

УДК 539.1, 621.3

**АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ КЛАСТЕРНЫХ ИОНОВ ДЛЯ
УМЕНЬШЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ**

Мьо Чжо Хлаинг

*Аспирант 1 года**кафедра «Электронные технологии в машиностроении»**Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана**Научный руководитель: Л.Л. Колесник,**кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные технологии в машиностроении»***Общие сведения об ионных кластерах**

Кластером называют систему связанных между собой атомов или молекул какого-либо вещества. Такое образование представляет собой промежуточную фазу между молекулярным состоянием вещества и его конденсированным состоянием.

В 1988 г. в экспериментальной лаборатории ионно-пучковых технологий университета г. Киото под руководством профессора И. Ямады был создан ускоритель пучков газовых кластерных ионов. Результаты экспериментальных исследований, полученных в этой лаборатории, продемонстрировали широкие возможности применения кластерных ионов в таких промышленных технологиях, как ионно-ассистированное осаждение тонких пленок, очистка и полировка поверхности, имплантация ионов на малые глубины [1].

Кластеры показывают физические и химические свойства, отличные от свойств материала в конденсированном состоянии, что позволяет искать новые технологические возможности для применения известных материалов.

Число молекул, находящихся в связанном состоянии, при котором можно говорить о кластере, лежит в диапазоне от 10 до 10000. При количестве молекул меньше четырех обычно говорят о мономере, димере и тримере. При количестве молекул более 10000 происходит переход к микроскопической области и уже можно говорить об объемных объектах и конденсированном состоянии вещества.

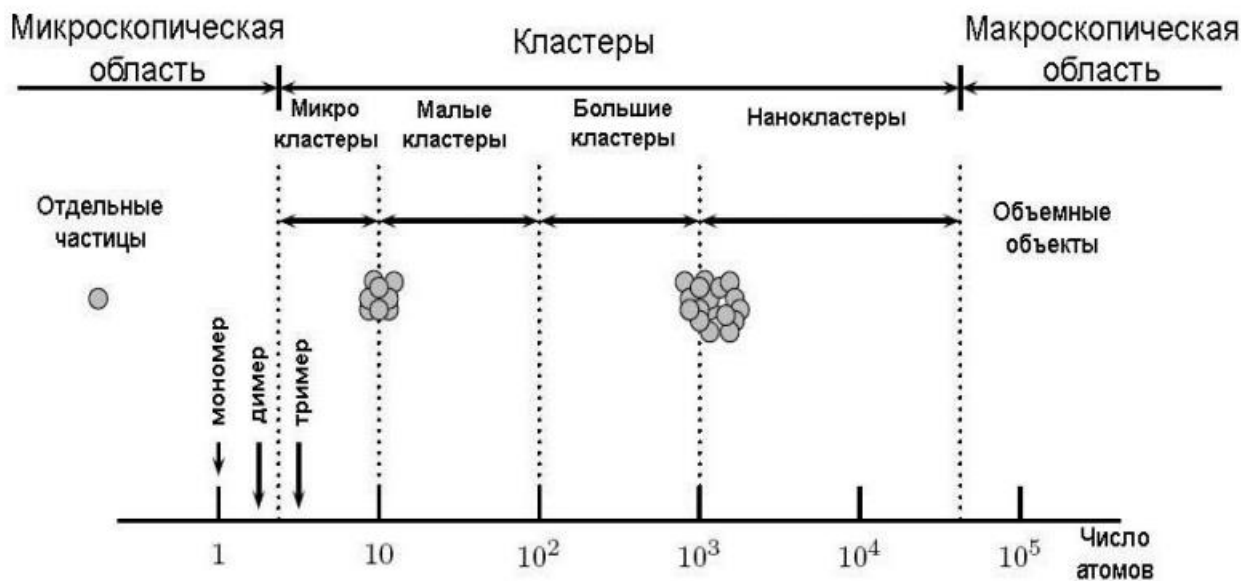


Рисунок 1 – Место кластеров в мире микро и нанобъектов [2]

Если в кластере объединяются заряженные частицы, то говорят о существовании кластерных ионов. Кластерным ионом также может называться скопление нейтральных атомов, которое имеет заряд как система в целом.

С изменением размера кластера меняются его физические свойства. Малые кластеры с количеством атомов менее 100 меняют свои свойства в зависимости от структуры молекул, из которых они состоят. Кроме того, на их свойства при взаимодействии с макрообъектами существенное влияние оказывает состояние поверхности взаимодействия. С увеличением количества молекул в кластере их свойства стабилизируются и, как правило, являются линейными функциями. По мере дальнейшего роста количества молекул и атомов в кластере их свойства приближаются к свойствам вещества в конденсированном состоянии. Исходя из этого при исследовании свойств кластеров очень важно четко понимать физическую и химическую структуру молекул, их составляющих, размер кластера, наличие или отсутствие заряда кластера как единого объекта.

