

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Мусина Артема Игоревича  
«Исследование механизмов распыления монокристаллов методами молекулярной динамики»,  
представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния

Диссертационная работа А. И. Мусина посвящена исследованию механизмов распыления монокристаллов при их бомбардировке ускоренными ионами. Тема работы актуальна и практически значима, поскольку изучение особенностей угловых и энергетических распределений распыленных частиц в настоящее время позволяет получить ценную информацию о поверхности твердых тел и лежит в основе таких методов анализа структурного и элементного состава поверхности и тонких пленок, как масс-спектрометрия распыленных нейтральных атомов, масс-спектрометрия вторичных ионов, а также спектрометрия нейтральных атомов с энергетическим и угловым разрешением.

Целью работы являлось изучение методами молекулярной динамики механизмов формирования угловых и энергетических распределений атомов, а также механизмов фокусировки и перефокусировки атомов при их эмиссии с поверхности грани (001) однокомпонентного монокристалла. Как это следует из анализа самой работы и автореферата, эта цель была благополучно достигнута, при этом соискателем были получены следующие, на мой взгляд, наиболее важные результаты:

1. На примере поверхности (001) монокристалла никеля найдены угловые и энергетические распределения распыленных атомов. Обнаружена и объяснена многозначность фокусированных и перефокусированных атомов по начальному азимутальному углу при низких энергиях наблюдения. Показано, что сигнал перефокусированных атомов можно выделить экспериментально при достаточном разрешении по углам и энергии.

2. Показано, что увеличение атомного номера  $Z$  мишени приводит к сдвигу максимумов дифференциального распределения эмитированных атомов по полярному углу в сторону нормали к поверхности. Этот сдвиг получил наглядное объяснение при рассмотрении распределений распыленных атомов с одновременным разрешением по энергии и полярному углу и связан с возрастанием сечения взаимодействия атомов при увеличении  $Z$ . Сдвиг к нормали связан с усилением эффекта блокировки, вклад которого растет из-за увеличения сечения взаимодействия.

3. Обнаружено, что при увеличении поверхностной энергии связи, а также при переходе из парамагнитного состояния в ферромагнитное максимумы дифференциальных энергетических распределений как фокусированных, так и перефокусированных атомов сдвигаются в сторону более высоких энергий. Сформулированы условия лучшего разрешения максимумов фокусированных и перефокусированных атомов.

4. Показано, что за формирование пятен Венера ответственны, в основном, поверхностные механизмы фокусировки, а каскадные механизмы оказывают слабое влияние на их формирование. При этом в экспериментах по распылению грани (001) с хорошим угловым и энергетическим разбиением при низких температурах можно ожидать наличие тонкой структуры в распределениях распыленных атомов для несимметричных относительно направления (010) интервалов азимутального угла.

Полученные результаты достаточно полно изложены в публикациях автора, являются новыми, в достаточной степени обоснованными и имеют существенное значение с точки зрения развития физики конденсированного состояния вообще и физики ионного распыления в частности. Эти результаты могут быть использованы при совершенствовании существующих и разработке новых методов анализа и модификации поверхности, напыления тонких пленок, легирования полупроводников и создания наноструктур.

Автореферат диссертации, как и сама работа, написан очень хорошим научным языком и в достаточной степени отражает её содержание.

Тем не менее, по работе можно сделать следующие **замечания**:

1. Не очень понятно, почему в работе использовался кластер из 20 поверхностных атомов. Почему, например, не 9 (см. рис. 2 автореферата)? Т.к. используемые в работе межатомные потенциалы являются короткодействующими, рассмотрение 20 атомов на первый взгляд кажется избыточным.

2. В работе исследовалось распыление с поверхности (001) монокристаллов с ГЦК решеткой, и понятно почему. Однако интересно было бы посмотреть, как изменятся полученные результаты при переходе к другим типам решетки и другим индексам Миллера.

Следует отметить, что сделанные замечания не умаляют общей научной значимости диссертации и могут рассматриваться как пожелания на будущее.

В целом считаю, что диссертация «Исследование механизмов распыления монокристаллов методами молекулярной динамики» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, соответствующую требованиям и критериям, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата наук в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова, а ее автор, Мусин Артем Игоревич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

доктор физико-математических наук, доцент

Матюхин Сергей Иванович

заведующий кафедрой технической физики и математики  
Федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Орловский государственный университет имени  
И.С. Тургенева» (ОГУ имени И.С. Тургенева),  
почтовый адрес: 302026, г. Орел, ул. Комсомольская, д. 95.,  
ОГУ имени И.С. Тургенева,  
адрес электронной почты:  
тел.:

Я, Матюхин Сергей Иванович, даю согласие на обработку моих персональных данных, связанную с защитой диссертации и оформлением аттестационного дела А.И. Мусина.

Подпись С.И. Матюхина заверяю

Ученый секретарь Ученого совета ОГУ имени И.С. Тургенева,  
кандидат биологических наук, доцент

Н.Н. Чаадаева