

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Чан Ми Ким Ан "Моделирование формирования и воздействия концентрированных потоков заряженных частиц на металлы", представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Работа Чан Ми Ким Ан посвящена теоретическому исследованию процессов формирования сильноточных пучков и их взаимодействия с поверхностью твердого тела. Эта задача является крайне актуальной при анализе и оптимизации режимов работы плазменных источников быстрых ионов и электронов, используемых в технологических процессах обработки металлических материалов с целью придания им новых функциональных свойств.

Первая глава диссертации носит обзорный характер, она содержит описание и типичные характеристики плазменных источников электронов и ионов, работающих на базе разряда низкого давления с полыми электродами, а также примеры математического моделирования процессов взаимодействия пучков заряженных частиц с твердой металлической поверхностью, в частности, азотирования и высокоскоростного плавления.

Во **второй главе** на основе аналитической модели проведен анализ работы плазменно-иммерсионного ускорителя с баллистической фокусировкой ионов. решения уравнений баланса частиц и их потоков на границах разрядного объема. Эта глава, на мой взгляд, наиболее интересна с точки зрения оригинальности подхода и получения новых физических результатов. В частности, здесь рассматривается эффект формирования виртуального анода в сходящемся ионном пучке, ограничивающий плотность энергетического воздействия пучка на мишень.

Третья глава диссертации посвящена моделированию высокоэнергетических диффузионных процессов в многокомпонентной и многофазной твердой среде. Подробно смоделирован процесс формирования ионно-модифицированных слоев в стали при импульсной имплантации ионов азота. При этом исследованы конкурентные режимы диффузионного азотирования и ионного распыления при радиально-неоднородном режиме облучения.

Четвертая глава посвящена теоретическому моделированию импульсного воздействия плотного низкоэнергетичного электронного пучка на титано-алюминиевую поверхностную структуру. Основное внимание при этом обращено

на сравнение расчетных и экспериментальных температурных зависимостей при таком воздействии. Получено хорошее соответствие между этими данными, что говорит о высоком уровне понимания и моделирования основных физических процессов.

Диссертация демонстрирует хорошую квалификацию Чан Ми Ким Ан в области теоретического моделирования ускорительных систем и взаимодействия импульсных пучков с поверхностью твердого тела. Она продемонстрировала хорошее знакомство экспериментальными данными и плодотворно использовала их для верификации своих теоретических моделей. Научные выводы и защищаемые положения научно обоснованы, их достоверность и новизна не вызывает сомнений.

Есть два существенных замечания по материалам Главы 2, которые требуют развернутого комментария соискателя:

1) Раздел 2.1. Выражение (2.1) дает стационарное значение тока Чайлда-Ленгмюра для вакуумного диода сферической геометрии. Но затем дается расчет временной эволюции слоя объемного заряда (2.2)–(2.5), который – цитирую: «... можно получить при интегрировании уравнения (2.1)». Как можно стационарное соотношение интегрировать по времени? **Что было сделано на самом деле при выводе выражения (2.2)?**

Далее, в выражении (2.3) для ширины слоя приводится функция, которая не имеет асимптотически сходящегося значения. Она даже становится отрицательной, что является неприемлемым значением для ширины слоя. **Необходим подробный комментарий к формуле (2.3), или указать область ее применимости.**

2) Раздел 2.2. Не совсем понятны исходные условия задачи. Ранее (над заголовком) указано, что транспортировка ионов с баллистической фокусировкой исследовалась в эквипотенциальном пространстве. Но затем в уравнении (2.6)–(2.7) появляется электрическое поле ионов. Первый вопрос: **Как это согласуется с понятием эквипотенциальности дрейфового пространства?** Второй вопрос: **Почему имеется только азимутальная составляющая поля и не присутствует радиальная?** Третий вопрос: **Откуда появилось выражение (2.7) для азимутального поля?**

У меня есть также несколько замечаний редакторского плана, которые имеют скорее характер опечаток: 1) на стр. 18 для единиц мощности вместо кВт напечатано кВ; 2) на оси ординат рис. 1.7 одна и та же величина подписана по-разному; 3) на стр. 44 не расшифрована величина M/m (тот есть не указано, что такое M и m); 4) на рис. 3.6 глубина распыления вместо мкм имеет размеры см.

Эти замечания не снижают ценности исследовательской работы в целом. Основные выводы диссертации достаточно полно представлены в опубликованных

статьях и докладах. Среди 11 публикаций автора имеется статья в авторитетном зарубежном журнале Journal of Applied Physics, 4 доклада на конференциях, индексируемые в Scopus (Journal of Physics: Conference Series), статья в журнале Известия вузов. Физика, статья в индексируемом периодическом издании Key Engineering Materials.

Автореферат содержит всю необходимую информацию о работе и адекватно отражает содержание диссертации.

Диссертация представляет собой законченную исследовательскую работу, удовлетворяющую всем требованиям (пп. 8–11) «Порядка присуждения ученых степеней в Национальном исследовательском Томском политехническом университете», а ее автор Чан Ми Ким Ан заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Козырев Андрей Владимирович, заведующий лабораторией теоретической физики
ФГБУН Института сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии
наук (ИСЭ СО РАН), 634055, Томск, пр-т Академический, 2/3
kozyrev@to.hcei.tsc.ru

доктор физико-математических наук, профессор



А.В. Козырев



Подпись Козырева А.В. удостоверяю

Ученый секретарь ИСЭ СО РАН, д-р физ.-мат. наук



И.В. Пегель