Способы получения ионных кластеров

Получить кластеры, которые в дальнейшем будут сформированы в пучок, можно несколькими различными приемами. Для этого необходимо либо разрушить большие скопления атомов, либо соединить малые объекты (атомы, молекулы, небольшие кластеры).

Один из способов – это получение готовых кластеров из твердого тела или жидкости при эрозии поверхности, когда некое воздействие приводит к распылению, в результате чего образуются различные осколки, включая и заряженные кластеры. В качестве такого воздействия можно использовать интенсивное лазерное излучение, электродуговой разряд, магнетронный разряд, ионный или электронный пучок. Полученные кластеры состоят из небольшого числа атомов. Они могут быть сформированы в пучки, разделены по массам и энергиям и ускорены. Однако интенсивность таких пучков достаточно низкая, в связи с чем их использование ограничивается исследовательскими целями.

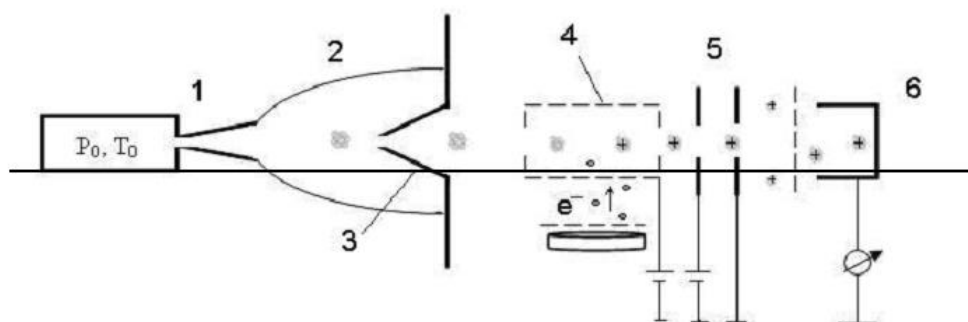
Другой возможностью получения кластеров является их образование и дальнейший рост при использовании процессов, связанных с конденсацией газа или пара. Для этого обычно используется охлаждение атомарного пара при его сверхзвуковом расширении или охлаждение в буферном газе.

Расширение газа, истекающего из сопла, приводит к его адиабатическому охлаждению. При этом параметры газа оказываются за кривой фазового равновесия, и появляется возможность возникновения его конденсации. После расширения газа из сопла его плотность резко падает, а значит, ограничено и время, в течение которого происходят процессы нуклеации газа. В связи с этим при использовании данного метода необходима реализация условий, связанных с давлением газа и параметрами его расширения [3].

Метод охлаждения в буферном газе можно применить фактически к любым атомам, молекулам и их кластерам независимо от состава или совмещать со сверхзвуковым расширением получая высокоэффективное охлаждение [4]. При этом охлаждаемые частицы будут совершать множественные столкновения с низкоэнергетическими атомами буферного газа, например гелия. Следует заметить, что такой метод охлаждения является высокоэффективным, так как происходит воздействие на весь диапазон распределения Максвелла-Больцмана и обеспечивается охлаждение поступательных и вращательных степеней свободы. Возможности этого метода позволяют получать охлажденные молекулы в больших количествах. Главным неудобством является возрастание технической сложности охлаждающего устройства при уменьшении его температуры.

Таким образом, принцип действия кластерных источников основан или на разрушении (распылении) вещества, или на скоплении (конденсации), а иногда на обоих методах, что позволяет конструировать различные типы таких источников, которые дают возможность получать широкий спектр кластеров с различными размерами и свойствами.

В работе [10] представлены экспериментальные результаты формирования ионно-кластерных пучков из сверхзвуковых струй Ag. Работа выполнена на газодинамическом комплексе ЛЭМПУС-1 Новосибирского государственного университета. Принципиальная схема экспериментов приведена на рисунке 2.



1 – Сверхзвуковое сопло, 2 – Газовая струя, 3 – Скиммер, 4 – Ионизатор, 5 – Ионная оптика, 6 – Коллектор.

Рисунок 2 – Принципиальная схема источника кластерных ионов [10]

Для целей создания интенсивного ионно-кластерного пучка необходимы кластеры большого размера. Известно, что при одинаковых параметрах торможения (давление торможения P_0 , температура торможения T_0) сверхзвуковые сопла позволяют формировать кластеры большего размера по сравнению со звуковыми соплами. Поэтому эксперименты были проведены со сверхзвуковым коническим соплом (1), имеющим диаметр критического сечения $d=0,19$ мм и полуугол раствора $\alpha=6^\circ$. Молекулярный пучок формировался с помощью скиммера (3) с диаметром входного отверстия $d_s=1$ мм. Ионизация кластеров осуществлялась электронным ударом в ионизаторе (4). Источником электронов являлась таблетка гексаборид лантана. Ионизованные частицы из пучка вытягивались из ионизатора и ускорялись до нужной энергии с помощью ионной оптики (5). Характеристики ионно-кластерного потока измерялись с помощью коллектора ионов (6) методом задерживающего потенциала.

