесс и др.; под ред. Н. Айнспрук, Д. Браун, Е. С. Машкова; пер. с англ. Ю. М. Золотарева, В. В. Юдина. М.: Мир, 1987. 469 с.
2. Киреев В. Ю., Данилин Б. С., Кузнецов В. И. Плазмохимическое и ионно-химическое травление микроструктур. М.: Радио и связь, 1983. 126 с.
3. Ивановский Г. Ф., Петров В. И. Ионно-плазменная обработка материалов. М.: Радио и связь, 1986. 230 с.
4. Виноградов Г., Медников К. XORS-200A – базовый модуль травления для массовых производств 65–32 нм // *Электроника: наука, технология, бизнес*. 2022. № 5. С. 42–48. doi: 10.22184/1992-4178.2022.216.5.42.48
5. Брыкин А. Причины системных проблем в развитии радиоэлектронной и электронной промышленности России. Ч. 4: Конец 1970-х – начало 2000-х годов // *Электроника: наука, технология, бизнес*. 2021. № 7. С. 82–94. doi: 10.22184/1992-4178.2021.208.7.82.94
6. Запевалин А. И. Обзор высокоаспектных процессов травления кремния // *Современная техника и технологии*. 2014. № 6. URL: <https://technology.snauka.ru/2014/06/3970> (дата обращения: 23.06.2025).
7. Лютович А. С. Ионно-активированная кристаллизация пленок. Ташкент: Фан, 1982. 148 с.
8. Панфилов Ю. Нанесение тонких пленок в вакууме // *Технологии в электронной промышленности*. 2007. № 3. С. 76–80.
9. Купцов А. Д. Разработка системы отклонения источника ионов // *Перспективные материалы и высокоэффективные процессы обработки: сб. науч. тр. по материалам III Всерос. молодежной конф., Саратов, 22–23 мая 2024 г.* Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т им. Гагарина Ю. А., 2024. С. 134–136.
10. Babushkin A. S., Uvarov I. V., Amirov I. I. Effect of low-energy ion-plasma treatment on residual stresses in thin chromium films // *Technical Physics*. 2018. Vol. 63, № 12. P. 1800–1807. doi: 10.1134/S1063784218120228

