

Отзыв официального оппонента
на диссертацию Назарова Антона Викторовича
«УГЛОВЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАТЕРИАЛА, РАСПЫЛЕННОГО С ПОВЕРХНОСТИ
МЕТАЛЛОВ ГАЗОВЫМИ КЛАСТЕРНЫМИ ИОНАМИ»,
представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.5. – Физическая электроника.

Диссертационная работа А.В.Назарова рассматривает процессы взаимодействия пучков ускоренных кластерных ионов с металлическими мишенями. Одним из основных явлений, наблюдаемых при облучении твёрдого тела ускоренными ионами, является распыление, то есть эмиссия атомов мишени под действием бомбардировки. Понимание механизмов происходящих процессов необходимо для совершенствования прикладных методов, использующих кластерные ионы. Для этого необходимо выполнять исследования таких характеристик распыления, как угловые и энергетические распределения выходящих частиц. Пучки ускоренных газовых кластеров к настоящему времени нашли практическое применение в обработке поверхности с целью полировки поверхности, формирования специфического рельефа на поверхности, обработки биомедицинских изделий, в различных аналитических методиках, в частности вторичной ионной масс-спектрометрии для анализа органических молекул. В то же время, механизмы взаимодействия газовых кластерных ионов с поверхностью твёрдых тел значительно отличаются от таковых при падении атомарных ионов. Изучение этих механизмов, до сих пор не вполне понятых, и является целью рассматриваемой диссертационной работы. Таким образом, тема представленного исследования *является актуальной и практически значимой.*

В работе получены экспериментальные зависимости угловых распределений атомов меди, молибдена и вольфрама, распылённых пучком газовых кластерных ионов аргона, криптона и ксенона с энергией 10 кэВ. Обнаружены ранее неизвестные особенности на этих распределениях. При анализе результатов МД моделирования распыления поверхности меди, молибдена и вольфрама кластерами была выявлена сильная зависимость угловых распределений распылённого материала от средней энергии на один атом кластера. Обнаружено, что вклад кластеров малого размера в итоговые угловые распределения является одним из определяющих факторов, объясняющих различия в экспериментально измеренных угловых распределениях. Также показано, что нанорельеф, формирующийся в процессе облучения кластерными ионами, оказывает существенное влияние на угловые распределения распылённого материала. Выявлен механизм этого влияния. Полученные в ходе МД моделирования энергетические распределения вторичных ионов меди, распылённых пучком кластерных ионов аргона и ксенона находятся в удовлетворительном согласии с экспериментально измеренными. Исследована применимость модели тепловых пиков для описания энергетических распределений атомов, распылённых газовыми кластерными ионами. Показано, что она требует переработки, в частности, учета нецилиндричности геометрии теплового пика в случае облучения кластерными ионами, а также давления кластера на стенки формирующегося кратера. Все описанные результаты *получены автором впервые.*

При разработке методики проведения экспериментов и моделирования автор достаточно внимательно рассматривает имеющиеся проблемы, отдельно фокусируясь на критических параметрах, влияющих на результат. Применяемое сочетание экспериментальных исследований процессов распыления с моделированием методом молекулярной динамики (МД) дает возможность глубже проникнуть в суть и выявить неизвестные ранее особенности и механизмы. Сравнение получаемых результатов с литературными данными показывает неплохое согласие в части, где это возможно, что подтверждает **корректность и надежность** сделанных в диссертации выводов.

По прочтении работы считаю, что полученные автором результаты **являются новыми** и расширяют наше представление о процессах, происходящих при бомбардировке металлов ускоренными газовыми кластерами. Нет сомнений в том, что А.В.Назаров **лично внес основной вклад** в постановку задач и разработку методики исследования, выполнил эксперименты, а также большой объем моделирования и проанализировал полученные данные. Накопленный материал существенно улучшает понимание механизмов взаимодействия кластеров с поверхностью, что делает работу **значимой теоретически**. Результаты исследования **являются** также и **практически значимыми**, поскольку открывают возможности для оптимизации режимов облучения и разработки новых подходов к тонкой модификации поверхности мишени. **Основные результаты**, описанные в диссертации, **достаточно полно отражены** в 6 статьях, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, и были представлены на 8 международных и 1 всероссийской конференциях. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации.

В то же время, при прочтении работы у меня возник ряд вопросов и замечаний.

1. При падении столь больших кластеров, как рассматривает автор, в мишени неизбежно возникают ударные волны. При моделировании они могут оказывать существенное влияние на результат, однако, это обстоятельство не рассматривается в диссертации.

2. В работе говорится, что (стр. 61) «...при распылении меди и вольфрама кластерами инертных газов с энергией 10 кэВ основной вклад в распыление вносят малые кластеры, размер которых меньше, чем средний размер кластера в экспериментальном пучке». Однако, в работе не указаны характерные размеры. Если максимум распределения кластеров по массам в пучке сместить в сторону уменьшения массы, это утверждение останется в силе? Стоит подробнее рассмотреть зависимость угловых распределений и границ переходов между режимами распыления от массы кластера.

3. Реальная металлическая мишень обладает микрокристаллической структурой, в которой на поверхность выходят различные грани зерен. Оказывает ли кристаллографическое направление нормали к поверхности и зернистость поверхности влияние на коэффициент распыления и формирование рельефа?

4. Как известно, в экспериментах по облучению может наблюдаться насыщение поверхности атомами инертных газов. При моделировании последовательных падений кластера на поверхность мишени автор удаляет из рассмотрения не только распыленные атомы мишени, но и атомы предыдущего кластера. Оказывает ли эффект насыщения влияние на распыление и как пренебрежение им сказывается на результатах моделирования?

В то же время, указанные замечания не снижают общего высокого мнения о представленной работе. В соответствии со сказанным выше считаю, что *диссертация* «Угловые распределения материала, распыленного с поверхности металлов газовыми кластерными ионами» *отвечает всем требованиям*, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, *соответствует критериям*, установленным Положением о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а *соискатель*, Назаров Антон Викторович, *достоин присуждения ученой степени* кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.5. – Физическая электроника.

Официальный оппонент

Карасев Платон Александрович
доктор физико-математических наук, доцент,
профессор высшей инженерно-физической школы
института электроники и телекоммуникаций
федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого»
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
Тел. (812) 552 7516;
e-mail: platon.karaseov@spbstu.ru