

ОТЗЫВ

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

Актуальность работы. Исследования и разработки методов модификации поверхностных и приповерхностных слоев материалов различного функционального назначения с использованием пучков заряженных частиц являются актуальными. Один из наиболее востребованных подходов связан с использованием ионных пучков, поскольку в процессе ионной имплантации возможно изменение структурно-фазового, элементного состава поверхностных и приповерхностных слоев и как следствие эксплуатационных характеристик. Однако, в случае модификации функциональных металлических материалов, а не полупроводников, существенное значение имеет доза ионной имплантации и глубина проникновения легирующей примеси. Существующие на данный момент подходы, как правило, предполагают использование пучков ионов средних энергий (десятки кэВ) при плотностях ионного тока не превышающих нескольких мА/см². В тоже время, в ряде работы была показана принципиальная возможность увеличения глубины ионного легирования при повышенных плотностях ионного тока, но при низкой средней энергии ионов в пучке (порядка 1 кэВ и менее). Такие параметры ионной имплантации способствуют значительной модификации структуры и фазового состава. Несмотря на полученные результаты, к началу выполнения работы, оставалась практически не исследованной возможность дальнейшего увлечения толщин ионно-модифицированных слоев при больших плотностях ионного тока. Среди конструкционных материалов наибольшее практическое значение имеют сплавы на основе титана, никеля и циркония. В этой связи, тематика диссертационной работы, связанная с разработкой нового подхода по формированию высокоинтенсивных пучков ионов низкой энергии с плотностями ионного тока достигающих сотен мА/см² и исследованию некоторых закономерностей изменения элементного и структурно-фазового составов, микроструктуры и макроскопических свойств титана, никеля и циркония после воздействия таких пучков имеет высокое практическое и фундаментальное значение.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа Шевелева Алексея Эдуардовича состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 158 страниц, работа содержит 56 рисунков и 6 таблиц. Список цитируемой литературы включает 177 источников.

Достоверность. Достоверность и обоснованность результатом работы подтверждается систематическим характером исследований, использованием

независимых дублирующих экспериментальных методик, использованием современного оборудования для изучения физико-химических свойств модифицированных материалов, сопоставлением экспериментальных результатов с данными численного моделирования, а также сравнением полученных результатов с результатами других исследователей как в нашей стране, так и за рубежом. Результаты работы опубликованы в ведущих российских и международных изданиях по тематике (в том числе в журналах первого и второго квартала), а также достаточно широко обсуждались на международных конференциях.

Содержание диссертации. Во введении показана актуальность направления исследований и степень разработанности, сформулированы основные положения, научная и практическая значимость, новизна.

Первая глава диссертационной работы посвящена анализу актуальных литературных данных по разработкам в области ионных импланторов, преимущественно на основе плазмы вакуумной дуги, и их практическому использованию при модификации поверхностных слоев материалов. Значительное внимание в обзоре уделено физике вакуумного дугового разряда, формированию потока микрокапельной фракции, а также способов и методов очистки плазменного потока, как при использовании плазменных фильтров, так и альтернативных подходов. Показаны закономерности формирования слоя пространственного разделения зарядов при плазменно-иммерсионном подходе. В выводах по главе сформулированы основные задачи исследования.

Во второй главе впервые сформулированы основные принципы плазменно-иммерсионного формирования высокоинтенсивных пучков ионов. Показана возможность полной очистки фокальной области фокусируемого ионного пучка за счет совместного использования вакуумно-дугового испарителя с тангенциальным к поверхности катода магнитным полем, импульсно-периодических потенциалов отрицательной полярности, а также затеняющего электрода. Приведены данные по транспортировке высокоинтенсивных пучков ионов низкой энергии через пространства дрейфа при различных параметрах потенциала смещения, геометрии системы формирования и транспортировки, условий нейтрализации пространственного заряда пучка. Продемонстрировано, что отсутствие или ограниченное время инжекции вакуумно-дуговой плазмы в пространство дрейфа пучка приводит к существенному провисанию потенциала в пучке, вплоть до образования виртуального анода. Неустойчивости, связанные с действием пространственного заряда, могут развиваться и при транспортировке пучков ионов с длительностями в несколько десятков мкс в следствие постепенного выхода плазменных электронов из пространства дрейфа в ускоряющий зазор. Показано, что напуск аргона в рабочую камеру частично решает проблему нейтрализации объемного заряда пучка и повышает эффективность его транспортировки.

Третья глава посвящена исследованию эффективности предложенного метода фокусировки пучков. Показана принципиальная возможность получения баллистически сфокусированного пучка ионов с плотностью ионного тока до 390 мА/см^2 при ускоряющем напряжении 3 кВ. Показано, что динамика фокусировки имеет сложный характер и определяется временем выхода плазменных ионов из объема пучка, а время компенсации пространственного заряда может достигать нескольких мкс, что подтверждается результатами численного моделирования. Экспериментальные данные свидетельствуют о смещении максимума плотности ионного тока за фокальную плоскость системы, под действием недокомпенсированного пространственного заряда высокоинтенсивного низкоэнергетического пучка и подтверждаются как аналитическими методом при решении уравнения огибающей пучка, так и данными численного моделирования.