11. Sigmund P. Theory of sputtering. I. Sputtering yield of amorphous and polycrystalline targets // *Physical review*. 1969. Vol. 184, № 2. С. 383–416. doi: 10.1103/PhysRev.187.768
12. Behrisch R. Sputtering by particle bombardment I. Physical sputtering of single-element solids. Berlin, Heidelberg: Springer, 1981. 284 p. doi: 10.1007/3-540-10521-2
13. Andersen H. H., Bay H. L. Sputtering yield measurements // *Sputtering by Particle Bombardment I: Physical Sputtering of Single-Element Solids*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005. P. 145–218. doi: 10.1007/3540105212_9
14. Absolute sputtering yield of Ti/TiN by Ar⁺/N⁺ at 400–700 eV / R. Ranjan, J. P. Allain, M. R. Hendricks, D. N. Ruzic // *J. of Vacuum Science & Technology A*. 2001. Vol. 19, № 3. P. 1004–1007. doi: 10.1116/1.1362678
15. Eckstein W. Sputtering yields // *Vacuum*. 2008. Vol. 82, iss. 9. P. 930–934. doi: 10.1016/j.vacuum.2007.12.004
16. Данилин Б. С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок. М.: Энергоатомиздат, 1989. 326 с.
17. Design of a liquid-phase magnetron sputtering small-sized source for the vacuum coating system MVTU-11-1MS / A. D. Kouptsov, D. D. Vasilev, S. V. Sidorova, K. M. Moiseev // *J. of Physics: Conf. Ser.* 2021. Vol. 1799, № 1. Art. № 012016. doi: 10.1088/1742-6596/1799/1/012016
18. Zalm P. C. Energy dependence of the sputtering yield of silicon bombarded with neon, argon, krypton and xenon ions // *J. of Applied Physics*. 1983. Vol. 54, № 5. P. 2660–2666. doi: 10.1063/1.332340
19. Gschneider K. A. Specific-heats of graphite intercalation compounds // *Solid State Physics*. 1964. Vol. 16, № 4. P. 275–282.
20. Andersen H. H., Bay H. L. Heavy-ion sputtering yield of silicon // *J. of Applied Physics*. 1975. Vol. 46, № 5. P. 1919–1921. doi: 10.1063/1.321889
21. Wilson W. D., Haggmark L. G., Biersack J. P. Calculations of nuclear stopping, ranges, and straggling in the low-energy region // *Physical Review B*. 1977. Vol. 15, № 5. Art. № 2458. doi: 10.1103/PhysRevB.15.2458
22. Tachi S., Miyake K., Tokuyama T. Chemical and Physical Roles of Individual Reactive Ions in Si Dry Etching // *Japanese J. of Applied Physics*. 1982. Vol. 21, № S1. С. 141.
23. Kirschner J., Etkorn H. W. Sputtering of amorphous silicon films by 0.5 to 5 keV Ar⁺ ions // *Applications of Surface Science*. 1979. Vol. 3, № 2. P. 251–271. doi: 10.1016/0378-5963(79)90024-2
24. Coburn J. W., Winters H. F., Chuang T. J. Ion-surface interactions in plasma etching // *J. Appl. Phys.* 1977. Vol. 48. P. 3532–3540. doi: 10.1063/1.324150
25. The sputtering of PtSi and NiSi / J. M. Poate, W. L. Brown, R. Homer, W. M. Augustyniak, J. W. Mayer, K. N. Tu, W. F. van der Weg // *Nuclear Instruments and Methods*. 1976. Vol. 132. P. 345–349. doi: 10.1016/0029-554X(76)90756-4
26. Southern A. L., Willis W. R., Robinson M. T. Sputtering Experiments with 1- to 5-keV Ar⁺ Ions // *J. Appl. Phys.* 1963. Vol. 34. P. 153–163. doi: 10.1063/1.1729057
27. Blank P., Wittmaack K. Energy and fluence dependence of the sputtering yield of silicon bombarded with argon and xenon // *J. Appl. Phys.* 1979. Vol. 50, № 3. P. 1519–1528. doi: 10.1063/1.326140
28. Wittmaack K., Poker D. B. Interface broadening in sputter depth profiling through alternating layers of isotopically purified silicon: I. Experimental results // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 1990. Vol. 47, № 3. P. 224–235.
29. Near threshold sputtering of Si and SiO₂ in a Cl₂ environment / D. J. Oostra, R. P. van Ingen, A. Haring, A. E. de Vries, G. N. A. van Veen // *Applied Physics Lett.* 1987. Vol. 50, № 21. P. 1506–1508. doi: 10.1063/1.97814
30. Laegreid N., Wehner G. K. Sputtering yields of metals for Ar⁺ and Ne⁺ ions with energies from 50 to 600 eV // *J. of Applied Physics*. 1961. Vol. 32, № 3. P. 365–369. doi: 10.1063/1.1736012
31. Sputtering Data / W. Eckstein, C. Garcí'a-Rosales, J. Roth, W. Ottenberger. Garching: M@:unchen, 1993. 342 p.
32. Gerlach-Meyer U., Coburn J. W., Kay E. Ion-enhanced gas-surface chemistry: The influence of the mass of the incident ion // *Surface Science*. 1981. Vol. 103, № 1. P. 177–188. doi: 10.1016/0039-6028(81)90106-0
33. Robinson M. T., Oen O. S. The channeling of energetic atoms in crystal lattices // *Appl. Phys. Lett.* 1963. Vol. 2, № 2. P. 30–32. doi: 10.1063/1.1753757
34. EerNisse E.P. Sputtering and strain of silicon by ion implantation // *J. of Applied Physics*. 1971. Vol. 42. P. 480–482. doi: 10.1063/1.1659630
35. Основы технологии электронной компонентной базы / А. А. Голишников, А. Ю. Красюков, С. А. Поломошнов, М. Г. Путря, В. И. Шевяков; под ред. Ю. А. Чаплыгина. М.: МИЭТ, 2013. 176 с.
36. Weber T. A. Surface Reconstruction of Si (100) // *MRS Online Proc. Library (OPL)*. 1985. Vol. 63. P. 163–166. doi: 10.1557/PROC-63-163
37. Ramstad A., Brocks G., Kelly P. J. Theoretical study of the Si (100) surface reconstruction // *Physical Review B*. 1995. Vol. 51, № 20. Art. № 14504. doi: 10.1103/PhysRevB.51.14504

38. Управление формой пучка технологического ионного источника для высокоточной обработки поверхности / Д. В. Духопельников, Е. В. Воробьев, С. Г. Ивахненко, Д. В. Кириллов // Вестн. Моск. гос.

