

УДК 539.198

## УСКОРИТЕЛЬ КЛАСТЕРНЫХ ИОНОВ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ СВЕРХТОЧНОЙ ПОЛИРОВКИ ПОВЕРХНОСТИ

**Д. С. Киреев**, аспирант кафедры физической электроники физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова; dmtr.kireeff6497@yandex.ru

**А. В. Данилов**, магистр кафедры физической электроники физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова; av.danilov@physics.msu.ru

**А. Е. Иешкин**, к.ф.-м.н., с.н.с. кафедры физической электроники физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова; ieshkin@physics.msu.ru

**В. С. Черныш**, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой физической электроники физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова; chernysh@phys.msu.ru

*В статье подробно описаны конструкция и основные принципы работы ускорителя кластерных ионов МГУ имени М.В. Ломоносова, основным принципом формирования кластерных ионов в котором является адиабатическое расширение рабочего газа через сверхзвуковое сопло. Целью работы было исследование рабочих характеристик ускорителя и возможности его использования для сверхточной полировки поверхности твердого тела на примере германия. Показано, что на существующем ускорителе возможно получение кластерных ионов аргона со средними размерами вблизи тысячи атомов на кластер. Ток пучка ионов составляет несколько микроампер. Исследовано влияние фонового газа в вакуумной камере на транспортировку пучка к мишени. Приведены количественные данные шероховатости поверхности германия и карбида кремния после абразивной полировки и после облучения кластерными ионами  $Ar_n^+$  с энергией 10 кэВ.*

**Ключевые слова:** ионные пучки, кластерные ионы, ускоритель кластерных ионов, транспортировка ионных пучков, распыление, нанорельеф, планаризация поверхности, атомно-силовая микроскопия.

DOI: 10.21667/1995-4565-2018-66-4-2-40-48

### Введение

Ионно-пучковые технологии на сегодняшний день являются зарекомендовавшим себя инструментом для решения широкого круга прикладных и фундаментальных задач. Ионные пучки находят свое применение в микро- и нанoeлектронике как средство обработки и модификации поверхности, а также для диагностики состава и структуры материалов. Особое внимание стоит обратить на новое, активно развивающееся направление в этой области: кластерные ионные пучки [1].

Кластер представляет собой совокупность атомов или молекул. В случае газовых кластеров, это могут быть атомы инертных газов, таких как аргон, ксенон и пр., атомы или молекулы которых связаны силами Ван-дер-Ваальса. Количество атомов или молекул в составе кластера может варьироваться от нескольких единиц до десятков тысяч. Поэтому кластер занимает промежуточное положение между атомарными объектами и объемным твердым телом. В виду слабости сил Ван-дер-Ваальса (энергия связи  $\approx 10$  мэВ) газо-

вые кластеры могут существовать лишь в вакууме в виде отдельных частиц, либо в составе пучка.

Взаимодействие атомарных ионов и кластерных ионов тех же энергий с поверхностью твердого тела существенно различается. При взаимодействии кластерного иона с поверхностью мишени большое количество атомов, составляющих кластер, взаимодействуют как минимум с тем же количеством атомов твердого тела. С другой стороны, энергия ускоренного кластерного иона распределяется между всеми атомами в составе кластера, поэтому кинетическая энергия, приходящаяся на отдельный атом относительно мала (меньше в  $n$  раз, чем энергия всего кластера, где  $n$  – число атомов в составе кластера). Поэтому при одинаковой энергии глубина проникновения кластерного иона внутрь твердого тела существенно меньше, чем у атомарного иона [2, 3], а вся энергия кластера выделяется в тонком приповерхностном слое. Это позволяет применять кластерные ионные пучки для обработки и модификации поверхности, минимально нарушая приповерхностный слой материала.

При взаимодействии ускоренных ионов с поверхностью твердого тела одним из ключевых процессов является распыление (эмиссия) атомов поверхности твердого тела. Данный процесс характеризуется коэффициентом распыления  $Y$ , который равен среднему количеству распыленных атомов вещества, приходящихся на один упавший ион. Для атомарных и молекулярных ионов зависимости  $Y$  от различных параметров взаимодействия, таких как энергия и угол падения ионов, хорошо изучены как теоретически, так и экспериментально [4]. Однако для кластерных ионов подобные зависимости изучены в значительно меньшем объеме. Так, известно, что коэффициент распыления сильно зависит от угла падения пучка ионов, отсчитываемого обычно от нормали к поверхности. Интересно, что данная зависимость для пучков атомарных ионов и пучков кластерных ионов существенно различается [5]. Вплоть до скользящих углов падения зависимость коэффициента распыления мономерными ионами имеет вид  $Y(\theta) \sim \cos^{-1}(\theta)$ , где угол  $\theta$  отсчитывается от нормали к поверхности. Такая зависимость от локального угла падения является одним из факторов, приводящих к развитию рельефа поверхности при облучении пучком мономерных ионов. Совсем по-другому дело обстоит с пучком кластерных ионов:  $Y(\theta) \sim \cos(\theta)$ . Рельеф поверхности обычно представляет собой чередующиеся выступы и впадины различной величины. В соответствии с угловой зависимостью  $Y(\theta)$ , при нормальном падении пучка кластерных ионов имеет максимальное значение, так как косинус угла в этом случае достигает своего максимального значения, что приводит к эффективному распылению участков поверхности, имеющих выступы. С другой стороны, склоны холмов распыляются в меньшей степени, а впадины заполняются атомами распыленного вещества за счет латерального характера углового распределения распыленного вещества. Латеральный эффект заключается в том, что при ионном распылении атомов поверхности твердого тела распыленные атомы вылетают вдоль поверхности под большими углами от нормали [6, 7]. Все это приводит к эффективному сглаживанию рельефа поверхности при облучении газовыми кластерными ионами [8, 9].

