

Блейхер Галина Алексеевна

**ЭРОЗИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОГО ТЕЛА
ПОД ДЕЙСТВИЕМ МОЩНЫХ ПУЧКОВ
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ**

Специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Томск – 2011 г.

Работа выполнена в Физико-техническом институте Национального
исследовательского Томского политехнического университета

Научный консультант: заслуженный деятель науки РФ,
доктор физико-математических наук, профессор
Кривобоков Валерий Павлович.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Булгаков Александр Владимирович;
доктор технических наук, профессор
Ремнев Геннадий Ефимович;
доктор физико-математических наук, профессор
Шаркеев Юрий Петрович.

Ведущая организация: **Институт электрофизики УрО РАН,**
г. Екатеринбург

Защита состоится **30 ноября 2011 г. в 15⁰⁰ часов** на заседании совета
по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.02
при ГОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский
политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке
ГОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический
университет» по адресу: г. Томск, ул. Белинского, д. 55.

Автореферат разослан «20» сентября 2011 г.

Ученый секретарь совета по защите
докторских и кандидатских диссертаций,
доктор физико-математических наук

Коровкин М.В.

Общая характеристика работы

Актуальность темы

В настоящей работе под термином «радиационная эрозия» подразумевается удаление атомов, молекул, кластеров или микроскопических образований с поверхности в результате воздействия высокоэнергетических частиц. Этот процесс представляет значительный интерес как для понимания природы радиационных повреждений твердого тела, так и для технологических применений. Механизмы его определяются параметрами излучения (видом частиц, их энергией, плотностью мощности и т.п.) и свойствами твердого тела.

Исследование радиационной эрозии началось в 50-70-х годах прошлого века. Сравнительно быстро было показано, что удаление атомов и молекул с поверхности при облучении слаботочными пучками ускоренных ионов с энергиями $10^2..10^4$ эВ происходит в результате парных столкновений быстрых частиц с атомами вещества, т.е. так называемого столкновительного распыления [1]. В качестве характеристики интенсивности эрозии было взято количество распыленных атомов вещества мишени, приходящееся на одну бомбардирующую частицу, впоследствии названное коэффициентом распыления. Экспериментально и теоретически было показано, что коэффициенты распыления металлов при облучении ионными пучками с указанной энергией частиц и с плотностью мощности ниже $10..100$ Вт/см² не превышают нескольких десятков атомов на одну частицу пучка в зависимости от вида комбинации «ион-мишень», энергии ионов и других условий облучения. При этом не было выявлено заметного влияния плотности тока на коэффициент распыления [2].

По мере того, как в 70-80-е годы появлялись ускорители заряженных частиц с плотностью мощности пучков, превышающей $10^5..10^6$ Вт/см², а также проводились исследования по их воздействию на вещество, стало ясно, что с увеличением плотности тока пучка природа эрозии изменяется. Было обнаружено, что вещество вблизи облучаемой поверхности разогревается до высоких температур и может претерпевать фазовые превращения. Наши исследования, выполненные в 80-90-е годы, показали, что при воздействии на твердое тело мощных импульсных (субмикросекундных) пучков заряженных частиц с энергией $100..1000$ кэВ и плотностью мощности больше 10^7 Вт/см² интенсивность эрозии, создаваемой испарением, может оказаться на 3..5 порядков выше, чем интенсивность столкновительного распыления.

Принимая во внимание, что скорость удаления вещества с поверхности за счет испарения нелинейно (практически экспоненциально) возрастает с увеличением температуры, мы предположили, что в результате радиационного разогрева облучаемой поверхности интенсивность эрозии должна нелинейно возрасти по мере увеличения плотности тока. Это означает, что при достаточно высокой плотности мощности интенсивность удаления вещества и энергоэффективность (т.е. доля энергии пучка, расходуемой на удаление вещества) могут быть очень значительными.

В дальнейшем эрозию, инициируемую радиационным разогревом, будем называть тепловой, а пучки частиц, коллективное действие которых создает эффект нелинейного роста скорости эрозии (т.е. количества вещества, удаляемого с единицы площади поверхности в единицу времени) с увеличением плотности тока, - мощными.

На практике наибольший интерес представляют режимы облучения, при которых значительная, или даже преимущественная, доля энергии пучка, введенной в вещество, расходовалась бы на удаление частиц с облучаемой поверхности. Один из способов обеспечения этого эффекта состоит в адиабатическом (или почти адиабатическом) вводе энергии в мишень. Например, облучение короткими импульсами, которое позволяет минимизировать теплопроводный сток энергии из области торможения быстрых частиц пучка вблизи поверхности.

Аналогичный эффект может быть достигнут и с помощью остророфокусированных сканирующих пучков заряженных частиц. Продолжительность их воздействия на любой элемент поверхности тоже не превышает нескольких десятков или сотен микросекунд.

