



УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе и
инновациям ФГАОУ ВО НИ ТПУ

Степанов И.Б.

04 2019 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Диссертация «Формирование высокоинтенсивных пучков ионов металлов низкой энергии на основе плазмы вакуумной дуги» выполнена в Научной лаборатории высокоинтенсивной имплантации ионов Исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

В период подготовки диссертации соискатель Шевелев Алексей Эдуардович обучался в очной аспирантуре Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и работал в должности инженер в Научной лаборатории высокоинтенсивной имплантации ионов Исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

В 2015 г. окончил Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по специальности 01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц (квалификация инженер-физик, диплом с отличием).

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в 2019 г. Федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор Рябчиков Александр Ильич, работает в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», в должности заведующего лабораторией высокоинтенсивной имплантации ионов Исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Актуальность диссертационной работы. Методы направленного изменения свойств материалов при использовании пучков заряженных частиц получили широкое практическое распространение как при решении научных, так и технологических задач. Одним из наиболее значимых и востребованных подходов является метод ионной имплантации, поскольку в процессе радиационного воздействия на исходный материал возможна не только модификация его структурно-фазовых свойств, но и существенное изменение элементного состава поверхностных и приповерхностных слоев.

Развитие метода ионной имплантации при модификации материалов различного функционального назначения привело к необходимости существенного увеличения доз

ионного облучения и плотностей ионного тока по сравнению с ионной имплантацией в полупроводники. Один из методов формирования сильнотоочных пучков ионов металлов основан на их экстракции из плазмы вакуумно-дугового разряда и последующем ускорении. Плазма вакуумной дуги обладает рядом существенных преимуществ: высокая плотность ионного тока насыщения из плазмы, присутствие многозарядных ионов, наличие направленной скорости ионного потока. Однако существенный недостаток вакуумно-дугового разряда связан с одновременной эмиссией как плазмы, так и неионизированных частей катодного материала, находящихся в жидком или твердом состояниях. Наличие макрочастиц приводит к загрязнению поверхности имплантируемой мишени и требует использования специальных систем фильтрации, как правило, приводящих к уменьшению плотности ионного тока.

Использование ионного ускорителя на основе плазмы непрерывного вакуумно-дугового разряда позволило формировать пучки ионов металлов с плотностями ионного тока на уровне нескольких мА/см^2 с энергией ионов до 120 кэВ (с учетом зарядового состояния) и достигать флюенса ионного облучения порядка 10^{19} ион/ см^2 . Высокие плотности тока в совокупности с повышением флюенса облучения позволили продемонстрировать возможность формирования интерметаллидных систем Ti-Al, Ni-Al и Ni-Ti на глубинах, значительно превышающих проективный пробег ионов в среде, в том числе за счет диффузионного механизма массопереноса под действием ионного пучка высокой интенсивности.

В тоже время, несмотря на наблюдаемое увеличение глубины ионного легирования при высоких плотностях ионного тока и низких энергиях ионов в пучке, оставалась неисследованной область плотностей ионного тока в диапазоне от десятков мА/см^2 до нескольких А/см^2 . Таким образом, тема диссертационной работы, связанная с разработкой принципиально нового подхода к формированию очищенных от макрочастиц сильнотоочных пучков ионов металлов с плотностями тока, достигающими десятков-сотен мА/см^2 , и исследованием некоторых закономерностей модификации элементного состава, микроструктуры и макроскопических свойств материалов при высокоинтенсивной имплантации представляется актуальной.

Научная новизна диссертации.

1. Сформулированы принципы плазменно-иммерсионного формирования высокоинтенсивных пучков ионов металлов низкой энергии на основе плазмы непрерывного вакуумно-дугового разряда. Определены основные закономерности формирования высокоинтенсивных ионных потоков, транспортировки и фокусировки пучков в зависимости от геометрии фокусирующей системы, условий нейтрализации их объемного заряда и параметров ускоряющего напряжения.

2. Показано, что совместное применение вакуумно-дугового источника с тангенциальным к поверхности катода магнитным полем, импульсно-периодических потенциалов смещения отрицательной полярности и оригинальной системы фильтрации микрокапельной фракции на основе дискового затеняющего электрода и свойств ионной оптики позволяет добиться полной очистки фокальной области высокоинтенсивного ионного пучка от макрочастиц вакуумно-дугового разряда.

3. Показано, что условия нейтрализации высокоинтенсивного пучка ионов металлов можно обеспечить за счет предварительной инжекции вакуумно-дуговой плазмы в пространство дрейфа или наработки пучковой плазмы в процессе ионизации остаточного газа ионами пучка в рабочей камере. Установлено, что при баллистической фокусировке ионных пучков в системе с малой кривизной фокусирующего электрода условия нейтрализации объемного заряда динамически изменяются как во времени, так и в пространстве.