В работе [7] установлено, что для модификации поверхности необходимы интенсивные потоки кластеров размером до 10^3 с энергией до 30-40 кэВ и дозами облучения до 10^{15} - 10^{17} ионов/см². Однако кинетическая энергия, набираемая кластером при свободном сверхзвуковом истечении, определяется начальной энтальпией покоящегося газа и, как правило, не превышает 0,1 эВ на одну частицу кластера (атом или молекулу), что недостаточно для обработки поверхности. Для ускорения необходимо ионизовать кластеры, а затем ускорить до нужной энергии в электрическом поле. Известно, что пороговая энергия ионизации (~ 10 -20 эВ) заметно превышает энергию связи частиц в газовом кластере (от 0,1 до 5 эВ). Очевидно, при ионизации кластеров возможен их развал (фрагментация), что может приводить к уменьшению интенсивности ионно-кластерного пучка.

Наиболее перспективным способом достижения таких параметров является формирование молекулярного пучка из сверхзвуковой газовой струи с последующей его ионизацией и ускорением. Подбирая геометрию сопла и варьируя исходные параметры газа (давление и температуру торможения), можно сформировать сверхзвуковой пучок кластеров требуемых размеров. Таким образом, получение нейтрального кластерного пучка высокой интенсивности является необходимым условием для последующего формирования ускоренного ионно-кластерного потока.

Применение ионных кластеров для модификации поверхности

За последние годы предпринимались многочисленные попытки использовать особенности взаимодействия газовых кластерных ионов с твердым телом для решения актуальных научных и практических задач.

Рассмотрим анализ основных результатов в применении кластерных ионов для снижения шероховатости поверхности.

Увеличение дозы облучения при обработке материалов кластерными ионами приводит к сглаживанию рельефа. Этот эффект отчетливо наблюдался при бомбардировке поверхности меди ионами мономеров Ag и кластерными ионами $Ag_{(2000)}$ с энергиями 20 кэВ, падающими вдоль нормали к поверхности [5].

Изображения необлученной и облученной поверхности Cu, полученные в атомносиловом микроскопе (АСМ), представлены на рис. 3. Из рисунка видно, что в случае облучения кластерными ионами достигается значительно меньшая шероховатость поверхности. Эксперименты показали, что средняя шероховатость стабилизируется на уровне 1,3 нм при достижении дозы облучения кластерами $5 \cdot 10^{15}$ ион/см².

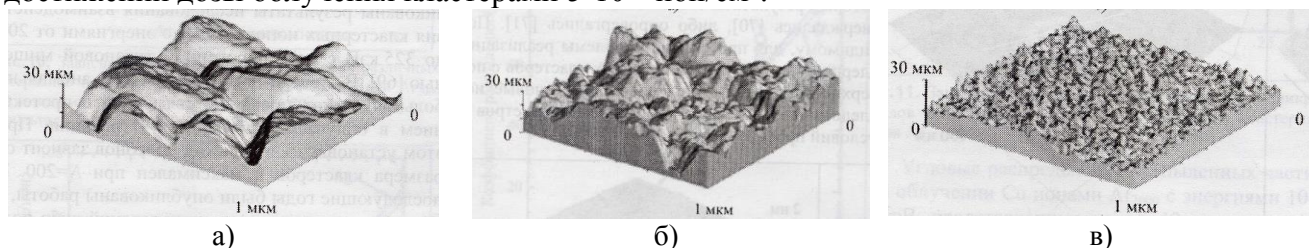


Рисунок 3 – Изображение поверхности меди а) – исходное, б) – после обработки мономерами Ag с энергией 20 кэВ, в) – ионными кластерами $Ag_{(2000)}$ с энергией 20 кэВ [5, 6]

Многочисленные исследования продемонстрировали, что с помощью пучков газовых кластерных ионов можно улучшить качество рельефа поверхности практически всех материалов. Уменьшение средней шероховатости поверхности FeNi-пленок, которые применяются для покрытия магнитных головок в жестких дисках, от 10,2 до 2,3 Ангстрем наблюдалась при облучении кластерными ионами Ag. А в работе (63) продемонстрировано, что после облучения поверхности алмазных пленок ионами Ag_{2000} с энергией 20 кэВ и дозе 10_{17} ион/см² средняя шероховатость пленок уменьшается от 40 до 10 нм. В этих экспериментах продемонстрировано, что сглаживание рельефа наблюдается лишь при нормальном падении пучка кластерных ионов.