Тепловая эрозия, на которую может расходоваться значительная доля энергии потока бомбардирующих частиц, может быть вызвана не только с помощью пучков, генерируемых внешними источниками и направляемых на мишень с использованием специальных систем ускорения и фокусировки, но и при воздействии низкотемпературной газоразрядной плазмы на поверхность теплоизолированных мишеней магнетронных распылительных систем. Здесь можно создать условия, при которых сток тепловой энергии со всей мишени за счет теплопроводности практически отсутствует. Тогда основная доля энергии плазмы может расходоваться на нагрев и фазовые превращения мишени. Благодаря этому тоже возникает возможность нелинейного роста интенсивности эрозии с увеличением плотности мощности пучка, экстрагируемого из плазмы разряда.

Радиационная эрозия, создаваемая подобными пучками заряженных частиц, может быть использована в технологиях модифицирования поверхностных свойств материалов и изделий. Однако ее применение сдерживается недостаточным знанием природы этого процесса. Эти проблемы можно сформулировать следующим образом.

1. Отсутствие надежных математических моделей эрозии под действием мощных пучков заряженных частиц для многофазных систем.

2. Нет ясных представлений о механизмах диссипации энергии пучка, особенно в импульсном режиме облучения. Не выявлены закономерности интенсивности и энергоэффективности эрозии в зависимости от параметров облучения.

3. Не изучены возможности остророфокусированных сканирующих пучков заряженных частиц в создании эрозии поверхности.

4. Не рассмотрен вопрос об оптимальных параметрах технологической обработки поверхности твердого тела мощными пучками заряженных частиц.

5. Не изучены свойства аналогичной по своей природе эрозии поверхности жидкофазных мишеней магнетронных распылительных систем.

В связи с этим **цель настоящей работы** состоит в том, чтобы, во-первых, создать инструмент, моделирующий эрозию поверхности под действием мощных пучков заряженных частиц и плазмы магнетронного разряда при фазовых превращениях облучаемого вещества, который был бы способен прогнозировать интенсивность и энергоэффективность эрозии в зависимости от параметров облучения. Во-вторых, с его помощью исследовать свойства эрозии под действием разных видов мощных пучков заряженных частиц и плазмы магнетронного разряда.

Для этого мы использовали численное моделирование, позволяющее построить адекватную физическую картину в условиях быстропротекающих процессов.

Задачи настоящего исследования в более подробном изложении можно сформулировать следующим образом.

1. Разработать математическую модель эрозии поверхности твердого тела при воздействии импульсных пучков заряженных частиц в диапазоне плотности мощности $10^6..10^{10}$ Вт/см², когда имеет место интенсивное испарение атомов.

2. Исследовать свойства эрозии поверхности под действием мощных субмикро- и микросекундных ионных и электронных пучков в зависимости от параметров облучения.

3. Разработать математическую модель эрозии поверхности под действием остросфокусированных пучков заряженных частиц сканирующего типа и исследовать это явление.

4. Показать роль тепловой эрозии в технологиях модифицирования поверхностных свойств материалов и изделий. Разработать расчетные методики прогнозирования результатов обработки и поиска оптимальных режимов облучения для некоторых технологических приложений.

5. Изучить механизмы и свойства эрозии поверхности жидкофазной мишени магнетронной распылительной системы при воздействии на нее плазмы разряда. Установить закономерности усиления эмиссии атомов с ее поверхности.

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем.

1. Предложена новая математическая модель тепловой эрозии поверхности твердого тела, описывающая активационный и безактивационный механизмы перехода конденсированного вещества в паровую фазу, и позволяющая рассчитывать количество испарившегося вещества в широком диапазоне плотности мощности пучка ($10^6..10^{10}$ Вт/см²).

2. Впервые разработана методика расчета коэффициентов эрозии поверхности твердого тела под действием мощных субмикросекундных ионных пучков с энергией частиц 10..1000 кэВ и плотностью мощности

$10^6..10^{10}$ Вт/см², получены новые данные о свойствах эрозии поверхности металлов под действием импульсных ионных и электронных пучков.

3. Впервые исследованы свойства эрозии поверхности металлов при облучении остророфокусированными сканирующими пучками электронов и ионов с энергиями 10..100 кэВ.

4. Впервые разработана математическая модель эрозии поверхности жидкофазных мишеней магнетронных распылительных систем на постоянном токе и с ее помощью получены новые данные о закономерностях усиления интенсивности эрозии в зависимости от мощности разряда.

5. Сделан сравнительный анализ свойств эрозии поверхности под действием мощных пучков заряженных частиц и плазмы магнетронного разряда.

Научная и практическая значимость полученных результатов

1. Создан математический аппарат и набор программ для прогнозирования свойств эрозии поверхности твердого тела под действием мощных пучков заряженных.

2. Определены оптимальные диапазоны параметров мощных импульсных пучков заряженных частиц с начальной энергией 10..1000 кэВ для эрозии поверхности металлов.

3. Исследована эрозия поверхности твердых тел под действием остророфокусированных сканирующих пучков заряженных частиц. Показаны их технологические возможности для удаления вещества с поверхности.