4. Впервые показана возможность применения пучков ионов металлов с плотностью тока от 10 до 200 мА/см^2 с энергией ионов в единицы кэВ для высокоинтенсивного ионного

легирования металлов и сплавов. При облучении мишеней из никеля, титана и циркониевого сплава высокоинтенсивными пучками ионов алюминия и титана сформированы протяженные ионно-легированные слои с толщинами от единиц до нескольких десятков мкм.

Научная и практическая значимость.

1. Разработан метод генерации высокоинтенсивных пучков ионов металлов на основе плазмы вакуумной дуги, позволяющий при напряжениях на уровне единиц кВ формировать баллистически сфокусированные ионные пучки с током до 1.2 А и плотностью ионного тока до 390 мА/см².

2. Предложен эффективный способ очистки поверхности мишени от микрокапельной фракции вакуумной дуги при совместном применении вакуумно-дугового испарителя с тангенциальным магнитным полем напряженностью 150 Гс и короткоимпульсных высокочастотных отрицательных потенциалов смещения (7 мкс, 10⁵ имп/с, - 2 кВ). Показана возможность полной очистки высокоинтенсивных, баллистически сфокусированных пучков ионов металлов низкой энергии при минимальных потерях ионного тока с использованием системы фильтрации типа «солнечное затмение».

3. Воздействие высокоинтенсивных пучков ионов металлов низкой энергии с плотностями ионного тока, достигающими десятков-сотен мА/см², приводит к формированию ионно-модифицированных слоев с толщинами, многократно превышающими проективный пробег ионов низкой энергии. На примере систем Ni-Al, Zr-Ti и Ti-Al показана возможность получения легированных слоев с толщиной, достигающей 6, 16 и 50 мкм, соответственно. Температурный режим облучения и плотность ионного тока существенно влияют на фазовый состав и формирование интерметаллидных систем или твердых растворов в ионно-модифицированных слоях.

Достоверность результатов. Результаты диссертационной работы подтверждаются систематическим характером исследований, использованием независимых дублирующих экспериментальных методик, а также сравнением полученных результатов с результатами других исследователей как в нашей стране, так и за рубежом.

Личный вклад соискателя – проведение комплекса исследований по формированию, транспортировке и фокусировке высокоинтенсивных пучков ионов металлов низкой энергии в различных условиях нейтрализации их пространственного заряда, а также проведению исследований по формированию интерметаллидных слоев и изменению их макроскопических свойств. Автором самостоятельно выдвинуты защищаемые научные положения, сделаны выводы и даны рекомендации по результатам исследования.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на 19 и 20 Международных конференциях по модификации поверхности ионными пучками (Чиангмай, Таиланд, 2015, Лиссабон, Португалия, 2017), 7 Международной научно-практической конференции «Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине» (Томск, 2015), 13-14 конференциях по модификации материалов пучками заряженных частиц и плазменными потоками (Томск, 2016, 2018), 12 Международной конференции по взаимодействию излучений с твердым телом (Минск, Беларусь, 2017), 22 Международной конференции по технологии ионной имплантации (Вюрцбург, Германия, 2018).

Соответствие диссертации паспорту научной специальности определяется ее направлением на задачи: плазменно-иммерсионное формирование высокоинтенсивных пучков ионов металлов; исследование процессов транспортировки и фокусировки

высокоинтенсивных пучков ионов металлов в зависимости от условий нейтрализации их пространственного заряда; исследование процессов взаимодействия высокоинтенсивных пучков ионов металлов низкой энергии с различными материалами. Диссертационные исследования соответствуют области исследований по 3 пунктам из восьми:

1. Получение пучков заряженных частиц (в т.ч. поляризованных), расчетно-теоретические и экспериментальные исследования параметров пучков.

2. Исследования и расчеты динамики пучков заряженных частиц в ускоряющих и фокусирующих каналах. Сложение пучков. Разработка расчетных программ.

3. Расчетно-теоретические и экспериментальные исследования взаимодействий пучков заряженных частиц с электромагнитными полями, друг с другом, с молекулами остаточного газа и конструкционными материалами и мишенями.

Публикации. По результатам исследований по теме диссертации опубликовано 24 печатные работы: 14 статей в рецензируемых изданиях, из которых 7 статей в журналах 1 и 2 квартилей; 10 публикаций в трудах международных конференций.

Список основных публикаций по теме диссертационного исследования.

1. Ryabchikov A.I., Shevelev A.E., Sivina D.O., Ivanova A.I., Medvedev V.N. Low energy, high intensity metal ion implantation method for deep dopant containing layer formation // *Surface and Coatings Technology*. – 2018. – V. 355. – P. 123–128.

