

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Института физического
материаловедения Сибирского отделения
Российской академии наук,
д.ф.-м.н.

Номоев А.В.

« 22 » мая 2019 г.

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию ШЕВЕЛЕВА Алексея Эдуардовича «Формирование высокоинтенсивных пучков ионов металлов низкой энергии на основе плазмы вакуумной дуги», на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Изучение диссертации и публикаций в рецензируемых научных журналах: Известия высших учебных заведений. Физика, Журнал технической физики, Письма в Журнал технической физики, Surface and Coatings Technology, Journal of Applied Physics, Applied Surface Science, Vacuum - подтверждает, что диссертация является научно-квалификационной работой. В полной мере соответствует требованиям и критериям, установленным пунктом II.8 «Порядка присуждения ученых степеней в Национальном исследовательском Томском политехническом университете», утвержденным Приказом Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» от 06 декабря 2018 г. № 93/од.

Диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствует о личном вкладе автора диссертации в науку. В диссертации приводятся сведения о развитии метода плазменно-иммерсионного формирования высокоинтенсивных пучков ионов металлов с плотностями ионного тока, достигающими сотен mA/cm^2 с энергией единиц кэВ, о воздействии таких пучков на элементный, структурно-фазовый состав и макроскопические свойства поверхностных и приповерхностных слоев различных материалов. Предложенные автором диссертации решения строго аргументированы и оценены по сравнению с известными принципиальными решениями. Основные научные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых научных изданиях.

Диссертацию А.Э. Шевелева можно признать научным трудом, в котором изложены новые научно обоснованные технические,

технологические решения и разработки, имеющие существенное значение для развития Российской Федерации. В частности, принципиально новый подход к формированию высокоинтенсивных пучков ионов металлов низкой энергии на основе плазмы вакуумно-дугового разряда. Выяснение закономерностей формирования таких пучков в зависимости от параметров плазмы, характеристик системы формирования пучков и ускоряющего потенциала. Поиск альтернативного метода уменьшения капельной фракции вакуумно-дугового источника плазмы, обеспечивающего высокую степень фильтрации плазменного потока без существенного уменьшения плотности ионного тока на мишени. Оценка влияния на изменение элементного, структурно-фазового составов различных материалов и улучшение их физико-химических свойств имплантацией высокоинтенсивных пучков ионов металлов, очищенных от капельной фракции вакуумной дуги, с энергиями, не превышающими единицы кэВ и плотностями ионного тока, достигающих величин сотен мА/см².

Кроме того, характер результатов диссертации имеет важное значение для развития критических технологий Российской Федерации, в частности, «Технологии получения и обработки конструкционных и функциональных наноматериалов» и приоритетного направления Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации «Переход ... к новым материалам и способам конструирования...».

Результаты диссертационной работы использовались при выполнении проекта Российского научного фонда № 17-19-01169 и в рамках конкурсной части государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации 3.2415.2017/4.6 № 3.7245.2017/6.7.

Актуальность избранной темы обуславливается неослабевающим интересом исследователей к развитию и изучению метода ионной имплантации с необходимостью существенного увеличения доз ионного облучения и плотностей ионного тока при модификации материалов различного функционального назначения. Один из методов формирования сильноточных пучков ионов металлов основан на их экстракции из плазмы вакуумно-дугового разряда и последующем ускорении. Существенный недостаток вакуумно-дугового разряда связан с одновременной эмиссией газоразрядной плазмой ионов и испарением капельной фракции катодного материала. Притом, представляет важный научный и практический интерес понимание процессов радиационного воздействия на исходный материал при модификации его структурно-фазовых свойств и элементного состава поверхностных и приповерхностных слоев.

К началу выполнения настоящей работы, несмотря на наблюдаемое увеличение глубины ионного легирования при высоких плотностях ионного тока и низких энергиях ионов в пучке, оставалась недостаточно исследованной область плотностей ионного тока в диапазоне от десятков мА/см² до нескольких А/см², связанная с разработкой принципиально нового подхода к формированию очищенных от капельной фракции сильноточных пучков ионов металлов с плотностями тока, достигающими сотен мА/см², и

исследованием некоторых закономерностей модификации элементного состава, микроструктуры и макроскопических свойств материалов при высокоинтенсивной имплантации, их новых физических качеств. Целесообразность исследований подтверждается состоянием и обстоятельным критическим анализом реальной ситуации, сложившейся в последнее время по формированию высокоинтенсивных пучков ионов металлов и их практическому применению.

Диссертация А.Э. Шевелева, строго соответствует требованиям, предъявляемым к научным работам, направляемым в печать, содержит совокупность новых результатов и научных положений, обоснованность и достоверность которых сомнений не вызывает.