4. Разработана методика прогнозирования темпа осаждения покрытий с использованием мощных пучков заряженных частиц.

5. Установлены механизмы усиления эмиссии атомов с поверхности жидкофазных мишеней магнетронных распылительных систем на постоянном токе. Разработаны методики расчета скорости удаления вещества с поверхности мишеней и роста осаждаемых покрытий.

Научные положения, вынесенные на защиту

1. Разработана корректная модель тепловой эрозии поверхности однородного по структуре твердого тела с учетом фазовых превращений в результате диссипации энергии импульсных пучков заряженных частиц с плотностью мощности $10^6..10^{10}$ Вт/см².

2. Тепловая эрозия является доминирующим механизмом удаления атомов с поверхности под действием мощных ионных и электронных пучков с начальной энергией частиц 10..1000 кэВ, длительностью импульса тока $10^{-8}..10^{-6}$ с и плотностью мощности $10^7..10^{10}$ Вт/см². Значения коэффициентов эрозии достигают $10^3..10^5$ атом/частица. Причем, для любой комбинации «тип частиц - их начальная энергия - длительность импульса тока - вещество мишени» характерен свой максимальный коэффициент эрозии, которому свойственно специфическое значение плотности тока.

3. Остророфокусированные ($50..500$ А/см²) сканирующие пучки заряженных частиц с начальной энергией 10..100 кэВ способны удалять

атомы с поверхности с коэффициентами тепловой эрозии на уровне 10^3 атом/частица, которые нелинейно увеличиваются с ростом плотности мощности пучка и стремятся к некоторому предельному значению.

4. Созданы работоспособные методики оптимизации параметров пучков заряженных частиц в процессе технологической обработки материалов, основанной на удалении частиц с поверхности в режиме тепловой эрозии (осаждение модифицирующих покрытий, радиационное фрезерование, полировка поверхности и т.д.).

5. Разработана корректная модель эмиссии атомов с поверхности жидкофазной мишени магнетронной распылительной системы.

Показано, что нелинейный рост плотности потока эмитируемых атомов связан в основном с интенсивным испарением атомов с поверхности мишени, а коэффициенты эрозии достигают 10^2 атом/ион.

Достоверность полученных результатов подтверждается физической обоснованностью разработанных моделей эрозии, непротиворечивостью полученных результатов, их внутренним единством и соответствием существующим представлениям о радиационно-стимулированных процессах на поверхности твердого тела.

Результаты расчетов количества испарившегося вещества, толщины осаждаемых покрытий, значений плотности энергии для инициации испарения поверхности металлов при использовании субмикросекундных ионных пучков умеренной интенсивности и плазмы магнетронного разряда удовлетворительно согласуются с данными, полученными экспериментально.

Вклад автора. Разработаны модели эрозии и методики прогнозирования результатов обработки поверхности твердого тела импульсными пучками заряженных частиц и плазмой магнетронного разряда. Создан комплекс компьютерных программ, выполнены расчеты и получены все представленные закономерности эрозионных процессов. Проведен анализ полученных результатов.

Апробация работы. Основные результаты диссертации доложены и обсуждены на следующих конференциях и семинарах: на Всесоюзной конференции «Ионно-лучевая модификация материалов» (Черноголовка, 1987), на VII Всесоюзной конференции «Взаимодействие атомных частиц с твердым телом (Москва, 1987), на Международной конференции «Beam Technologies EBT-88» (Варна (Болгария) 1988), на I Всесоюзной конференции «Модификация конструкционных материалов пучками заряженных частиц (Томск, 1988), на III Международной конференции по модификации материалов пучками частиц и энергетическими импульсами (Дрезден, 1989), на Всесоюзной конференции «Новые технологии и робототехнические комплексы при производстве авиационной техники» (Харьков, 1990), на X и XIX Международных конференциях «Взаимодействие ионов с поверхностью» (Звенигород: 1991, 2009), на

Международных конференциях «Новые технологии в машиностроении» (Харьков, 1992, Харьков – Рыбачье, 1993, г. Харьков, 1995), на IV Всероссийской конференции по модификации свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц (Томск, 1996), на 8, 9, 10, 12 и 13 Международных конференциях по радиационной физике и химии неорганических материалов (Томск: 1993, 1996, 1999, 2003, 2006; Астана, 2009), на 2-ой конференции «Модификация свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц» (Томск, 1994), на Втором и Четвертом Российско-Корейских Международных симпозиумах по науке и технологиям (Томск, 1998 (KORUS-98), Ульсан (Корея), 2000 (KORUS-2000)), на Международной конференции «Радиационно-технологические эффекты и процессы в неорганических материалах» (Томск, 1998), на 2-ой Международной конференции «Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах» (Томск, 2000), на Международном конгрессе по радиационной физике, сильноточной электронике и модификации материалов (Томск, 2000), на 7, 9 и 10 Международных конференциях по модификации материалов пучками частиц и потоками плазмы (Томск: 2004, 2008, 2010), на VII Международном Уральском семинаре (Снежинск, 2007), на Российских научно-практических конференциях «Физико-технические проблемы получения и использования пучков заряженных частиц, нейтронов, плазмы и электромагнитного излучения» (Томск: 2007, 2009), на научном семинаре в Институте теплофизики СО РАН (Новосибирск, 2010), на научных семинарах лаборатории 23 ФТИ ТПУ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 45 работ, в том числе 18 статей в рецензируемых изданиях, одно авторское свидетельство на изобретение, одна монография.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Она изложена на 308 страницах, содержит 117 рисунков, 17 таблиц и список цитируемой литературы из 264 наименований.