Вышеописанные особенности взаимодействия кластерных ионов с поверхностью твердого тела позволяют эффективно применять кластерные пучки для сглаживания рельефа поверхности различных материалов, имплантации на сверхмалые глубины, а также в качестве высоко-

точного средства диагностики поверхности и структуры материалов [10].

В данной работе приведено описание ускорителя газовых кластерных ионов, разработанного и созданного в МГУ имени М.В. Ломоносова, и результаты исследования его рабочих характеристик. На примере образцов германия показана эффективность ионно-кластерной технологии для высокоточного сглаживания поверхности твердого тела.

### Экспериментальная установка

На рисунке 1 схематически представлена конструкция ускорителя газовых кластерных ионов (УГКИ) [11].

Вакуумная часть ускорителя состоит из трех вакуумных систем: система формирования кластеров, системы ионизации и ускорения, а также рабочая камера. Камера каждой системы снабжена датчиками давления, с помощью которых осуществляется контроль уровня вакуума. Камеры систем соединены между собой диафрагмами. Такой принцип построения вакуумной схемы ускорителя позволяет поддерживать необходимое рабочее давление в каждой из камер ускорителя. Откачка рабочих камер ускорителя производится с помощью двух турбомолекулярных насосов (камера формирования кластеров и рабочая камера) и диффузионного насоса (камера ионизации и ускорения). В качестве рабочей жидкости в диффузионном насосе используется полифиниловый эфир 5Ф4Э, что позволяет избежать загрязнения деталей ионизатора полимерными пленками, образующимися при использовании обычных диффузионных масел. Работу высоковакуумных насосов, в свою очередь, обеспечивают три форвакуумных насоса. Рабочий газ под давлением поступает в сверхзвуковое сопло и адиабатически расширяется в вакуум. Сопло имеет переменное сечение, его диаметр в наиболее узкой части равен 140 мкм. При этом поток газа охлаждается, тепловая энергия его атомов или молекул становится меньше, чем энергия связи атомов в кластере, и становится возможной кластеризация.

Рассмотрим устройство камеры, в которой происходит образование кластеров. Для формирования кластеров необходимо давление внутри камеры на уровне  $10^{-2} - 10^{-3}$  Торр. В камеру постоянно подается газ из системы газонапуска под давлением, которое может варьироваться в диапазоне от 1 до 6 атм. Для интенсивной откачки и обеспечения нужного уровня вакуума используется турбомолекулярный насос Pfeiffer TRH 510 со скоростью откачки 500 л/с.

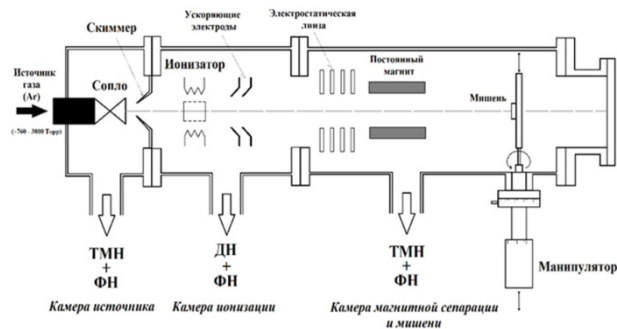


Рисунок 1 – Схема ускорителя газовых кластерных ионов

Тем не менее, так как для образования кластерных ионов через сверхзвуковое сопло в единицу времени должно пройти значительное количество газа, мощности имеющегося насоса не хватает для откачки газа, поступающего в непрерывном режиме. В связи с этим, подача рабочего газа в сопло осуществляется в импульсном режиме. Отношение времени открытого состояния клапана подачи газа к закрытому равно 1:20.

После формирования кластерный поток попадает в систему ионизации. Система ионизации и ускорения находится в следующей камере, отделенной от камеры формирования кластерного потока скиммером, который представляет собой соосный с соплом металлический конус, в вершине которого имеется отверстие диаметром 2 мм. Скиммер используется для выделения нейтральных кластерных ионов после их формирования из общего потока газа на выходе из сопла [12]. В камере установлен ионизатор. Кластеры, выходящие из скиммера, ионизируются электронами посредством электронного удара, энергию электронов можно варьировать в пределах 15-300 эВ. Ионизатор представляет собой смонтированную на керамической подложке систему из катода и анода, с косвенным подогревом. Напротив катода установлен цилиндрический анод, соосный с проходящим сквозь него пучком кластеров. Анод представляет собой сетку, тем самым, позволяя электронам пролетать сквозь нее и уже внутри анода производить ионизацию кластеров. Для уменьшения температуры эмиссии в качестве эмитирующего элемента выбран материал с низкой работой выхода. Сам же корпус катода изготовлен из молибдена, имеющего высокую температуру плавления и низкий коэффициент распыления. В целях предотвращения сильного нагрева камеры в процессе работы, во фланце, на котором монтируется ионизатор, предусмотрено водяное охлаждение.