К наиболее значимым относятся:

Достижение полной очистки фокальной области высокоинтенсивного ионного пучка от капельной фракции вакуумно-дугового разряда, благодаря сопряжения свойств вакуумно-дугового источника с тангенциальным к поверхности катода магнитным полем, импульсно-периодических потенциалов смещения отрицательной полярности, фильтрации капельной фракции на основе дискового затеняющего электрода и ионной оптики.

Установление, при формировании длинно-импульсных пучков ионов металлов в условиях полного предварительного заполнения пространства дрейфа вакуумно-дуговой плазмой с увеличением длительности импульса потенциала смещения, возникают неустойчивости, приводящие к срыву транспортировки ионного тока.

Утверждение, что пространственный заряд препятствует идеальной баллистической фокусировке в фокальной области, соответствующей радиусу кривизны экстрагирующего электрода, и приводит к смещению максимума плотности ионного тока за фокальную плоскость. Так, при амплитуде потенциала смещения 3.0 кВ и длительности ускоряющего потенциала 4.0 мкс, в системе с радиусом кривизны сеточного электрода 7.5 см, максимальная плотность ионного тока достигает величины 390 mA/cm^2 на расстоянии 9.5 см от входа в пространство дрейфа при полном токе 1.15 А.

Выявление в условиях недостаточного предварительного заполнения пространства дрейфа вакуумно-дуговой плазмой, вследствие увеличения эффективности нейтрализации пространственного заряда ионного пучка, напуск инертного газа (аргона) в рабочую камеру, позволяет получать сфокусированные пучки ионов металлов с плотностями ионного тока, достигающими нескольких сотен mA/cm^2 при напряжении 3.0 кВ и длительности импульса потенциала смещения 8.0 мкс, при фиксированной частоте следования 10^5 имп/с.

Установление характера процессов формирования ионно-модифицированных слоев с толщинами многократно превышающими проективный пробег ионов низкой энергии при воздействии высокоинтенсивных пучков ионов металлов низкой энергии с плотностями ионного тока, достигающими сотен mA/cm^2 . Показана возможность

получения легированных слоев систем Ni-Al, Zr-Ti и Ti-Al толщиной 6, 16 и 50 мкм, соответственно с существенно улучшенными эксплуатационными и механическими свойствами образцов, - микротвердости в 2-3 раза и износостойкости на 20-40%.

Выявление образования в поверхностных и приповерхностных слоях материалов интерметаллидных фаз различной стехиометрии $Zr_{0.5}Ti_{0.5}$, $Zr_{0.7}Ti_{0.3}$, Ti_3Al (со структурой $D0_{19}$), Ni_3Al , α_2-Ti_3Al с ориентацией (012, 122, $3\bar{1}0$) на глубинах в десятки мкм при воздействии высокоинтенсивных пучков ионов металлов низкой энергии.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается систематическим характером исследований, применением независимых экспериментальных методик, сопоставлением эксперимента и расчета, сравнением полученных результатов с уже признанными результатами других исследователей, созданием экспериментальной установки и системы формирования высокоинтенсивных пучков ионов металлов (алюминия и титана) на основе плазмы непрерывного вакуумно-дугового разряда и протяженных ионно-легированных слоев с толщинами от единиц до нескольких десятков микрон.

Значима практическая ценность работы:

- разработан метод генерации высокоинтенсивных пучков ионов металлов на основе плазмы вакуумной дуги, позволяющий при напряжениях на уровне единиц киловольт формировать с баллистической фокусировкой ионные пучки с током до 1.2 А и плотностью ионного тока до 390 mA/cm^2 ;

- предложен эффективный способ очистки поверхности мишени от капельной фракции вакуумной дуги на основе применения вакуумно-дугового испарителя с тангенциальным магнитным полем, короткоимпульсных высокочастотных отрицательных потенциалов смещения и дискового затеняющего электрода, обеспечивающий полную очистку высокоинтенсивных, с баллистической фокусировкой интенсивных пучков ионов металлов низкой энергии при минимальных потерях ионного тока;

- установлен температурный режим облучения и плотность ионного тока, существенно влияющие на формирование ионно-модифицированных слоев интерметаллидных систем Ni-Al, Zr-Ti и Ti-Al или твердых растворов с толщинами, многократно превышающими проективный пробег ионов низкой энергии.