Краткое содержание работы

Во введении обосновывается актуальность темы, формулируются цели и задачи исследований, представлены научная новизна, практическое значение работы и научные положения, вынесенные на защиту.

В первой главе описаны разработанные нами математические модели эрозии поверхности твердого тела под действием импульсных пучков заряженных частиц с плотностью мощности $10^6..10^{10}$ Вт/см². При таком высоком уровне мощности поверхность твердого тела сильно разогревается и испытывает фазовые превращения, в том числе испарение. Следовательно,

механизмы тепловой эрозии должны играть первостепенную роль в удалении атомов и молекул с облучаемой поверхности.

В основе наших моделей тепловой эрозии лежат механизмы испарения. При этом предполагается, что облучаемое твердое тело имеет однородную субмикроструктуру в приповерхностных слоях, т.е. расчет параметров эрозии производится по усредненным теплофизическим характеристикам, в том числе и по средней поверхностной энергии связи атомов.

Тепловая эрозия есть один из каналов диссипации энергии мощных пучков заряженных частиц в веществе. Следовательно, ее модель является составной частью более общей модели диссипации энергии. Тогда она описывается системой уравнений сплошной среды, решаемых совместно с широкодиапазонными уравнениями состояния вещества. Добавляемые к этой системе уравнений граничные условия задают кинетику перехода конденсированного вещества в паровую фазу. Ее особенности определяются интенсивностью тепловых и гидродинамических процессов, вызываемых бомбардирующими частицами.

Мы выделяем два ярко выраженных типа кинетики перехода конденсированного вещества в паровую фазу. Первый тип создается преимущественно тепловым активационным механизмом испарения с последующим истечением паров от поверхности, характеризующимся слабым взаимодействием их молекул между собой и с молекулами конденсированной фазы. При этом существует четкая межфазная граница между конденсированной и паровой фазами. Этот тип кинетики мы назвали поверхностным испарением. Здесь имеются два уровня. При невысокой плотности мощности энергетического воздействия на мишень испарившиеся частицы разлетаются от поверхности, практически не взаимодействуя друг с другом, т.е. в режиме молекулярного потока. По мере увеличения интенсивности испарения плотность паров вблизи мишени становится довольно высокой, и испарившееся вещество удаляется от поверхности в режиме течения сплошной среды.

Второй тип кинетики создается исключительно безактивационным механизмом с истечением паров от облучаемой поверхности в виде потока сплошной среды. Плотность вещества в окрестности облучаемой поверхности плавно меняется от значения при нормальных условиях до нуля. Переходящие в пар частицы взаимодействуют между собой. При этом четкая граница раздела фаз отсутствует. Этот тип кинетики нами назван гидродинамическим разлетом вещества.

С точки зрения целесообразности математического моделирования тепловых и эрозионных процессов в твердом теле мы разделили пучки заряженных частиц на два вида: умеренной интенсивности и высокоинтенсивные.

При моделировании эрозии под действием пучков умеренной интенсивности нами использовано упрощение системы уравнений сплошной среды. Оно связано с тем, что в этом случае, во-первых, в тонкие приповерхностные слои облучаемой мишени вводится энергия, не

превышающая теплоту сублимации данного вещества; во-вторых, генерируемые вследствие высокоскоростного разогрева волны давлений весьма слабы, и, следовательно, изменением плотности вещества можно пренебречь. Тогда уравнение сплошной среды, описывающее закон сохранения энергии, превращается в уравнение теплопроводности, а переход конденсированного вещества в пар представляет собой поверхностное испарение. Следовательно, математическая модель тепловых и эрозионных процессов в веществе под действием пучков заряженных частиц умеренной интенсивности может быть построена на основе уравнения теплопроводности следующего вида:

$$\frac{\partial E_T(\vec{r}, t)}{\partial t} - v_f(T_S) \frac{\partial E_T(\vec{r}, t)}{\partial z} = \text{div} \left[\lambda \cdot \text{grad}(T(\vec{r}, t)) \right] + W(\vec{r}, t) / c\rho. \quad (1)$$

Здесь начало координат связано с испаряющейся поверхностью. Ось OZ направлена по нормали к облучаемой поверхности в глубь образца.

