

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Мусина Артема Игоревича  
«Исследование механизмов распыления монокристаллов методами  
молекулярной динамики»

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-  
математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного  
состояния

Диссертационная работа Мусина А.И. посвящена исследованию влияния поверхности монокристалла на формирование энерго-угловых распределений атомов при ионном распылении поверхности монокристалла. Понимание и количественное описание подобных эффектов важно не только с точки зрения усовершенствования фундаментальных аспектов теории распыления, но для развития ряда практических методов анализа структуры и состава поверхности, в которых используется ионное распыление.

В качестве методов исследования автор использовал численное атомистическое моделирование в двух версиях. Большинство результатов получено с помощью упрощенной модели 20 поверхностных атомов (что позволяет кардинально увеличить набранную статистику событий по сравнению с традиционными подходами). Рассмотрен целый ряд факторов, влияющих на распределения атомов при их эмиссии с поверхности кристаллов, в том числе изменение параметров мишени. С целью верификации дополнительно использовалось полномасштабное молекулярно-динамическое моделирование. Результаты диссертации являются новыми, достоверными и в достаточной мере апробированными, поскольку все основные результаты представлены на тематических научных конференциях и опубликованы в ведущих российских журналах, рекомендованных ВАК.

В тоже время к представленной работе имеется ряд замечаний.

- (1) Название диссертации выглядит слишком глобально и размыто, поскольку всеобъемлющее исследование механизмов распыления является обширной научной задачей, все аспекты которой вряд ли можно рассмотреть в рамках одной работы. Поэтому уместнее было бы конкретизировать в названии работы суть проведенных автором исследований (влияние структуры поверхности кристалла на потоки эмитированных с поверхности атомов);
- (2) В работе недостаточно аргументирован выбор числа атомов (20) для выбранной модели – хотелось бы понять, как это число влияет на результаты и при каком минимальном количестве атомов модели это влияние уже становится несущественным.
- (3) В работе недостаточно проработан вопрос о степени влияния объемных каскадных эффектов в кристалле на спектры распыления. Сравнение с однократным полномасштабным моделированием (проведенным при нормальном падении иона на мишень) представляется недостаточным для общих выводов о незначительности такого влияния, поскольку вклад каскадных эффектов (включая фокуссоны) существенно зависит от энергии и

угла падения иона на мишень. Так, например, при наклонном падении иона цепочки сфокусированных столкновений, которые достигают поверхности, могут быть вызваны не только каскадными атомами, но и ПВА (первично-выбитыми атомами), что увеличивает их влияние на характеристики спектра распыленных атомов.

(4) Из проведенных в работе расчетов остается неясно, как повлияет на результат включение в “упрощенную” модель не одной, а нескольких приповерхностных плоскостей атомов (подповерхностные атомы кристалла, в принципе, должны влиять на распыленные частицы в силу дальнедействующего характера межатомного взаимодействия, радиус которого, как правило, превышает межплоскостное расстояние в кристаллах). Заявленная тематика работы подразумевает более детальное изучение таких механизмов.

Указанные замечания, тем не менее, не снижают ни актуальности рассмотренной темы, ни значимости полученных научных результатов. Полагаю, что диссертационная работа А.И. Мусина является достаточно полным, актуальным и важным научным исследованием. Содержание автореферата хорошо отражает основные результаты работы. Полагаю, что работа «Исследование механизмов распыления монокристаллов методами молекулярной динамики», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния, удовлетворяет критериям, определенным Положением о присуждении ученых степеней в МГУ имени М.В.Ломоносова, а ее автор Мусин Артем Игоревич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности: 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

Доктор физико-математических наук, профессор высшей школы фундаментальных физических исследований, Физико-механический институт, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Журкин  
Евгений Евгеньевич