2. Ryabchikov A.I., Ananin P.S., Shevelev A.E., Dektyarev S.V., Sivina D.O., Ivanova A.I. Joint influence of steered vacuum arc and negative repetitively pulsed bias on titanium macroparticles suppression // *Surface and Coatings Technology*. – 2018. – V. 355. – P. 240–246.

3. Ryabchikov A.I., Sivina D.O., Shevelev A.E., Ananyin P.S. Regularities of Plasma-Immersion Formation of Long-Pulse High-Intensity Titanium Ion Beams // *Russian Physics Journal*. – 2018. – V. 61 (7). – P. 1338-1346.

4. Ryabchikov A.I., Shevelev A.E., Anan'in P.S., Sivina D.O. Generation of High-Intensity Aluminum-Ion Beams at Low Energy // *Technical Physics*. – 2018. – V. 63 (10). – P. 1516-1524.

5. Ryabchikov A.I., Shevelev A.E., Sivina D.O., Koval T.V., An T.M.K. High intensity, macroparticle-free, aluminum ion beam formation // *Journal of Applied Physics*. – 2018. – V. 123 (23). – 233301.

6. Ryabchikov A.I., Kashkarov E.B., Pushilina N.S., Syrtanov M.S., Shevelev A.E., Korneva O.S., Sutygina A.N., Lider A.M. High-intensity low energy titanium ion implantation into zirconium alloy // *Applied Surface Science*. – 2018. – V. 439. – P. 106-112.

7. Рябчиков А.И., Сивин Д.О., Шевелев А.Э., Ананьин П.С. Закономерности плазменно-иммерсионного формирования длинно-импульсных высокоинтенсивных пучков ионов титана // *Известия высших учебных заведений. Физика*. – 2018. – Т. 61, № 7. – С. 139-146.

8. Рябчиков А.И., Шевелев А.Э., Ананьин П.С., Сивин Д.О. Формирование высокоинтенсивных пучков ионов алюминия низкой энергии // *Журнал технической физики*. – 2018. – Т. 88, № 10. – С. 1564-1572.

9. Ryabchikov A.I., Ananin P.S., Dektyarev S.V., Sivina D.O., Shevelev A.E. High intensity metal ion beam generation // *Vacuum*. – 2017. – V. 143. – P. 447.

10. Рябчиков А.И., Ананьин П.С., Дектярев С.В., Сивин Д.О., Шевелев А.Э. Плазменно-иммерсионное формирование высокоинтенсивных ионных пучков // *Письма в Журнал технической физики*. – 2017. – Т. 43, № 23. – С. 3–10.

11. Ryabchikov A.I., Anan'in P.S., Dektyarev S.V., Sivina D.O., Shevelev A.E. Plasma-immersion formation of high-intensity ion beams // *Technical Physics Letters*. – 2017. – V. 43, № 12. – P. 1051-1053.

12. Stepanov I.B., Ryabchikov A.I., Ananin P.S., Sivina D.O., Shevelev A.E., Zhelomsky S.G. Tangential cathode magnetic field and substrate bias influence on copper vacuum arc

macroparticle content decreasing // Surface and Coatings Technology. – 2016. – V. 306, Part A. – P. 21–24.

13. Рябчиков А.И., Ананьин П.С., Шевелев А.Э. Применение тангенциального магнитного поля и импульсно-периодического потенциала смещения для подавления медных макрочастиц вакуумной дуги // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2016. – Т. 59, № 6. – С. 125-130.

14. Ryabchikov A.I., Ananin P.S., Sivin D.O., Dektyarev S.V., Bumagina A.I., Shevelev A.E., Andriyashin D.A. Influence of negative bias pulse parameters on accumulation of macroparticles on the substrate immersed in titanium vacuum arc plasma // Surface and Coatings Technology. – 2016. – V. 306. – P. 251–256.

Опубликованные работы отражают основное содержание диссертации.

Представленная работа полностью соответствует требованиям Порядка присуждения ученых степеней в Национальном исследовательском Томском политехническом университете.

Диссертация «Формирование высокоинтенсивных пучков ионов металлов низкой энергии на основе плазмы вакуумной дуги» Шевелева Алексея Эдуардовича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.20 – Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Заключение принято на научно-техническом семинаре Исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». Присутствовали на заседании 20 человек, в том числе 8 докторов наук, 6 кандидатов наук. Результаты голосования: «ЗА» – 20, «ПРОТИВ» – нет, «ВОЗДЕРЖАЛСЯ» – нет, протокол №6/19 от «1» апреля 2019 г.

Председатель научно-технического семинара
д.ф.-м.н.

 Сухих Л.Г.

Секретарь научно-технического семинара

 Корнева О.С.