E_T , T – тепловая составляющая внутренней энергии и температура в конденсированном веществе мишени. Связь между ними определяется следующими соотношениями, позволяющими учесть затраты тепла на плавление:

$$T = \begin{cases} E_T / c\rho, & E_T \leq E_m = c\rho T_m, \\ T_m, & E_m < E_T \leq E_m + q_m\rho, \\ T_m + (E_T - (E_m + q_m\rho)) / c\rho, & E_T > E_m + q_m\rho \end{cases} \quad (2)$$

v_f – скорость фронта испарения (скорость продвижения в глубь образца границы между паровой и конденсированной фазами); λ , c , ρ , T_m , q_m – коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость, плотность, температура плавления и удельная теплота плавления вещества мишени соответственно; T_S – температура поверхности.

$W(\vec{r}, t)$ – пространственно-временная функция энерговыделения при торможении частиц пучка в облучаемом веществе. Она имеет специфический характер для разных видов пучков и зависит как от типа частиц, их энергии, вещества мишени, так и от пространственно-временного распределения плотности тока в пучке.

Начальные условия задают температуру и тепловую составляющую внутренней энергии вещества до облучения.

На границе «конденсированная среда - пар» ($z = 0$) задаются следующие соотношения:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = v_f(T_S) \cdot \rho \cdot (L_0 + \frac{5}{2} nk\bar{T} - 3nkT_S); \quad (3)$$

$$v_f(T_S) = \left(\frac{2\pi kT_S}{m} \right)^{1/2} \frac{1}{\rho} (p_{sat}(T_S) - \bar{p}); \quad (4)$$

$$\bar{T} = 0,65T_S, \quad \bar{n} = 0,31n_{sat}; \quad (5)$$

$$p_{sat} = n_{sat}kT_S; \quad \bar{p} = \bar{n}k\bar{T} = 0,65\bar{n}kT_S. \quad (6)$$

Здесь L_0 – теплота сублимации при 0°K , k – постоянная Больцмана, n – концентрация атомов (молекул) вещества в конденсированной фазе, m – масса атома (молекулы) испаряющегося вещества, $p_{sat}(T_S)$, n_{sat} – давление и концентрация насыщенного пара при температуре T_S на поверхности, \bar{T} , \bar{n} , \bar{p} – температура, концентрация и давление паров перед поверхностью.

Выражение (4) представляет собой уравнение Герца-Кнудсена для скорости испарения. Соотношения (5) – результат решения кинетического уравнения на выходе из кнудсеновского слоя, опубликованный в известной монографии Анисимова С.И., Имаса Я.А., Романова Г.С., Ходыко Ю.В. «Действие излучения большой мощности на металлы».

Система (1)-(6) названа нами двухфазной моделью испарения. Расчеты

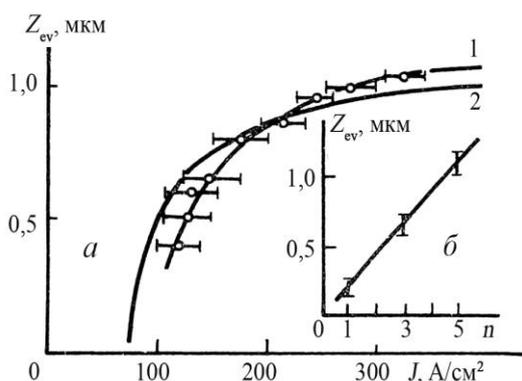


Рис. 1. (а) – зависимость толщины испарившегося слоя кварца (Z_{ev}), облученного смешанным пучком ($50\%\text{H}^+ + 50\%\text{C}^+$) с начальной энергией ионов $E_0 = 500$ кэВ, длительностью импульса $\tau = 150$ нс, от плотности тока J : 1 – эксперимент (выполнен сотрудниками НИИ ЯФ ТПУ), 2 – расчет; (б) – зависимость Z_{ev} от количества импульсов n .

показывают, что она корректно описывает тепловые и эрозионные процессы для плотности мощности пучков заряженных частиц, не превышающей $(1..5) \cdot 10^9$ $\text{Вт}/\text{см}^2$.

При более высокой мощности излучения происходит гидродинамический разлет вещества, изменения плотности облучаемого вещества достаточно велики и оказывают заметное влияние на поле температур. Поэтому расчеты тепловых, термомеханических и эрозионных процессов следует производить совместно, в рамках решения системы уравнений сплошной среды. Эту модель перехода вещества в пароплазменное состояние мы называем гидродинамической.

Мы выработали критерий перехода от одного режима к другому. Это – значение скорости продвижения границы (dZ/dt), на которой тепловая составляющая внутренней энергии вещества мишени равна теплоте сублимации при данной плотности вещества. Расчеты показывают, что при $dZ/dt < 10$ $\text{м}/\text{с}$ корректно работает двухфазная модель испарения, при $dZ/dt \geq 10$ $\text{м}/\text{с}$ – гидродинамическая.