В четвертой главе представлены некоторые закономерности изменения элементного, структурно-фазового состава, микроструктуры и макроскопических свойств мишеней из титана, никеля и циркония при воздействии высокоинтенсивных пучков алюминия и титана низкой энергии. Используются интенсивные режимы, которые позволяют достичь высоких концентраций внедренных примесей – до 10^{21} ион/см². Такие интенсивные условия позволяют формировать слои толщиной до несколько десятков мкм в отличие от обычных режимов имплантации. Показана возможность формирования протяженных ионно-легированных слоев с толщинами, достигающими нескольких десятков мкм, преимущественно за счет механизма радиационно-стимулированной диффузии. Методами рентгено-структурного анализа и просвечивающей электронной микроскопии продемонстрировано формирование в поверхностных и приповерхностных слоях интерметаллидных фаз и твердых растворов. Показано, что воздействие сфокусированных пучков ионов низкой энергии сопровождается интенсивным распылением поверхности мишени и формированием характерного кратера распыления. Измерения механических и трибологических характеристик образцов на примере системы Zr-Ti показали увеличение твердости модифицированной мишени в 2-3 раза, а также износостойкости на 22-40 %.

Основные результаты работы сформулированы в заключении диссертации и в разделах: Научная новизна, Научная и практическая значимость работы.

К наиболее важным результатам работы можно отнести:

1. Сформулированы принципы плазменно-иммерсионного формирования высокоинтенсивных пучков ионов металлов низкой энергии на основе плазмы вакуумной дуги. Показана возможность формирования пучков ионов с током порядка 1.15 А при плотности ионного тока до 390 мА/см^2 при ускоряющем напряжении 3 кВ.

2. Показано, что при совместном применении вакуумно-дугового источника с арочным магнитным полем, импульсно-периодических

отрицательных потенциалов и системы фильтрации макрочастиц на основе дискового затеняющего электрода удается достичь полной очистки фокальной области высокоинтенсивного ионного пучка от микрокапельной фракции вакуумно-дугового разряда.

3. В случае неполного заполнения пространства дрейфа пучка вакуумно-дуговой плазмой провисание потенциала в пучке может достигать значений вплоть до образования виртуального анода с торможением и отражением значительной части ионов от потенциального барьера. Установлено, что даже в случае обеспечения полного предварительного заполнения пространства дрейфа вакуумно-дуговой плазмой, при формировании длинно-импульсных пучков ионов металлов возникают неустойчивости, приводящие к срыву транспортировки ионного тока, при этом вероятность возникновения таких неустойчивостей повышается при увеличении длительности импульса потенциала смещения.

4. Высокоинтенсивный пучок ионов низкой энергии имеет сложную динамику фокусировки, связанную с выходом плазменных ионов из объема пучка, при этом конечное время нейтрализации может достигать нескольких мкс. Даже в установившемся режиме действие пространственного заряда препятствует фокусировке ионного пучка по баллистическим траекториям и приводит к смещению максимума плотности ионного тока за фокальную плоскость системы.

5. Воздействие высокоинтенсивных пучков ионов металлов низкой энергии с плотностями ионного тока, достигающими десятков-сотен мА/см^2 , 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. Высокоинтенсивная имплантация ионов позволяет существенно улучшить эксплуатационные и механические свойства образцов. Получены важные практические результаты, так на примере системы Zr-Ti показана возможность увеличения твердости поверхностных слоев в 2-3 раза и износостойкости на 22-40 % в зависимости от режима имплантации.

Замечания по работе:

1. Метод диагностики параметров плазмы и пучка упоминаются в диссертации без необходимо детализации, которая позволила бы оценить применимость данных методик в условиях проведения экспериментов.
2. Для иммерсионной ионной имплантации, когда вторичная ионно-электронная эмиссия с поверхности обрабатываемого изделия не подавляется, вопрос о корректности измерения ионного тока становится актуальным. Однако этот вопрос практически не обсуждается в диссертации. Желательно чтобы величина ионного тока определялась альтернативными методами, например по анализу распределения внедренных ионов в образце.

3. Для сильнооточного вакуумно-дугового разряда дуговая плазма может содержать определенную долю многозарядных ионов, которые будут воздействовать на поверхность с энергией кратной заряду, однако эта особенность не нашла должного отражения в диссертации.
4. В работе использована ОЖЭ-спектроскопия для определения концентрации по глубине и анализируются преимущественно концентрации металлических ионов. Однако, алюминий, титан и цирконий имеют высокое сродство к кислороду и при имплантации присутствуют как правило в материале оксидные фазы, которые дополнительно приносят повышение прочности в образце. Однако данному вопросу не уделено достаточное внимание в диссертации.
5. В работе не уделено достаточное внимание фазовому составу и формируемых интерметаллидных фазы в системе Ni-Al, отсутствуют рентгенограммы имплантированных образцов.

Однако вышеуказанные замечания носят частный характер. Выполненная работа является законченным научным исследованием, имеет высокое фундаментальное и прикладное значение. Выполнено важное научное исследование. Считаю, диссертационная работа «Формирование высокоинтенсивных пучков ионов металлов низкой энергии на основе плазмы вакуумной дуги» полностью соответствует требованиям п. 8 «Порядка присуждения ученых степеней в Национальном исследовательском Томском политехническом университете», 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.

доктор физико – математических наук,
профессор кафедры Физической и коллоидной химии Химического факультета,
Исполнительный директор САЕ «Институт Умные материалы и технологии»
Национального исследовательского Томского государственного университета
доцент Курзина Ирина Александровна

634055, Россия, Томск, пр. Ленина, 36
тел.: 8-913-882-1028
е – mail: kurzina99@mail.ru
05.06.2019

Подпись Курзиной И.А. заверяю
Ученый секретарь ТГУ



Сазонтова Н.А.