После ионизации в составе пучка присутствуют кластерные ионы различных размеров, а также в значительной мере присутствуют мономерные ионы. В виду кардинального различия в

механизмах формирования рельефа и величины образующегося нарушенного слоя после облучения кластерными и мономерными ионами, в экспериментальной установке предусмотрена система магнитной сепарации ионов пучка по массам. Основными элементами системы являются два постоянных магнита шириной 80 мм и длиной 120 мм, расположенных параллельно друг другу на расстоянии 8 мм. Величина однородного магнитного поля между магнитами составляет 160 мТл. Пучок ускоренных кластерных и атомарных ионов проходит в зазоре между магнитами, и легкие частицы отклоняются постоянным магнитным полем. Таким образом, кластерные ионы, имеющие малую массу ( $n < 100$  атомов), не достигают мишени.

Для обеспечения более равномерного режима облучения поверхности была реализована методика сканирования пучком поверхности образца. Система сканирования представляет собой две пары стальных пластин, длиной и шириной 5 см. В каждой паре пластины установлены параллельно друг другу на расстоянии 1,5 см. Между пластинами в первой и второй паре создается электрическое поле с различной частотой, 30 Гц и 1 кГц, соответственно. Частота подобрана таким образом, чтобы исключить формирование фигур Лиссажу, и обеспечить наиболее равномерно распределенную по площади поверхности мишени траекторию ионного пучка. Пары пластин ориентированы друг относительно друга таким образом, что линии напряженности полей между ними перпендикулярны. При прохождении ионного пучка через данную систему происходит одновременное отклонение пучка по двум осям. Величина области, внутри которой сканирует пучок, равна 1 см на 1 см. Среднее время, в течении которого кластерный ион находится между пластинами на несколько порядков меньше периода изменения поля, поэтому можно считать, что распределение кластерных ионов внутри области сканирования равномерное.

### Методика исследований

После прохождения магнита, тяжелые кластеры попадают на образец или на детектор. Мишень и детектор расположены перпендикулярно оси пучка, и могут перемещаться в горизонтальном направлении с помощью манипулятора. Детектор представляет собой цилиндр Фарадея, соединенный с одним из каналов осциллографа для регистрации величины тока кластерных ионов. Пучок также содержит мономеры, которые регистрируются вторым детектором, расположенным на некотором расстоянии от оси пучка, в зависимости от энергии ионов, это расстояние имеет различное значение. Сигнал со второго детектора поступает на второй канал осциллографа. Начало развертки синхронизировано с моментом открытия сопла при помощи блока управления импульсным клапаном. Таким образом, на экране осциллографа можно наблюдать сигналы кластерных ионов и мономерных ионов одновременно. Это позволяет лучше контролировать параметры пучка и оценивать плотности ионных токов для более точного расчета ионной дозы облучения.

Для контроля массовых параметров кластерного пучка реализована времяпролетная система анализа размеров кластерных ионов. Две стальные пластины длиной 7 см и шириной 5 см установлены параллельно друг другу на расстоянии 6 мм сразу после ускоряющих электродов в камере ионизатора. Одна из пластин заземлена, на вторую подается напряжение, достаточное для отклонения пучка ионов от детектора. Таким образом, между пластинами возникает однородное электрическое поле, которое отклоняет ускоренные ионы так, что они не достигают детектора, который установлен на оси пучка в конце рабочей камеры. В режиме импульсной подачи газа времена закрытого и открытого состояний клапана регулируются с помощью специального блока управления. Источник напряжения на пластине синхронизирован с блоком управления импульсного клапана так, что после каждого импульса через определенное время напряжение перестает подаваться в течение короткого промежутка времени, составляющего несколько микросекунд. В течение этого промежутка времени ионы не отклоняются и могут попадать на детектор. В приближении однозарядных кластеров, ионы ускорены одинаковой энергии, но в виду их разной массы им требуется различное время для преодоления расстояния от пластин до детектора. Регистрируя величину ионного тока в разные моменты времени, можно получить распределение количества кластерных

ионов в пучке в зависимости от их массы, то есть количества атомов в их составе.

Для анализа профиля кластерного пучка измерения осуществлялись с помощью цилиндра Фарадея диаметром 3 мм. С помощью механического манипулятора цилиндр перемещался в горизонтальном направлении перпендикулярно оси пучка и регистрировал величину ионного тока на различных расстояниях от оси пучка. Для оценки влияния остаточного газа на проходящий сквозь него пучок кластерных ионов измерения проводились при различных давлениях остаточного газа в рабочей камере. С этой целью был установлен микронатекатель, с помощью которого в рабочую камеру производился напуск азота до достижения необходимого давления, при котором производились измерения тока.

