

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Назарова Антона Викторовича на тему «**Угловые распределения материала, распыленного с поверхности металлов газовыми кластерными ионами**», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.5. Физическая электроника.

В написанной автором диссертационной работе представлены результаты исследования процесса распыления поверхности чистых металлов пучком кластерных ионов инертных газов, механизмов формирования угловых распределений вещества, распыленного под действием бомбардировки кластерными ионами.

Процессы распыления ускоренными заряженными частицами (ионами, электронами) поверхности твердых тел исследуются очень давно, основные механизмы этого взаимодействия успешно изучены и продолжают изучаться. А вот распыления поверхности твердого тела заряженными частицами в виде кластеров – отрасль физики заряженных частиц относительно новая и поэтому изучение механизмов этих процессов представляется важным как с теоретической, так и практической (технологической) точек зрения. Поэтому исследование взаимодействия заряженных частиц с хорошо распространенными металлами, как медь, молибден и вольфрам, является **актуальным**.

Особенностью исследования Антона Викторовича Назарова является рассмотрение процессов взаимодействия кластерных ионов нейтральных газов с поверхностью чистых металлов. Он сосредоточился на изучении механизмов формирования угловых распределений атомов металлов, распыляемых потоком кластерных ионов с их поверхности. Актуальность работы обусловлена тем, что эти исследования помогут развить представления о механизмах распыления материалов и будут полезны для разработки теории взаимодействия кластерных ионов с веществом. Диссертантом выполнены эксперименты и теоретические исследования влияния параметров облучения, сорта атомов кластера и природы мишени на характеристики распыления и механизмы взаимодействия кластера с поверхностью. Им экспериментально определены угловые распределения атомов меди и вольфрама под действием пучка газовых кластерных ионов аргона, криптона и ксенона. Создав компьютерную модель, автор с ее помощью исследовал влияние энергии и размера кластера, сорта атомов кластера и мишени на угловые распределения распыленного материала, определил влияние сорта атомов кластера, энергии и размера кластера, природу мишени на процесс передачи энергии кластера атомам мишени.

Из полученных автором диссертации **новых** результатов я бы выделил следующие:

1. Измерены угловые распределения распыленных атомов металлов –меди, молибдена и вольфрама, в результате воздействия на поверхность металлической мишени пучка газовых кластерных ионов (для кластеров Xe_n и Kr_n).
2. В результате выполненных экспериментов обнаружено увеличение выхода распыленного материала при малых углах эмиссии металлических атомов ($\theta < 20^\circ$) в случае распыления

поверхности меди кластерами Xep и Knp. и выявлены механизмы формирования угловых распределений распылённых атомов, отличных от «латеральных».

3. Показано влияние такого параметра распыления, как отношение средней энергии на атом кластера, на механизм формирования угловых распределений распылённых атомов.

4. Изучено и объяснено влияние сорта атомов кластера и мишени на проникновение атомов кластера в мишень, передачу энергии атомам мишени, а также термализацию атомов кластера после их столкновения с поверхностью мишени.

Я согласен с автором работы в том, что полученная информация об угловых и энергетических распределениях распылённых атомов, а также зависимости от параметра E/n и сорта атомов кластера и мишени могут быть использованы для разработки теоретических моделей (которые остро необходимы не только для дальнейшего понимания данной области исследования, но и создания конкретных технологий) взаимодействия ускоренных газовых кластеров с поверхностью твёрдого тела.

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждаются использованием общепринятых методик, использования современного оборудования и достаточным количеством экспериментальных данных, обрабатываемых статистическими методами.

Кратко остановлюсь на структуре диссертации. Она состоит из введения, пяти глав, заключения, списков сокращений и ссылок на научные работы, изложена на 119 страницах печатного текста, содержит рисунки, выполненные в цвете, таблицы и список литературы, состоящий из 150 наименований.

В ведущих журналах нашей страны и издаваемых за рубежом за последние семь лет (2016-2023 гг.) автором опубликовано шесть работ, что вполне достаточно для защиты кандидатской диссертации. Текст диссертации последовательный и написан с учётом поставленных в работе целей и задач.

Основные **замечания** по тексту данной диссертационной работы:

1. Научная новизна в автореферате написана, скажем так, не очень четко.
2. Почему автором выбран именно такой материал (*медь, молибден и вольфрам*) для исследования процессов распыления?
3. Влияет ли структура мишени (поликристаллическая она или монокристаллическая) на характер процесса распыления металлов кластерными ионами?
4. Что представляет из себя **реальный** рельеф поверхности, формирующийся в процессе облучения кластерными ионами при нормальном падении, и почему этот рельеф приводит к увеличению числа атомов, распыляемых при малых углах эмиссии?
5. Жаль, что в тексте диссертации отсутствует хотя бы минимальное количество материала, посвященного конкретному практическому применению (в технологических процессах) результатов экспериментов, полученных соискателем.

Не смотря на высказанные замечания, диссертация Назарова А.В. производит благоприятное впечатление. Она является частью исследований взаимодействия кластерных ионов с твердым телом, которые проводится коллективом ученых проф. Черныша В.С. Автореферат отражает содержание диссертации и опубликованных работ в ведущих научных изданиях.

Основываясь на выше написанном, можно сделать вывод, что рассматриваемая диссертационная работа Назарова А.В., содержащая решение актуальной научной задачи – исследование процесса распыления кластерными ионами инертных газов таких хорошо известных металлов, как медь, молибден и вольфрам, удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям в МГУ имени М.В. Ломоносова, а ее автор Назаров Антон Викторович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент
ведущий научный сотрудник
Отдела лазерной физики Центра естественно-научных исследований
Института общей физики им. А.М.Прохорова РАН,
профессор, д.ф.-м.н.

Лигачев А.Е.

Тел. +7 916 439 31 63, E-mail: carbin@yandex.ru,

Адрес: 119991 ГСП-1, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38