

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Назарова Антона Викторовича
«Угловые распределения материала, распыленного с поверхности металлов
газовыми кластерными ионами»,
представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических
наук по специальности 1.3.5 – физическая электроника

Актуальность выбранной темы

Диссертационная работа А.В. Назарова посвящена исследованию распыления поверхности металлов газоструйными (газодинамическими) ионно-кластерными пучками. Такие пучки имеют существенные отличия по сравнению с традиционными ионными пучками. Возможность независимо регулировать размеры газовых кластеров и полную кинетическую энергию кластерных ионов позволяет в широком диапазоне, от долей единиц до сотен электрон-вольт, управлять удельной энергией, приходящейся на один атом в кластере. Это дает определенные преимущества для прецизионной обработки и высокоразрешающего анализа поверхности различных материалов.

Столкновение газовых кластерных ионов с твердой поверхностью материала является сложным быстротекущим процессом, который носит ярко выраженный коллективный характер, основанный на взаимодействии от нескольких десятков до нескольких тысяч атомов падающего кластера и мишени. Распыление атомов мишени является одним из определяющих механизмов взаимодействия кластеров с мишенью. До сих пор отсутствует понимание многих наблюдаемых физических явлений при столкновении газового кластера с мишенью. В частности, не выяснено влияния параметров кластерного пучка (полная кинетическая энергия, средний размер кластеров), сорта составляющих кластер газа и атомов мишени на характеристики распыления. Таким образом, несомненна высокая актуальность выбранной диссертантом темы и сформулированной задачи исследования.

Новизна полученных результатов и выводов

В результате выполнения работы диссертантом получены следующие новые научные результаты:

- Экспериментально измерены угловые распределения атомов мишени, выбитых кластерами аргона и ксенона различного размера;
- Описаны механизмы формирования угловых распределений распылённых атомов, отличных от латеральных, традиционных для кластеров;
- Исследовано влияние удельной энергии кластеров E/n , нанорельефа бомбардируемой поверхности, сорта атомов кластера и мишени на угловые распределения распылённых атомов, степень проникновения атомов кластера в мишень, долю исходной энергии кластеров, переданную мишени.
- Показана возможность применения модели тепловых пиков для описания распределения распылённых атомов по энергии.

Обоснованность и достоверность представленных результатов

Достоверность представленных в диссертации результатов и выводов обеспечена использованием известных экспериментальных методов (в частности, коллекторная

методика измерения угловых распределений распылённых атомов), контролем экспериментальных параметров, использованием при численном моделировании апробированных подходов, сравнением полученных результатов с литературными данными других авторов.

Оценка содержания диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных сокращений и списка цитируемой литературы из 150 источников.

Во **введении** кратко описана актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, используемая методология. Представлены основные положения, выносимые на защиту, достоверность результатов, подчеркнут личный вклад диссертанта, приведен перечень конференций, на которых представлялись результаты работы, общее число журнальных публикаций.

В **Главе 1** на основе лаконичного обзора литературы приведено описание принципов формирования ионно-кластерных пучков, процесса взаимодействия кластерных ионов с поверхностью твердых тел. Основной упор автор обоснованно сделал на описание нерешенных проблем процесса распыления поверхности мишени, отмечая при этом имеющиеся разногласия в интерпретации и описании опубликованных результатов.

Глава 2 посвящена подробному описанию использованных автором в ходе работы экспериментальных диагностических методик: коллекторной методике измерения угловых распределений рассеянных атомов мишени, времяпролетной диагностике массового состава ионно-кластерного пучка, методике анализа распределения толщины осажденного на коллектор материала. Отдельный раздел посвящен описанию использованных автором методик численного МД моделирования, использованных потенциалов взаимодействия между атомами кластера и мишени.