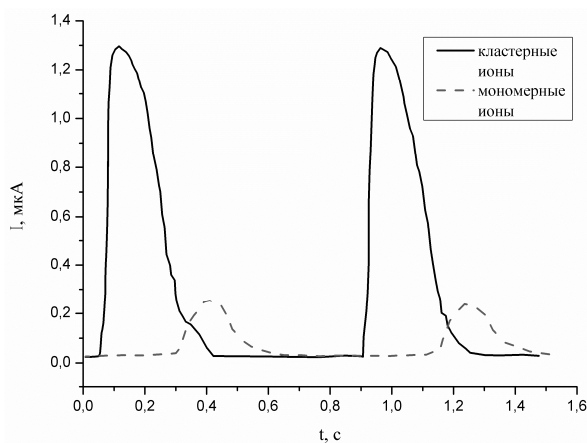
В качестве эксперимента по сверхточной полировке поверхности было проведено облучение поверхности германия кластерными ионами аргона. Перед облучением была проведена абразивная полировка мишени. Поверхность поликристаллического германия облучалась кластерными ионами  $Ar_n^+$  с энергией 10 кэВ при нормальном падении пучка на образец. Половина рабочей поверхности образца была закрыта от облучения титановой маской, что позволило получить резкую границу облученной и исходной поверхностей. Титан имеет один из самых низких коэффициентов распыления, поэтому материал защитной маски практически не распыляется, тем самым, не оказывая существенного влияния на рельеф поверхности образца. Ионная доза облучения составила  $1,5 \times 10^{16}$  ион/см<sup>2</sup>. После облучения и удаления защитной маски поверхность германия была исследована с помощью атомно-силового микроскопа в полуконтактном режиме.

### Результаты и обсуждение

Одной из основных характеристик ионного пучка является плотность ионного тока. С помощью точной юстировки положения сопла и калибровки параметров ионизатора удалось существенно увеличить ток кластерного ионного пучка по сравнению с описанными нами ранее в работе [11]. На рисунке 2 представлена зависимость амплитуды сигнала ионного тока от времени. Как видно из рисунка 2, пиковое значение тока пучка составляет 2,5 мкА, что на два порядка выше, чем предыдущее значение ионного тока на данной установке.

Как уже было отмечено выше, подача газа осуществляется в импульсном режиме, т.е. газ поступает в систему только в небольшой промежуток времени, затем клапан закрывается, и подача газа прекращается. Открытие и закрытие

клапана чередуется с некоторым временным интервалом. Важно заметить, что после закрытия клапана кластеры продолжают образовываться, так как между источником газа и соплом есть небольшой объем пустого пространства, а диаметр сопла довольно мал, чтобы весь газ из этого объема успел пройти через него [13]. Этим обусловлено наличие второго пика на графике зависимостей токов, который соответствует току мономеров. Время, в течение которого клапан открыт, то есть газ поступает в объем перед соплом, гораздо меньше периода действия клапана и составляет 40 мс. Стоит обратить внимание на то, что основная часть кластерных ионов формируется уже после закрытия клапана подачи газа, а мономерные ионы в большинстве образуются после кластерных ионов, что согласуется с формой регистрируемых ионных сигналов (рисунок 2).



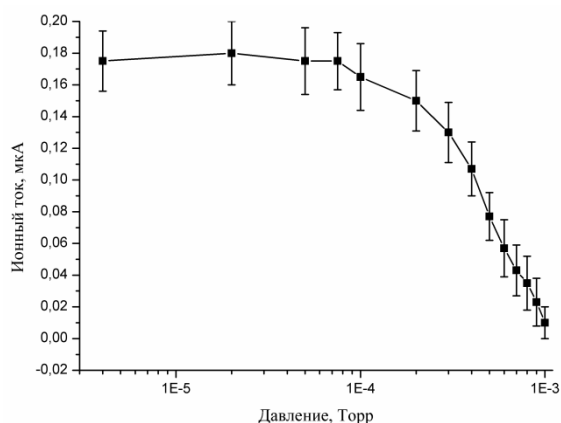
**Рисунок 2 – Сигнал кластерных и мономерных ионов при работе ускорителя в импульсном режиме**

Перед попаданием на мишень образовавшийся ускоренный кластерный ион преодолевает расстояние порядка 1 м и сталкивается с атомами и молекулами остаточного газа. В результате подобных столкновений кластерные ионы распадаются на кластеры меньшего размера с полной, либо частичной нейтрализацией заряда [14]. Поэтому величина ионного тока кластеров сильно зависит от давления остаточных газов в рабочей камере. На рисунке 3 представлена зависимость ионного тока пучка, от давления в рабочей камере. Как видно из рисунка, ионный ток экспоненциально убывает до нуля при увеличении давления в интервале от  $10^{-4}$  до  $10^{-3}$  Торр. При давлениях ниже  $10^{-4}$  Торр величина тока практически не зависит от давления, находясь в состоянии насыщения. Это обусловлено тем, что при давлении ниже  $10^{-4}$  Торр длина свободного пробега для кластерных ионов для большинства имеющихся размеров кластера становится больше расстояния между ионизатором

