

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Назарова Антона Викторовича «Угловые распределения материала, распыленного с поверхности металлов газовыми кластерными ионами», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности: 1.3.5 – Физическая электроника.

Исследования взаимодействия ионных пучков кластеров, содержащих сотни или тысячи атомов инертных газов, с поверхностью твердых тел вызывают повышенный интерес в связи с применением таких пучков для полировки поверхности, использования при послойном анализе методами ВИМС, формирования наноструктур на поверхности различных материалов. Распыление материалов атомарными и молекулярными пучками изучается более семидесяти лет и к настоящему моменту времени накоплен большой экспериментальный объем результатов, позволивший создать адекватные модели распыления материалов и использовать это явление в практических целях. В последнее время развитие экспериментальной техники позволило получать ионные кластерные пучки, взаимодействие которых с поверхностью открывает новые эффекты в распылении материалов, которые значительно отличаются от случая распыления атомарными ионами. К настоящему времени происходит накопление экспериментальных данных, посвященных вопросам взаимодействия таких пучков с поверхностью твердых тел, которые позволили бы понять механизмы распыления кластерными ионами, поэтому **актуальность** диссертационной работы Назарова А.В., посвященной экспериментальному изучению и моделированию угловых распределений распыленного с поверхности металлов пучками кластерных ионов инертных газов, не вызывает сомнений.

В работе получен целый ряд **новых** результатов, имеющих большую **научную и практическую ценность**. Среди них хотелось бы выделить следующие:

- экспериментально исследовано угловое распределение распыленных атомов с поверхности Cu, Mo и W при облучении поверхности кластерными ионами  $Ar_n^+$ ,  $Kr_n^+$  и  $Xe_n^+$ ;
- установлено, что вид полученных распределений зависит от материала распыляемой мишени и массы атомов, составляющих кластер и отличается от изотропного распределения, которое наблюдается при распылении одноэлементных металлов атомарными ионами. Наблюдаются так называемые «латеральные максимумы» распределения, положение которых зависит от типа ионов и средней энергии, приходящейся на один атом кластера. Эти результаты необходимо учитывать при анализе поверхности методом ВИМС при использовании в качестве первичных кластерных ионов;
- проведенное моделирование распыления кластерными ионами методом молекулярной динамики позволило выяснить причины изменения пространственных распреде-

лений распыленных атомов при изменении средней энергии атомов в кластере.

**Достоверность** полученных результатов подтверждается использованием современных экспериментальных установок формирования кластерных ионных пучков и измерения плотности распыленного материала на коллекторе, сравнением полученных результатов с имеющимися экспериментальными данными и результатами моделирования.

Полученные автором результаты докладывались на Международных научных конференциях, опубликованы в шести статьях в рецензируемых журналах, включенных в список ВАК, Scopus и Web of Science.

Автореферат написан хорошим языком, логически выстроен и содержит достаточно иллюстративного материала, однако в качестве **недостатка** можно отметить отсутствие значений энергии и количества атомов в кластере в тексте и подписи к рисунку 1.

В целом, диссертационная работа «Угловые распределения материала, распыленного с поверхности металлов газовыми кластерными ионами» по научному уровню, актуальности, научной новизне и практической значимости соответствует требованиям отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода, а ее автор – Назаров Антон Викторович – несомненно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.5. - Физическая электроника.

Доктор физико-математических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника, доцент

Ведущий научный сотрудник лаборатории «Диагностика микро- и наноструктур» Ярославского филиала Физико-технологического института им. К.А. Валиева Российской Академии Наук (ЯФ ФТИАН РАН)

Бачурин Владимир Иванович

**28.08.2023**

Подпись ведущего научного сотрудника ЯФ ФТИАН РАН доктора физико-математических наук, доцента БАЧУРИНА В.И. удостоверяю

Директор ЯФ ФТИАН РАН

Трушин О.С.

150007, Ярославль, ул. Университетская, 21, (4852) 24-65-52, [director@yf-ftian.ru](mailto:director@yf-ftian.ru)

Ярославский Филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технологического института им. К.А. Валиева Российской Академии Наук.