В **Главе 3** описаны результаты по угловым распределениям поверхности меди, молибдена и вольфрама кластерными ионами различных газов: аргона, криптона и ксенона. Приведены как экспериментальные результаты, так и результаты численного моделирования. Достоверно показано, что угловое распределение распыленных атомов мишени может отличаться от известного латерального распыления, наблюдаемого при нормальном падении кластеров на мишень. Отмечено, что число атомов мишени, распыленных на малые углы выхода, заметно возрастает при переходе от аргона к криптону и ксенону и в случае, если масса атомов мишени превышает массу составляющих кластер атомов. К сожалению, все результаты получены при фиксированных параметрах: фиксированной энергии и среднем размере кластерных ионов. При этом средние размеры кластерных ионов разных газов заметно отличаются. Например, средний размер ксенона почти в 1,4 раза больше, чем у аргона, что вероятно сказывается на корректности сравнения результатов разных газов.

При МД моделировании размер кластеров варьировался в достаточно широких пределах от 24 до 1000 атомов на кластер, полная энергия в большинстве режимов, как и в эксперименте, равнялась 10 кэВ. Таким образом, результаты моделирования логично дополняют ограниченные по режиму экспериментальные результаты. В частности показано, что при увеличении удельной энергии E/n с 40 до 833 эВ/атом угловое распределение распыленных атомов мишени смещается от латерального к нормальному, близкому к косинусоидальному. Указанные особенности получены для кластеров всех использованных газов и материалов мишени. Отдельное внимание автор уделяет анализу

влияния рельефа поверхности на угловые распределения распыленных атомов мишени. К сожалению, автор не произвел прямое сравнение результатов угловых распределений, полученных экспериментально и в результате численного моделирования.

В **Главе 4** диссертант анализирует полученные результаты МД моделирования для выявления влияния вида газовых атомов, составляющих кластер, и материала мишени на процесс столкновения кластеров аргона, криптона и ксенона с поверхностью мишени. Размер кластеров n изменялся от 50 до 5000 атомов/кластер, кинетическая энергия E была постоянной 20 кэВ. В частности показано, что при столкновении с твердой поверхностью более легкие кластеры ожидаемо рассеиваются быстрее, при этом передают мишени меньшую долю своей исходной энергии. Это объяснено различием в динамике рассеяния атомов кластера (рассеяние на большие углы легких атомов аргона) и глубиной проникновения атомов кластера в мишень. С увеличением массы газовых атомов увеличивается глубина и доля газовых атомов, достигших поверхности мишени. Отмечено, что этот эффект нивелируется при больших ($E/n > 400$ эВ/атом) и малых ($E/n \sim 4$ эВ/атом) удельных энергиях кластеров. Анализируя распределения по модулю скорости рассеянных атомов кластера, автор показывает, что кластера аргона термализованы в большей степени, чем атомы кластера ксенона, логично объясняя это большим числом столкновений.

Глава 5 посвящена анализу данных по энергетическому распылению распыленных атомов мишени. Использовались экспериментальные данные и данные компьютерного МД моделирования. Доказано, что энергетические распределения атомов мишени, распыленных газовыми кластерными ионами в диапазоне E/n от 10 до 100 эВ/атом, могут быть описаны уравнением теории тепловых пиков Зигмунда-Клауссена. Температура поверхности мишени в области кластерного удара линейно растет с увеличением энергии на один атом кластера в диапазоне от 10 до 100 эВ/атом. Энергетические распределения положительных вторичных ионов меди при кластерной бомбардировке смещены в область более низких энергий ($E_{\text{макс}} \sim 1.5-1.7$ эВ) по сравнению с распылением атомарными ионами ($E_{\text{макс}} \sim 7.5$ эВ), что еще раз подтверждает различие механизмов распыления в эти двух процессах. Сравнение результатов эксперимента и моделирования показало удовлетворительное согласие.

Достоинствами работы являются подробный анализ полученных результатов, использование как оригинальных экспериментальных результатов, так и собственных данных, полученных методом численного МД моделирования. Представленные в диссертации результаты интересны как для понимания фундаментальных физических процессов, протекающих при взаимодействии ионно-газовых потоков с поверхностью мишени, так и для практических приложений, в частности, для развития технологических приложений и аналитических методик диагностики поверхности.

Содержание автореферата соответствует основным положениям и выводам диссертации.