Корректность двухфазной модели испарения подтверждается удовлетворительным согласием рассчитанных по ней зависимостей эрозионных характеристик от параметров пучков и данных, полученных в экспериментах. В качестве примера на рис. 1 и 2 показаны результаты подобного сопоставления.

Разработанные модели тепловой эрозии были использованы нами для исследования свойств эрозии при облучении поверхности мощными импульсными и остросфокусированными сканирующими пучками заряженных частиц.

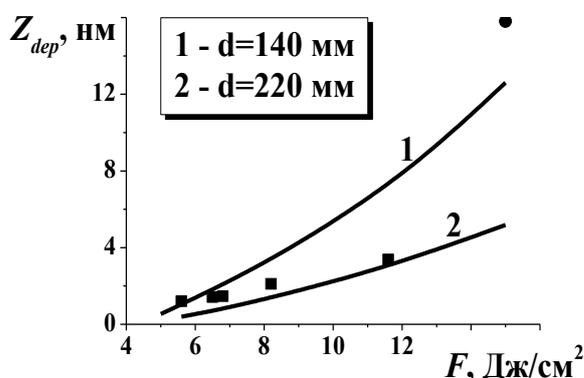


Рис. 2. Зависимость толщины осажденного покрытия (Z_{dep}) за один импульс облучения графитовой мишени ионным пучком от плотности энергии F и расстояния d между мишенью и подложкой (состав пучка: 60% H^+ +40% C^+ , $E_0=500$ кэВ, $\tau =100$ нс, угол падения пучка на мишень (40..45)°, диаметр пучка 50 мм); сплошные линии – расчет; точки – данные эксперимента из [3].

Во второй главе рассмотрены свойства эрозии поверхности под действием мощных субмикросекундных ионных пучков на примере облучения металлов. Параметры пучков находятся в диапазоне, освоенном в настоящее время производителями ускорительной техники, создаваемой для технологических целей. Плотность мощности P подобных пучков составляет $10^7..10^9$ Вт/см² (под P понимается среднее значение в импульсе), начальная энергия ионов $E_0 = 100..1000$ кэВ, длительность импульса тока $\tau = 10^{-8}..10^{-6}$ с, площадь следа пучка на облучаемой поверхности может достигать нескольких десятков

квадратных сантиметров.

В своих исследованиях мы исходим из того, что интегральный поток атомов с облучаемой поверхности представляет собой сумму потоков, обусловленных распылительным и испарительным процессами. Распыление и испарение принципиально различаются по своей природе, поэтому их параметры сложным образом и по-разному зависят от режимов облучения. В этой связи была поставлена задача получить соотношение вкладов обоих компонентов в процесс эрозии поверхности в широком диапазоне параметров пучков, имеющая большое методологическое значение для технологий удаления вещества с поверхности с использованием мощных ионных пучков.

В качестве показателя интенсивности удаления атомов с поверхности твердого тела рассмотрен коэффициент эрозии Y - отношение числа атомов мишени, покинувших поверхность в результате облучения, к количеству частиц в пучке (дозе облучения). Его можно представить как сумму парциальных коэффициентов эрозии, обусловленных испарением D (коэффициент тепловой эрозии) и распылением S (коэффициент распыления):

$$Y = D + S. \quad (7)$$

Очень важным является вопрос о соотношении D и S в зависимости от параметров пучков.

Распылительная составляющая эрозии присутствует при любых режимах облучения ионным пучком, и при невысокой температуре поверхности мишени она является доминирующей. Поэтому проанализировано влияние различных параметров облучения на величину коэффициентов распыления. Отмечено, что для металлов при энергиях ионов порядка сотен килоэлектронвольт они не превышают нескольких десятков атомов на частицу [1], и отсутствует прямая зависимость коэффициентов распыления от плотности тока ионов при тех значениях, для которых производились измерения, т.е. $10^{-6}..10^{-3}$ А/см² [2].

В связи с тем, что исследуется эрозия поверхности в условиях сильного радиационного разогрева, рассмотрено влияние температуры мишени на коэффициент распыления. Изучение этого вопроса привело нас к выводу о том, что в режиме первичного выбивания и линейных каскадов отсутствует прямая зависимость коэффициентов распыления от температуры. В режиме столкновительных пиков, который реализуется при облучении металлов тяжелыми ионами с энергиями порядка 50..100 кэВ, коэффициенты распыления вблизи точки плавления не могут более чем в 40..50 раз, превышать свое значение при комнатной температуре.

По мере наращивания плотности мощности пучка разогрев приповерхностных слоев мишени усиливается и интенсивность испарения возрастает. Следовательно, вклады распыления и испарения должны изменяться. Поведение испарительного компонента в зависимости от параметров пучков и теплофизических свойств мишеней было нами тщательно изучено.