Наряду с достаточным изложением в диссертации новых научно обоснованных технических и технологических решений, обеспечивающих развитие метода плазменно-иммерсионного формирования высокоинтенсивных пучков ионов металлов с плотностями ионного тока, достигающими сотен mA/cm^2 , при ускоряющих напряжениях в несколько единиц киловольт с использованием плазмы непрерывного вакуумно-дугового разряда, обстоятельном исследовании процессов транспортировки и фокусировки высокоинтенсивных пучков в условиях динамической компенсации их пространственного заряда и воздействия таких пучков на элементный, структурно-фазовый состав и макроскопические свойства

поверхностных и приповерхностных слоев различных материалов, - в диссертации обнаруживаются следующие замечания:

- в схеме эксперимента (с. 43, рисунок 2.2) отмечается, - ведется контроль температуры мишени, однако отсутствуют зависимости температуры мишени от параметров ионного пучка, тем более в автореферате на (с. 16, абзац 3) утверждается *...увеличение времени обработки приводит к увеличению размеров зерна...*, по всей видимости связанное с ростом температуры мишени;

- требует пояснения утверждение, с одной стороны, применение затеняющего электрода (с. 55, абзац 1) *...обеспечивает практически полную очистку ионного потока в области его фокусировки от макрочастиц...*, с другой, отмечаются факторы - тангенциальное магнитное поле, короткоимпульсные потенциалы смещения и ионная оптика в совокупности с затеняющим электродом *...позволяют формировать пучки ионов металлов, полностью очищенные от макрочастиц...*;

- на осциллограммах ионного тока (с. 68, рисунок 2.19) требует пояснения ход зависимостей - при длительности импульса в диапазоне 2-3 мкс, участки осциллограмм совпадают для разных давлений нагнетаемого аргона 10^{-3} и 10^{-1} Па, то же наблюдается при длительности импульса в диапазоне 8-9 мкс для давлений 10^{-3} и 1.0 Па;

- в автореферате (с. 16, абзац 2) показано, *...воздействие высокоинтенсивного пучка ионов сопровождается значительным распылением облучаемой поверхности и в зависимости от флюенса, энергии ионов и материала подложки скорость поверхностного распыления может достигать десятков-сотен мкм/час...*, можно ли утверждать, что ионное распыление будет доминировать над эффектом дальнодействия, т.е. над ионно-стимулированной диффузией, разрушая приповерхностный модифицируемый слой, так как в прямом смысле имплантация ионов металлов при энергиях единицы кэВ, мало эффективна;

- в автореферате приведены неудачные выражения: (с. 9, абзац 1) *...драматическое изменение условий транспортировки ионного пучка...*, (с. 12) *...холодные плазменные электроны...*, (с. 14) *...увеличение длительности импульса драматически влияет на динамику фокусировки высокоинтенсивного пучка ионов...*;

- в автореферате библиографический указатель (с. 19-20) раздел «*Основные публикации по теме диссертации*» включает ссылки п.п. 7, 8 и 10 на российские переводные журналы издательства «ИКЦ «Академкнига» и тут же в перечне повторяются ссылки на те же самые переводные статьи п.п. 3, 4 и 11, правильнее привести ссылки на статьи, опубликованные, либо в исходных российских журналах, либо их переводные версии.

Несмотря на отмеченные замечания. Принимая во внимание наукометрические показатели А.Э. Шевелева (научную продуктивность ученого, индекс Хирша – 4), достаточно высокий научный уровень 24 печатных работ по теме диссертации с импакт-фактором 0,543 – 4,439, в том числе 11 статей в рецензируемых изданиях, индексированных на поисковых

платформах Web of Science и Scopus, из них 7 статей в журналах Q1 и Q2 квартилей. Апробацию результатов диссертации на 7 представительных научных форумах, в том числе на 3 международных. Достаточную степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации и выдвигаемых автором для публичной защиты, их достоверность и новизну. Предложенные автором новые принципиальные технические решения строго аргументированы и критически оценены по сравнению с другими известными решениями.

Считаю, диссертационная работа «Формирование высокоинтенсивных пучков ионов металлов низкой энергии на основе плазмы вакуумной дуги» полностью соответствует требованиям пункта II.8 «Порядка присуждения ученых степеней в Национальном исследовательском Томском политехническом университете», утвержденным Приказом Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» от 06 декабря 2018 г. № 93/од, а ее автор ШЕВЕЛЕВ Алексей Эдуардович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Заведующий лабораторией физического материаловедения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук,
доктор технических наук по специальности 01.04.04 - физическая электроника, профессор по специальности 01.04.04 - физическая электроника,

Семенов Александр Петрович.
670047 Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, д. 6,
телефон: 8(3012)433184,
e-mail: semenov@ipms.bsnet.ru

____ А.П. Семенов

подпись А.П.Семенова удостоверяю,
начальник организационного отдела Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук,

____ Е.А. Карпова

« 22 » мая 2019 г.