техн. ун-та им. Н. Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2017. № 3 (72). С. 24–36.
doi: 10.18698/1812-3368-2017-3-24-36

Информация об авторах

Сидорова Светлана Владимировна – кандидат технических наук (2016), доцент кафедры электронных технологий в машиностроении Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Автор более 200 научных работ. Сфера научных интересов – микро- и нанoeлектроника; тонкопленочные покрытия и наноразмерные структуры; вакуумные технологические процессы и оборудование. Адрес: Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, Москва, 105005, Россия
E-mail: sidorova@bmstu.ru
<http://orcid.org/0000-0002-3002-1246>

Купцов Алексей Дмитриевич – магистр по специальности "Электроника и нанoeлектроника" (2021, Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана), ассистент, аспирант кафедры электронных технологий в машиностроении Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Автор 54 научных работ. Сфера научных интересов: микроэлектроника; атомно-силовая микроскопия; вакуумные технологические процессы и оборудование. Адрес: Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, Москва, 105005, Россия
E-mail: alex-kouptsov@bmstu.ru
<https://orcid.org/0009-0002-3997-9722>

Пименов Илья Евгеньевич – магистр по специальности "Электроника и нанoeлектроника" (2023, Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана), инженер-конструктор силовой электроники, аспирант Федерального государственного унитарного предприятия "НАМИ". Автор 14 научных работ. Сфера научных интересов: микроэлектроника; СВЧ-электроника; накопители энергии; силовые установки транспортных средств; вакуумные технологические процессы и оборудование. Адрес: Федеральное государственное унитарное предприятие "НАМИ", ул. Автомоторная, д. 2, Москва, 125438, Россия
E-mail: iliya.pimenov@nami.ru
<https://orcid.org/0009-0004-9268-0206>

References

1. Tolliver D., Novitski R., Khess D. *Plazmennaya tekhnologiya v proizvodstve SBIS* [Plasma Technology in VLSI Production]. Ed. by N. Ainspruk, D. Braun, E. S. Mashkova. Moscow, *Mir*, 1987, 469 p. (In Russ.)
2. Kireev V. Yu., Danilin B. S., Kuznetsov V. I. *Plazmokhimicheskoe i ionno-khimicheskoe travlenie mikrostruktur* [Plasma-Chemical and Ion-Chemical Etching of Microstructures]. Moscow, *Radio i svyaz'*, 1983, 126 p. (In Russ.)
3. Ivanovskii G. F., Petrov V. I. *Ionno-plazmennaya obrabotka materialov* [Ion-Plasma Processing of Materials]. Moscow, *Radio i svyaz'*, 1986, 230 p. (In Russ.)
4. Vinogradov G., Mednikov K. XORS-200A Is a Basic Etching Module for 65–32 nm Mass Production. *Electronics: Science, Technology, Business*. 2022, no. 5, pp. 42–48. (In Russ.)
doi: 10.22184/1992-4178.2022.216.5.42.48
5. Brykin A. Sources of Systemic Problems in the Development of Radio-Electronic and Electronic Industry in Russia Part 4. Late 70s – Early 2000s. *Electronics: Science, Technology, Business*. 2021, no. 7, pp. 82–94.
doi: 10.22184/1992-4178.2021.208.7.82.94
6. Zapevalin A. I. An Overview of High-Aspect Process Silicon Etching. *Modern Technics and Technologies*. 2014,

- no. 6. Available at: <https://technology.snauka.ru/2014/06/3970> (accessed 23.06.2025).
7. Lyutovich A. S. *Ionno-aktivirovannaya kristallizatsiya plenok* [Ion-activated Crystallization of Films]. *Tashkent, Fan*, 1982, 148 p. (In Russ.)
8. Panfilov Yu. Deposition of Thin Films in Vacuum. *Technologies in the Electronics Industry*. 2007, no. 3, pp. 76–80. (In Russ.)
9. Kuptsov A. D. *Razrabotka sistemy otkloneniya istochnika ionov* [Development of an Ion Source Deflection System]. *Advanced Materials and Highly Efficient Processing: Collection of Scientific Papers Based on the Proc. of the III All-Russ. Youth Conf., Saratov, 22–23 May 2024*. Saratov, Saratov State Technical University n. a. Yu. A. Gagarin, 2024, pp. 134–136.
10. Babushkin A. S., Uvarov I. V., Amirov I. I. Effect of Low-Energy Ion-Plasma Treatment on Residual Stresses in Thin Chromium Films. *Technical Physics*. 2018, vol. 63, no. 12, pp. 1800–1807.
doi: 10.1134/S1063784218120228
11. Sigmund P. Theory of Sputtering. I. Sputtering Yield of Amorphous and Polycrystalline Targets. *Physical review*. 1969, vol. 184, no. 2, pp. 383–416.
doi: 10.1103/PhysRev.187.768