Наши исследования показали, что под действием ионных пучков при $P=10^7..10^8$ Вт/см² тепловая эрозия происходит по активационному механизму испарения, который при $P > (2..5) \cdot 10^8$ Вт/см² переходит в безактивационный. Для расчета параметров тепловых и эрозионных процессов в случае облучения металлов средними и тяжелыми ионами была использована двухфазная модель испарения. В случае протонных пучков возникла необходимость в комбинировании двухфазной и гидродинамической моделей. Учитывая те обстоятельства, что диаметр ионного пучка обычно соизмерим или даже больше размеров облучаемой поверхности, при этом он существенно превышает среднюю длину пробега бомбардирующих частиц в конденсированных средах, а зоны релаксации энергии при торможении частиц перекрываются, так как плотность тока велика, был использован одномерный вариант моделей тепловой эрозии.

Коэффициент эрозии, вызываемой испарением, D вычислялся через толщину испарившегося слоя Z_{ev} , которая находилась в результате счета по двухфазной либо гидродинамической моделям тепловой эрозии. Формула для его расчета имеет следующий вид:

$$D = \frac{Z_{ev} \cdot e \cdot n}{\int_0^{\tau} j(t) dt} \quad (8)$$

Здесь n – ядерная плотность вещества мишени, e – заряд электрона, $j(t)$ – функция изменения плотности тока в течение облучения.

Нами установлено, что в субмикросекундном режиме облучения закономерности эрозионных процессов определяются не только плотностью мощности пучка и длительностью импульса тока, но и свойствами пространственно-временной функции энерговыделения. Она построена на принципе аддитивности энерговыклада от каждой отдельной частицы пучка и имеет следующий вид:

$$W(z, t) = \frac{1}{e} j(t) G(z), \quad (9)$$

где $G(z)$ – пространственное распределение по глубине мишени линейных потерь энергии при прохождении одного иона с начальной энергией E_0 через вещество.

Для модельных расчетов пучки полагались монохроматическими (проверка дала расхождение в эрозионных характеристиках, полученных по средней энергии в спектре и с учетом реального спектрального распределения, которое не превышает 10%). При вычислении пространственного распределения потерь энергии бомбардирующих ионов по глубине $G(z)$ было учтено как электронное, так и ядерное торможение. Для углерода и более тяжелых ионов ядерные и электронные тормозные способности рассчитывались в рамках теории Линдхарда-Шарффа-Шиотта. Для легких ионов ядерные потери также рассчитывались по этой модели. Но при расчете электронных потерь мы использовали экспериментально полученные табличные значения электронных тормозных способностей, так как для легких ионов не существует надежных теоретических методов расчета электронной тормозной способности.

Для ионов в широком диапазоне масс и с $E_0=0,01...1$ МэВ можно выделить два типа конфигураций пространственного распределения линейных потерь их энергии в твердом теле. Они отличаются положением максимума функции $G(z)$. При облучении металлов тяжелыми и средними ионами (C^{n+} , N^{n+} , O^{n+} и т.д.), а также протонами с $E_0 \leq 100$ кэВ, этот максимум находится на поверхности. При торможении протонов в веществе с $E_0 > 0,1$ МэВ он смещается на глубину, ближе к концу пробега. В связи с этим в диапазоне энергий $0,01...1$ МэВ существует довольно существенное различие характеристик испарения в зависимости от массы ионов.

Эмиссия атомов с поверхности за счет активационного механизма испарения происходит при любой температуре. Однако при невысоком разогреве она ничтожно мала. Так как зависимость скорости испарения от температуры носит экспоненциальный характер, на практике эрозия под действием мощных пучков заряженных частиц обнаруживается как пороговый процесс. Для индикации этого порога введено понятие начала заметного испарения. Наши расчеты показывают, что значения плотности мощности (P_b) и плотности энергии пучка (F_b), при которых испарение становится заметным, свои для любой комбинации «ион-мишень» и

длительности импульса. Обнаружилось, что начало заметного испарения на поверхности металлов при облучении ионными пучками субмикросекундной длительности приходится на $P_b=(0,1..5) \cdot 10^7$ Вт/см². В случае облучения

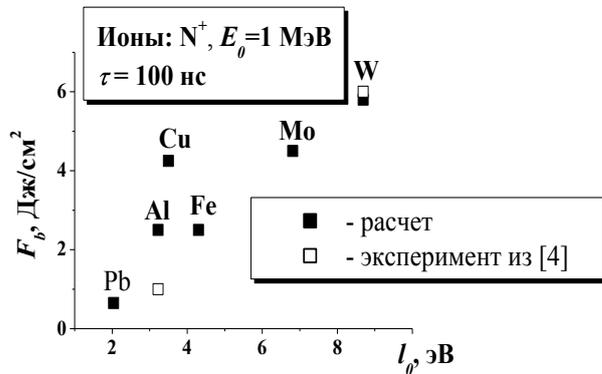


Рис. 3. Значения плотности энергии, при которых наступает заметное испарение металлов (F_b), расположенные в порядке возрастания величины энергии сублимации, приходящейся на один атом (l_0).

тяжелыми и средними ионами с $E_0=0,1..1$ МэВ значения P_b и F_b практически не зависят от начальной энергии частиц. Для протонов же они немного возрастают с увеличением E_0 .