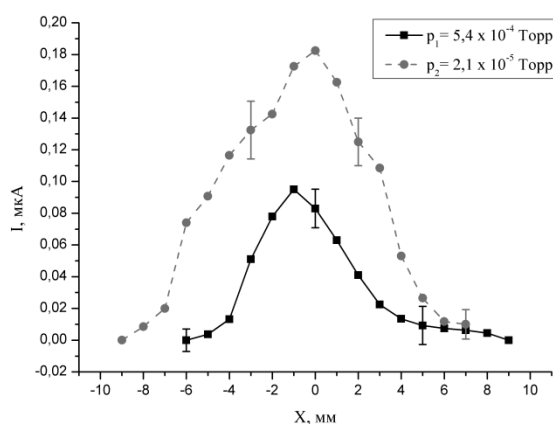
и мишенью (1 м). В виду этого при работе ускорителя давление в рабочей камере поддерживается на уровне  $3 \times 10^{-6}$  Торр, чтобы даже самые массивные кластерные ионы могли достигнуть мишени в своем изначальном состоянии.

Важно, чтобы образовавшиеся кластерные ионы сохраняли свой размер и свое зарядовое состояние, так как влияние кластерных ионов и нейтральных кластеров при прочих равных условиях различается [15].

Помимо влияния на величину ионного кластерного тока, давление в рабочей камере так же влияет на форму зависимости ионного тока от расстояния детектора от оси пучка. На рисунке 4 представлена зависимость величины ионного тока пучка, измеряемого цилиндром Фарадея, от расстояния до оси пучка. Стоит отметить, что с увеличением давления на порядок диаметр сечения пучка уменьшается практически в два раза с 15 мм до 7 мм. Подобное смещение и уменьшение диаметра пучка играет важную роль при облучении мишеней малых размеров.



**Рисунок 3 – Зависимость ионного тока кластеров от давления остаточных газов в рабочей камере**



**Рисунок 4 – Зависимость ионного тока кластеров от расстояния от оси пучка при различных давлениях в рабочей камере. На графике приведены типичные отклонения от измеряемой величины ионного тока при соответствующем давлении**

Помимо давления остаточных газов в вакуумных камерах на параметры пучка ключевым образом влияет давление рабочего газа, при котором происходит его напуск в сверхзвуковое сопло. Так, известно, что давление рабочего газа главным образом влияет на количество образующихся кластеров и на их размер [16, 17]. На рисунке 5 представлены времяпролетные спектры кластерных ионов аргона с энергией 10 кэВ при различных давлениях рабочего газа. Количество кластерных ионов, соответствующих определенному давлению, было нормировано на максимальное значение.

Видно, что при давлении 1,8 атмосфер общее количество образующихся кластерных ионов и их наиболее вероятный размер значительно ниже, чем при значении давления в 3 атмосферы. С увеличением давления до 4 и 6 атмосфер различия в общем количестве кластерных ионов и их размерах не столь существенны, но тем не менее значимы при облучении поверхности твердых тел. Немаловажным отличием спектров, полученных при различных давлениях является увеличение наиболее вероятного размера кластера с увеличением давления. При давлении 3 атмосферы наиболее вероятный размер кластера равен 570-600 атомов на кластер, при 4 атмосферах это значение увеличивается до 900-950 атомов, и достигает наибольшего значения 1300-1350 атомов при давлении 6 атмосфер. Помимо давления рабочего газа на размер кластерного иона, достигающего детектор, влияет расстояние, которое проходит кластерный ион в вакууме без столкновений с молекулами остаточного газа в рабочей камере (таблица).

#### Средняя длина свободного пробега кластерных ионов Ar при различных давлениях среды

Средняя длина свободного пробега, м			Размер кластера, ед. атомов
Давление $10^{-4}$ Торр	Давление $10^{-5}$ Торр	Давление $10^{-6}$ Торр	
0,958	9,58	95,76	1
0,044	0,44	4,44	100
0,015	0,15	1,52	500
0,010	0,10	0,96	1000

В таблице представлена оценка средних длин свободного пробега кластеров Ar различных размеров в зависимости от давления остаточных газов в рабочей камере.

$$\lambda = \frac{k \cdot T}{\sqrt{2} \cdot \sigma \cdot p}, \quad (1)$$

где  $p$  – давление остаточных газов в рабочей камере,  $T$  – температура внутри рабочей камеры,  $k$  – постоянная Больцмана,  $\sigma$  – эффективное сечение кластера Ar,  $\sigma \sim d^2$ . Диаметр кластера  $d$  рассчитывался для шарообразной модели кластера, атомы внутри которого плотно упакованы.

$$d = 2 \cdot \left[ \frac{3 \cdot V}{4 \cdot \pi} \right]^{1/3}, \quad (2)$$

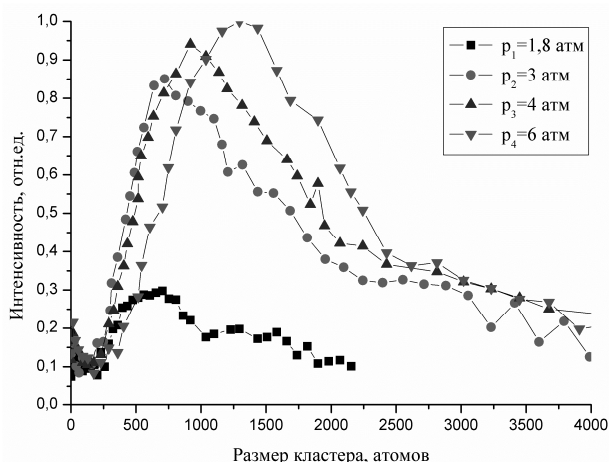
где  $V$  – объем кластера, пропорциональный количеству атомов в составе кластера.