Замечания и недостатки

1. При анализе литературы автор справедливо указывает, что при ионизации нейтральных газовых кластеров возможна многократная ионизация и появление в потоке многозарядных кластеров. В результате чего средний заряд ионно-кластерного пучка может составлять несколько единиц. Соответственно, при ускорении кластерные ионы, несущие разный заряд, могут приобретать значительный разброс по энергиям. Однако,

при описании экспериментальных условий, использованных в своей работе, автор пишет, что «этой погрешностью в данной работе мы пренебрегаем», далее считая, что использованные в работе кластерные ионы имеют однократный заряд. Желательно обосновать такое решение, иначе погрешность результатов может быть весьма значительной.

2. При описании условий, использованных при МД моделировании, автор не указывает диаметры кластеров одного и того же размера n , составленных из атомов разных газов. Вместе с тем, из литературы известно, что, например, Ван-дер-ваальсовый радиус ксенона на 15% больше, чем у аргона. Очевидно при одинаковом размере n диаметр газового кластера заметно увеличивается при переходе от аргона к криптону и ксенону. Соответственно увеличивается площадь удара и уменьшается плотность выделения энергии. Судя по кадрам соударений, приведенных на рисунке 4.2, в работе при фиксированных n использовались кластеры разных газов с одинаковым диаметром. Этот факт необходимо учитывать при анализе полученных результатов.

3. При анализе полученных результатов автор часто делает обобщающие заключения, используя удельную энергию кластеров E/n . Однако, большинство представленных в диссертации результатов получены при фиксированной энергии кластеров путем варьирования только их размера n . На мой взгляд, следовало отметить, что некоторые заключения требуют дополнительно проверки.

4. В качестве редакционных замечаний следует указать следующие неточности:

– На стр. 11 автор пишет: «Впервые кластеризация газа таким образом была продемонстрирована в работах [18–20]». Общепринято, что основы газоструйных кластерных пучков были впервые предложены и реализованы в более ранних статьях других авторов: Kantrowitz A., Grey J. A high intensity source for the molecular beams. Part I. Theoretical // Rev. Sci. Instrum. 1951. V.22. P. 328-333. Kistiakowsky G.B., Slichter W.P. A high intensity source for the molecular beams. Part II. Experimental // Rev. Sci. Instrum. 1951. V.22. P. 333-337.

– На стр. 12: «Центральный скачок уплотнения, ограничивающий поток по оси, называется диском Маха, который формируется ударной волной». Диск Маха сам является плоской ударной волной и не может формироваться таковой.

– На стр. 14: «Основными параметрами, определяющими кластеризацию газа, являются давление стагнации P_0 , температура стагнации T_0 , ...». Параметр стагнации – это прямой перевод с английского, в русскоязычной литературе принят термин параметр торможения.

– На стр. 84 и далее: «...во всём диапазоне E/n атомы кластера аргона термализованы в большей степени, чем атомы кластера ксенона». Т.к. при столкновении с поверхностью мишени газовый кластер перестает существовать, то следует говорить о рассеянных газовых атомах.

Заключение

Указанные замечания не снижают общего благоприятного впечатления от рассматриваемой диссертационной работы и ее положительную оценку в целом. Результаты работы хорошо апробированы путем обсуждения на известных научных конференциях и публикациями в виде статей в высокорейтинговых журналах.

Представленная диссертационная работа соответствует критериям, установленным Положением о присуждении учёных степеней в Московском государственном

университете имени М.В. Ломоносова, а её автор Назаров Антон Викторович заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.3.5 – физическая электроника.

Я, Коробейщиков Николай Геннадьевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент
Коробейщиков Николай Геннадьевич
кандидат физико-математических наук
по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника,
ведущий научный сотрудник Отдела прикладной физики ФФ ФГАОУ ВО
«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» (НГУ)
телефон: +7 (383) 306-6612
E-mail: korobei@nsu.ru

Подпись Коробейщикова Николая Геннадьевича заверяю

Ученый секретарь НГУ

Тарабан Е.А.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» (НГУ)

www.nsu.ru

Почтовый адрес: Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Телефон: +7 (383) 363-40-04