12. Behrisch R. Sputtering by Particle Bombardment I. Physical Sputtering of Single-Element Solids. Berlin, Heidelberg, Springer, 1981, 284 p.
doi: 10.1007/3-540-10521-2
13. Andersen H. H., Bay H. L. Sputtering Yield Measurements. Sputtering by Particle Bombardment I: Physical Sputtering of Single-Element Solids. Berlin, Heidelberg, Springer, 2005, pp. 145–218.
doi: 10.1007/3540105212_9
14. Ranjan R., Allain J. P., Hendricks M. R., Ruzic D. N. Absolute sputtering yield of Ti/TiN by Ar⁺/N⁺ at 400–700 eV. J. of Vacuum Science & Technology A. 2001, vol. 19, no. 3, pp. 1004–1007.
doi: 10.1116/1.1362678
15. Eckstein W. Sputtering Yields. Vacuum. 2008, vol. 82, iss. 9, pp. 930–934.
doi: 10.1016/j.vacuum.2007.12.004
16. Danilin B. S. *Primenenie nizkoterperaturnoi plazmy dlya naneseniya tonkikh plenok* [Application of Low-Temperature Plasma for Thin Film Deposition]. Moscow, *Energoatomizdat*, 1989, 326 p. (In Russ.)
17. Kouptsov A. D., Vasilev D. D., Sidorova S. V., Moiseev K. M. Design of a Liquid-Phase Magnetron Sputtering Small-Sized Source for the Vacuum Coating System MVTU-11-1MS. J. of Physics: Conf. Ser. 2021, vol. 1799, no. 1, art. no. 012016.
doi: 10.1088/1742-6596/1799/1/012016
18. Zalm P. C. Energy Dependence of the Sputtering Yield of Silicon Bombarded with Neon, Argon, Krypton and Xenon Ions. J. of Applied Physics. 1983, vol. 54, no. 5, pp. 2660–2666.
doi: 10.1063/1.332340
19. Gschneider K. A. Specific-Heats of Graphite Intercalation Compounds. Solid State Physics. 1964, vol. 16, no. 4, pp. 275–282.
20. Andersen H. H., Bay H. L. Heavy-Ion Sputtering Yield of Silicon. J. of Applied Physics. 1975, vol. 46, no. 5, pp. 1919–1921.
doi: 10.1063/1.321889
21. Wilson W. D., Haggmark L. G., Biersack J. P. Calculations of Nuclear Stopping, Ranges, and Straggling in the Low-Energy Region. Physical Review B. 1977, vol. 15, no. 5, art. no. 2458.
doi: 10.1103/PhysRevB.15.2458
22. Tachi S., Miyake K., Tokuyama T. Chemical and Physical Roles of Individual Reactive Ions in Si Dry Etching. Japanese J. of Applied Physics. 1982, vol. 21, no. S1, p. 141.
23. Kirschner J., Etzkorn H. W. Sputtering of Amorphous Silicon Films by 0.5 to 5 keV Ar⁺ Ions. Applications of Surface Science. 1979, vol. 3, no. 2, pp. 251–271.
doi: 10.1016/0378-5963(79)90024-2
24. Coburn J. W., Winters H. F., Chuang T. J. Ion-Surface Interactions in Plasma Etching. J. Appl. Phys. 1977, vol. 48, pp. 3532–3540.
doi: 10.1063/1.324150
25. Poate J. M., Brown W. L., Homer R., Augustyniak W. M., Mayer J. W., Tu K. N., van der Weg W. F. The sputtering of PtSi and NiSi. Nuclear Instruments and Methods. 1976, vol. 132, pp. 345–349.
doi: 10.1016/0029-554X(76)90756-4
26. Southern A. L., Willis W. R., Robinson M. T. Sputtering Experiments with 1- to 5-keV Ar⁺ Ions. J. Appl. Phys. 1963, vol. 34, pp. 153–163.
doi: 10.1063/1.1729057
27. Blank P., Wittmaack K. Energy and Fluence Dependence of the Sputtering Yield of Silicon Bombarded With Argon And Xenon. J. Appl. Phys. 1979, vol. 50, no. 3, pp. 1519–1528.
doi: 10.1063/1.326140
28. Wittmaack K., Poker D. B. Interface Broadening in Sputter Depth Profiling through Alternating Layers of Isotopically Purified Silicon: I. Experimental Results. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 1990, vol. 47, no. 3, pp. 224–235.
29. Oostra D. J., van Ingen R. P., Haring A., de Vries A. E., van Veen G. N. A. Near Threshold Sputtering of Si and SiO₂ in a Cl₂ Environment. Applied Physics Lett. 1987, vol. 50, no. 21, pp. 1506–1508.
doi: 10.1063/1.97814
30. Laegreid N., Wehner G. K. Sputtering Yields of Metals for Ar⁺ and Ne⁺ Ions with Energies from 50 to 600 eV. J. of Applied Physics. 1961, vol. 32, no. 3, pp. 365–369.
doi: 10.1063/1.1736012
31. Eckstein W., Garcí'a-Rosales C., Roth J., Ottenberger W. Sputtering Data. Garching, M@:unchen, 1993, 342 p.
32. Gerlach-Meyer U., Coburn J. W., Kay E. Ion-enhanced gas-surface chemistry: The influence of the mass of the incident ion. Surface Science. 1981, vol. 103, no. 1, pp. 177–188.
doi: 10.1016/0039-6028(81)90106-0
33. Robinson M. T., Oen O. S. The Channeling of Energetic Atoms in Crystal Lattices. Appl. Phys. Lett. 1963, vol. 2, no. 2, pp. 30–32.
doi: 10.1063/1.1753757
34. EerNisse E. P. Sputtering and Strain of Silicon By Ion Implantation. J. of Applied Physics. 1971, vol. 42, pp. 480–482.
doi: 10.1063/1.1659630
35. Golishnikov A. A., Krasnyukov A. Yu., Polomoshnov S. A., Putrya M. G., Shevyakov V. I. *Osnovy tekhnologii elektronnoi komponentnoi bazy* [Fundamentals of Electronic Component Base Technology]. Ed. by Yu. A. Chaplygina. Moscow, *MIET*, 2013, 176 p. (In Russ.)
36. Weber T. A. Surface Reconstruction of Si (100). MRS Online Proc. Library (OPL). 1985, vol. 63, pp. 163–166.
doi: 10.1557/PROC-63-163
37. Ramstad A., Brocks G., Kelly P. J. Theoretical Study of the Si (100) Surface Reconstruction. Physical Review B. 1995, vol. 51, no. 20, art. no. 14504.
doi: 10.1103/PhysRevB.51.14504
38. Dukhopel'nikov D. V., Vorob'ev E. V., Ivakhnenko S. G., Kirillov D. V. Shape Control of the Technological