При столкновении ускоренного кластерного иона с молекулами остаточного газа в камере, кластерный ион теряет часть своих атомов, уменьшаясь в размерах, разваливаясь на более мелкие кластеры и мономерные ионы. Из-за кардинального различия в механизмах взаимодействия мономерных ионов и кластерных ионов важно свети к минимуму возможность столкновений кластерных ионов с молекулами остаточных газов. Из формулы (1) видно, что средняя длина свободного пробега кластера обратно пропорциональна величине давления остаточного газа в камере. Длина рабочей камеры составляет 1 м, если сопоставить данные таблицы с распределением размеров кластеров на рисунке 5, можно сделать вывод, что оптимальное давление для наиболее вероятных размеров кластерных ионов должно быть на уровне  $10^{-6}$  Торр. При таком уровне вакуума практически все кластеры, размером меньше 1000 атомов в своем составе, достигают мишени, не испытывая столкновений с молекулами остаточного газа в камере.

Таким образом, выбором давления рабочего газа можно контролировать в пуске разброс кластеров по массам, что является немаловажным фактором в процессах формирования рельефа, дефектообразования и распыления атомов поверхности при обработке ускоренными кластерными ионами.

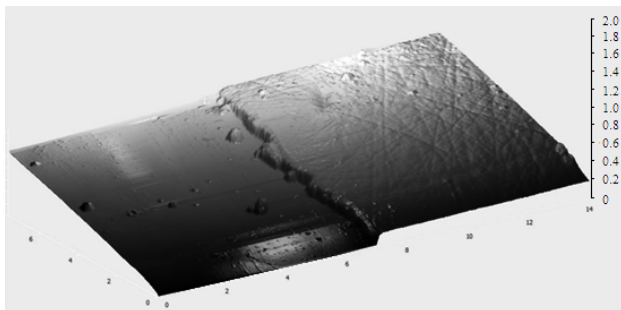
На рисунке 6 представлены изображения поверхности германия до и после облучения кластерными ионами аргона, полученные с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) в полуконтактном режиме. Левая область соответствует облученной поверхности, правая область – исходная поверхность под защитной маской. Как видно из рисунка, исходная поверхность имеет более выраженную шероховатость, в большом количестве присутствуют протяженные царапины глубиной до 15 нм. Среднее квадратичное значение отклонения глубин и высот от средней линии (Root mean square, RMS) составляет порядка 11 нм для области размером  $5 \times 5$  мкм. На облученной поверхности в значительно меньшей степени присутствуют царапины, глубина кото-

рых не превышает 5 нм. RMS поверхности в области размером  $5 \times 5$  мкм составляет около 1,5 нм.



**Рисунок 5 – Времяпролетные спектры распределения количества кластеров по их размерам при различных давлениях рабочего газа**

Можно утверждать, что в результате облучения кластерными ионами аргона с энергией 10 кэВ поверхность эффективно сгладилась, исчезли сильно выступающие элементы рельефа, а шероховатость снизилась в два раза. Анализ профилей поверхности показал, что при данной ионной дозе облучения величина удаленного слоя составила около 150 нм.



**Рисунок 6 – АСМ изображение поверхности германия до и после облучения кластерными ионами  $Ar_n^+$  с энергией 10 кэВ. Единицы измерения шкал – мкм**

Стоит отметить, что тип газа, из которого образуются кластерные ионы, влияет на величину удаленного слоя и глубину нарушенного слоя при одинаковых энергиях пучка. Так, например, в экспериментах по облучению поверхности SiC кластерными ионами  $Ag^+$  и  $Xe^+$  было показано, что кластерные ионы Xe намного эффективнее сглаживают рельеф поверхности при ионной дозе в 3 раза меньшей, чем в случае кластерных ионов Ag. Это позволяет считать, что использование Xe в качестве рабочего газа для формирования кластерных ионов позволяет более эффективно сглаживать поверхности твердых тел, при меньших ионных дозах.

Необходимо отметить, что в настоящее время нами ведутся работы по созданию нового ускорителя газовых кластерных ионов. Основным недостатком существующей установки является использование режима из-за недостаточной производительности системы откачки камеры формирования кластеров. В новом ускорителе будут использованы более мощные системы откачки, что позволит подавать рабочий газ в сопло непрерывно. В результате, время обработки поверхности будет сокращено в несколько раз по сравнению с описанным вариантом ускорителя.