Все работы показывают что, несмотря на высокий коэффициент распыления, при сглаживании рельефа с поверхности материала удаляется небольшой слой.

Наиболее популярной теорией, описывающей формирование рельефа под действием облучения ионов мономеров, в настоящее время является теория Харпера-Брэдли и её модификации. Согласно этой теории рельеф поверхности формируется в результате конкурирующего действия двух механизмов. Локальная зависимость коэффициента распыления Y от угла падения ионов стремится развить неровности поверхности, а поверхностная миграция атомов сгладить рельеф. Взаимодействие этих двух процессов и определяет результат ионной обработки.

Сглаживание рельефа, наблюдающееся при облучении поверхности кластерными ионами, также можно объяснить с точки зрения теории Харпера-Брэдли. Очевидно, что подвижность атомов в зоне падения кластерного иона значительно выше, чем при падении иона мономера. С другой стороны, установлено, что в отличие от случая бомбардировки мономерами коэффициент распыления при облучении кластерными ионами убывает с ростом угла падения пучка: $Y(\alpha) \sim \cos\alpha$ [7]. В силу этого ослабевает роль распыления в развитии рельефа. По-видимому, такое соотношение двух конкурирующих факторов и приводит к сглаживанию рельефа.

Поскольку кремний по-прежнему является основным материалом электронной техники, в рассматриваемых работах проблеме обработки кремниевых пластин уделялось значительное внимание. Облучение кластерными ионами применялось для создания фотонных структур на основе кремниевых пластин и для сглаживания рельефа. С использованием химически активных кластерных ионов $(\text{SF}_6)_N$, ускоренных до энергии 30 кэВ, была получена средняя шероховатость $\sim 0,1$ нм [8]. А в работе [9] пластины кремния (100) облучались кластерными ионами этанола с энергией 9 кэВ. Для бомбардировки пластин использовались кластеры с размером более 95 молекул. Также как и для других кластерных ионов наблюдалось сглаживание рельефа, причем средняя шероховатость составляла менее 1 нм.

Основные выводы

Проведенный анализ литературных источников показывает большой интерес к вопросам получения и применения ионных кластеров для применения не только в научных, но и практических целях. Ионные кластеры находят применение в электронной промышленности для сглаживания рельефа, имплантации, напыления тонких пленок.

Причем использование кластерных ионов в сравнении с классическими ионными пучками из мономеров приводит к снижению количества дефектов обрабатываемой поверхности при сохранении основных технологических результатов.

Весь рассмотренный материал говорит о перспективности исследований и разработки технологии снижения шероховатости поверхностей при изготовлении изделий электронной техники с использованием ионных кластеров.

Литература

1. *Yamada I.* A short review of ionized beam technology. – Nucl. Instr. and Meth. In Phys. Res. B, 1995, vol. 99, p. 55
2. *Карпенко А.Ю., Батуринов В.А.* Источники кластерного пучка. Часть 1. Методы получения кластерных пучков // Журнал Нано- и электронной физики. Сумской государственный университет – Том 4 № 3, 2012 г.
3. *В.С. Авдеевский, Э.А. Ашаратов, А.В. Иванов, У.Г. Пирумов* Сверхзвуковые неизобарические струи газа – М., Машиностроение: 1985
4. *R. deCarvalho, J.M. Doyle, B. Friedrich, T. Guillet, J. Kim, D. Patterson, J.D. Weinstein* Eur. Phys. J. D7. 289 (1999)
5. *Yamada I., Matsuo J., Toyoda N., Kirpatrick A.* Material processing by gas cluster ion beam. – Mater. Sci. and Engineer., 2001, vol. R 34, p. 231.
6. *Андреев А.А., Ермаков Ю.А., Патракеев А.С., Черныш В.С.* Применение кластерных ионов в нанотехнологии // Нанотехнологии: разработка и применение, № 1, т. 1, 2009 г., с. 23-38
7. *Kitani H., Toyoda N., Matsuo J., Yamada I.* Incident angle dependence of the sputtering effect of Ar-cluster-ion bombardment. – Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B. 1997, vol. 121, p. 489.
8. *Yamada I., Toyoda N.* Recent advances in R&D of gas cluster ion beam processing and equipment. – Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B., 2005, vol. 241, p. 589.
9. *Takaoka G.H., Noguchi H., Kawashita M.* Interactions of ethanol clusters ion beams with silicon surfaces. – Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B, 2006, vol. 242, p. 417.
10. *Коробейщиков Н.Г., Зарвин А.Е., Каляда В.В., Шмаков В.В.* Формирование ускоренных ионно-кластерных пучков аргона для модификации поверхности // Вакуумная наука и техника: Материалы XIX научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов, 2012 г. с. 166-169.