Ion Source Beam for High-Precision Surface Treatment. ty. Series Natural Sciences. 2017, no. 3 (72), pp. 24–36.
Herald of the Bauman Moscow State Technical University. doi: 10.18698/1812-3368-2017-3-24-36

Information about the authors

Svetlana V. Sidorova, Cand. Sci. (Eng.) (2016), Associate Professor of the Department of Electronic Technologies in Mechanical Engineering of Bauman Moscow State Technical University. The author of more than 200 scientific publications. Area of expertise: micro- and nanoelectronics; thin-film coatings and nanoscale structures; vacuum technological processes and equipment.

Address: Bauman Moscow State Technical University, 5, build. 1, 2nd Bauman St., Moscow 105005, Russia

E-mail: sidorova@bmstu.ru

<http://orcid.org/0000-0002-3002-1246>

Alexey D. Kouptsov, Master's Degree in Electronics and Nanoelectronics (2021, Bauman Moscow State Technical University), Assistant, Postgraduate student of the Department of Electronic Technologies in Mechanical Engineering of Bauman Moscow State Technical University. The author of 54 scientific publications. Area of expertise: microelectronics; atomic force microscopy; vacuum technological processes and equipment.

Address: Bauman Moscow State Technical University, 5, build. 1, 2nd Bauman St., Moscow 105005, Russia

E-mail: alex-kouptsov@bmstu.ru

<https://orcid.org/0009-0002-3997-9722>

Ilya E. Pimenov, Master's Degree in Electronics and Nanoelectronics (2023, Bauman Moscow State Technical University), power electronics design engineer, Postgraduate student of Federal State Unitary Enterprise "NAMI". The author of more than 14 scientific publications. Area of expertise: microelectronics; microwave electronics; energy storage; power plants of vehicles; vacuum technological processes and equipment.

Address: Federal State Unitary Enterprise "NAMI", 2, Avtomotornaya St., Moscow 125438, Russia

E-mail: iliya.pimenov@nami.ru

<https://orcid.org/0009-0004-9268-0206>