### Заключение

В статье рассмотрены основные узлы ускорителя газовых кластерных ионов и принцип его работы. Описаны методики анализа параметров пучка. Измерены количественные зависимости ионного тока от давления остаточного газа в рабочей камере. Спад начинается при плотности проходимого кластерами газового слоя в  $2,42 \times 10^{15}$  атомов/см<sup>2</sup>, что соответствует давлению  $10^{-4}$  Торр. При увеличении плотности газового слоя величина тока резко и нелинейно уменьшается практически до 0 по достижении величины давления остаточных газов  $10^{-3}$  Торр. Анализ данных зависимостей позволяет подобрать оптимальный режим давления. Так же описано распределение кластерных ионов в пучке по их размерам. Показано, что наиболее вероятные размеры кластерных ионов зависят от давления рабочего газа и наиболее вероятные размеры кластеров соответствуют значениям 1300-1350 атомов, которые реализуются при давлении 6 атмосфер. Учет и контроль данных параметров кластерного пучка позволяют облегчить интерпретацию экспериментальных данных при облучении кластерными ионами поверхности твердых тел.

Приведены количественные результаты сглаживания поверхности поликристаллического германия после облучения газовыми кластерными ионами  $Ag^+$  с энергией 10 кэВ. Показано, что шероховатость (RMS) поверхности уменьшилась в два раза со значения 11 нм до 1-2 нм, причем видно, что количество царапин значительно уменьшилось. Таким образом, можно утверждать, что технология газовых кластерных пучков, реализованная на данном ускорителе, может служить эффективным сверхточным инструментом для сглаживания рельефа поверхности твердых тел на нанометровом масштабе.

### Библиографический список

1. Yamada I. Historical milestones and future prospects of cluster ion beam technology. Applied Surface Science. 2014. Vol. 310, pp. 77-88.

2. **Kyoung Y. K., Lee H. I., Chung J. G. et al.** Damage profiles of Si (001) surface via Ar cluster beam sputtering. *Surface and Interface Analysis*. 2013. Vol. 45, pp. 150-153.

3. **Ieshkin A. E., Kireev D. S., Ermakov Yu. A. et al.** The quantitative analysis of silicon carbide surface smoothing by Ar and Xe cluster ions. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 2018. Vol. 421, pp. 27-31.

4. **Бернш Р. и др.** Распыление твердых тел ионной бомбардировкой: пер. с англ. М.: Мир. 1986. 488 с.

5. **Toyoda N., Matsuo J., Yamada I.** The sputtering effects of cluster ion beams. *AIP Conference Proceedings*. 1997. Vol. 392. 483 p.

6. **Toyoda N., Kitani H., Hagiwara N. et al.** Angular distributions of the particles sputtered with Ar cluster ions. *Mater ChemPhys*. 1998. Vol. 54, pp. 262-265.

7. **Toyoda N., Hagiwara N., Matsuo J., Yamada I.** Surface smoothing mechanism of gas cluster ion beams. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 2000. Vol. 161-163, pp. 980-985.

8. **Chen H., Liu S.W., Wang X.M. et al.** Smoothing of ZnO films by gas cluster ion beam. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 2005. Vol. 241, pp. 630-635.

9. **Bourelle E., Suzuki A., Sato A. et al.** Sidewall polishing with a gas cluster ion beam for photonic device applications. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 2005. Vol. 241, pp. 622-625.

10. **Yamada I., Matsuo J., Toyoda N. et al.** Progress and applications of cluster ion beam technology. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. 2015. Vol. 19, pp. 12-18.

11. **Andreev A. A., Chernysh V. S., Ermakov Yu. A., Ieshkin A. E.** Design and investigation of gas cluster ion accelerator. *Vacuum*. 2013. Vol. 91, no. 0. pp. 47-53.

12. **Андреев А. А., Ермаков Ю. А., Патракев А. С., Черныш В. С.** Применение кластерных ионов в нанотехнологии // *Нанотехнологии: разработка, применение*. 2009. Т. 1. № 1. С. 23-38.

13. **Иешкин А. Е., Ермаков Ю. А., Черныш В. С.** Формирование кластерных ионов различных газов в режиме импульсной подачи газа // *Письма в ЖТФ*. 2015. Т. 41. № 22. С. 8-14.

14. **Toyoda N., Maeshima Y., Yamada I.** Cluster size dependence on energy and velocity distributions of gas cluster ions after collisions with residual gas. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 2007. Vol. 257, pp. 662-665.

15. **Kirkpatrick A., Kirkpatrick S., Walsh M. et al.** Investigation of accelerated neutral atom beams created from gas cluster ion beams. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 2013. Vol. 307, pp. 281-289.

16. **Seki T., Matsuo J., Takaoka G. H., Yamada I.** Generation of the large current cluster ion beam. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 2003. Vol. 206, pp. 902-906.

17. **Hagena O. F.** Cluster ion sources. *Revol. Sci. Instr.* 1992. Vol. 63, 2374 p.

UDC 539.198

## CLUSTER ION ACCELERATOR AND ITS APPLICATION FOR HIGH-PRECISION SURFACE POLISHING

**D. S. Kireev**, post-graduate student, Physical Faculty, Lomonosov Moscow State University, Moscow; dmtr.kireeff6497@yandex.ru

**A. V. Danilov**, master student, Physical Faculty, Lomonosov Moscow State University, Moscow; av.danilov@physics.msu.ru

**A. E. Ieshkin**, Ph.D. (Phys. And Math.), senior researcher, Physical Faculty, Lomonosov Moscow State University, Moscow; ieshkin@physics.msu.ru

**V. S. Chernysh**, Dr. Sc. (Phys. And Math.), full professor, Head of the Department, Physical Faculty, Lomonosov Moscow State University, Moscow; chernysh@phys.msu

*This article gives detailed information about design and basic operation principles of cluster ion accelerator of the Lomonosov Moscow State University, which basic principle of cluster ions formation is the adiabatic expansion of the working gas through a supersonic nozzle. **The aim of the work** was to study the operating characteristics of the accelerator and the possibility of its use for high-precision polishing of the surface of a solid body on the example of germanium. It has been shown that cluster acceleration of argon ions with average sizes near a thousand atoms per cluster is possible at the existing accelerator. The ion beam current is several microamperes. The effect of background gas in a vacuum chamber on the transport of a beam to a target is investigated. The quantitative data on the roughness of the surface of germanium and silicon carbide after abrasive polishing and after irradiation with  $Ar_n^+$  ions with the energy of 10 keV are presented.*



**Key words:** *ion beams, cluster ions, cluster ion accelerator, ion beam transport, sputtering, nanorelief, surface planarization, atomic-force microscopy.*

**DOI:** 10.21667/1995-4565-2018-66-4-2-40-48

### References

1. **Yamada I.** Historical milestones and future prospects of cluster ion beam technology. *Applied Surface Science*. 2014. Vol. 310, pp. 77-88.
2. **Kyoung Y. K., Lee H. I., Chung J. G. et al.** Damage profiles of Si (001) surface via Ar cluster beam sputtering. *Surface and Interface Analysis*. 2013. Vol. 45, pp. 150-153.
3. **Ieshkin A. E., Kireev D. S., Ermakov Yu. A. et al.** The quantitative analysis of silicon carbide surface smoothing by Ar and Xe cluster ions. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 2018. Vol. 421, pp. 27-31.
4. **Berish R. (ed.)** Raspylenie tverdyh tel ionnoj bombardirovkoj: per. s angl. M.: Mir. 1986. 488 p. (in Russian).
5. **Toyoda N., Matsuo J., Yamada I.** The sputtering effects of cluster ion beams. *AIP Conference Proceedings*. 1997. Vol. 392. 483 p.
6. **Toyoda N., Kitani H., Hagiwara N. et al.** Angular distributions of the particles sputtered with Ar cluster ions. *Mater ChemPhys*. 1998. Vol. 54, pp. 262-265.
7. **Toyoda N., Hagiwara N., Matsuo J., Yamada I.** Surface smoothing mechanism of gas cluster ion beams. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 2000. Vol. 161-163, pp. 980-985.
8. **Chen H., Liu S.W., Wang X.M. et al.** Smoothing of ZnO films by gas cluster ion beam. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 2005. Vol. 241, pp. 630-635.
9. **Bourelle E., Suzuki A., Sato A. et al.** Sidewall polishing with a gas cluster ion beam for photonic device applications. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 2005. Vol. 241, pp. 622-625.
10. **Yamada I., Matsuo J., Toyoda N. et al.** Progress and applications of cluster ion beam technology. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. 2015. Vol. 19, pp. 12-18.
11. **Andreev A. A., Chernysh V. S., Ermakov Yu. A., Ieshkin A. E.** Design and investigation of gas cluster ion accelerator. *Vacuum*. 2013. Vol. 91, no. 0. pp. 47-53.
12. **Andreev A. A., Ermakov Yu. A., Patrakev A. S., Chernysh V. S.** Primenenie klasternykh ionov v nanotehnologii. *Nanotehnologii: razrabotka, primeneniye*. 2009. Vol. 1, no. 1, pp. 23-38. (in Russian).
13. **Ieshkin A. E., Ermakov Yu. A., Chernysh V. S.** Formirovaniye klasternykh ionov razlichnykh gazov v rezhime impul'snoy podachi gaza. *Pis'ma v ZHTF*. 2015. Vol. 41, no. 22, pp. 8-14. (in Russian).
14. **Toyoda N., Maeshima Y., Yamada I.** Cluster size dependence on energy and velocity distributions of gas cluster ions after collisions with residual gas. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 2007. Vol. 257, pp. 662-665.
15. **Kirkpatrick A., Kirkpatrick S., Walsh M. et al.** Investigation of accelerated neutral atom beams created from gas cluster ion beams. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 2013. Vol. 307, pp. 281-289.
16. **Seki T., Matsuo J., Takaoka G. H., Yamada I.** Generation of the large current cluster ion beam. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 2003. Vol. 206, pp. 902-906.
17. **Hagena O. F.** Cluster ion sources. *Revol. Sci. Instr.* 1992. Vol. 63, 2374 p.