Значения P_b и F_b зависят от теплофизических свойств мишени. Здесь поверхностная энергия связи атомов и коэффициент теплопроводности λ играют определяющую роль. На рис. 3 представлены данные о значениях F_b для ряда металлов в порядке возрастания их l_0 , где l_0 – энергия сублимации при 0°К, приходящаяся на один атом. В целом наблюдается тенденция увеличения F_b с возрастанием поверхностной энергии связи атомов. Однако коэффициент теплопроводности вносит некоторую корректировку.

Оказалось, что развитие испарительного процесса во времени происходит по-разному в зависимости от массы бомбардирующих частиц, их энергии и плотности тока J (под J понимается максимальное значение плотности тока в импульсе). В случае тяжелых и средних ионов этап интенсивного испарения почти полностью приходится на период облучения. Он начинается тем раньше, чем выше J и E_0 . При этом пары не успевают заметно удалиться от мишени в течение облучения и поглощают большую долю энергии пучка. В случае протонов с $E_0 > 0,5$ МэВ (за счет снижения линейных потерь энергии на поверхности с увеличением E_0) интенсивное испарение начинается ближе к концу импульса и происходит значительно дольше после его завершения. Эти обстоятельства во многом обуславливают свойства эрозии.

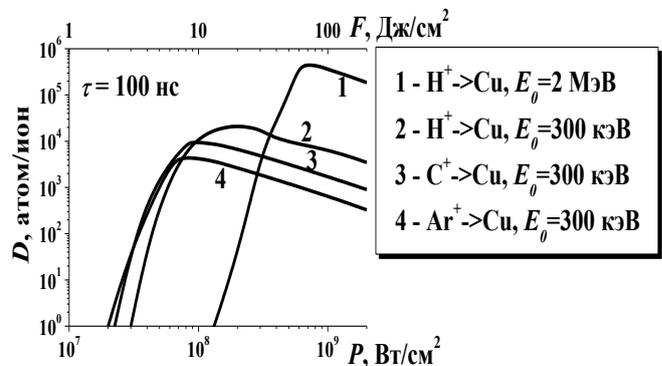


Рис. 4. Зависимость испарительной составляющей коэффициента эрозии поверхности меди от плотности мощности P и плотности энергии F субмикросекундного ионного пучка.

На рис. 4 представлена зависимость коэффициента тепловой эрозии D от плотности мощности и энергии пучка на примере облучения меди различными ионами (здесь и в дальнейшем символы $X^+ \rightarrow Y$ означают, что положительные ионы вещества X бомбардируют мишень из атомов вещества Y). Удаление атомов с поверхности становится особенно интенсивным, когда тепловая составляющая внутренней энергии поверхностных слоев облучаемой мишени приближается к теплоте испарения. Для пучков тяжелых и средних ионов это происходит при значениях плотности мощности на уровне $(0,5..1) \cdot 10^8$ Вт/см². При $E_0 > 100$ кэВ коэффициенты эрозии в результате испарения достигают значений $10^4..10^5$ атом/ион. Для протонного пучка интенсивное испарение приходится на большие значения плотности мощности и энергии пучка, чем для ионов углерода и аргона. Это обстоятельство связано с тем, что линейные потери энергии протонов вблизи поверхности примерно на 1..2 порядка ниже, чем у тяжёлых ионов.

Увеличение P и соответственно F сначала приводит к росту D , но затем,

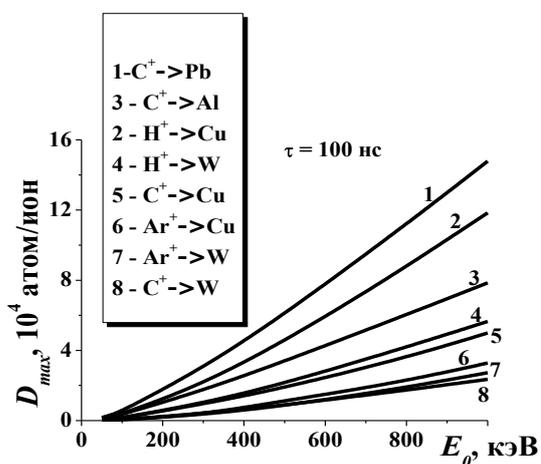


Рис. 5. Максимальные коэффициенты эрозии D_{max} в результате испарения в зависимости от начальной энергии частиц для различных комбинаций «ион – мишень».

после достижения максимума D_{max} , наблюдается спад функций $D(P)$ и $D(F)$ (рис. 4). Он вызван тем, что с ростом P интенсивность образования паров усиливается. Следовательно, доля поглощаемой ими энергии пучка растет. Величина D_{max} , а также значения плотности тока J_{Dmax} и плотности энергии пучка F_{Dmax} , при которых достигается этот максимум, специфичны для разных видов ионов, их начальной энергии и длительности импульса тока. Такая же картина наблюдается и при облучении мишеней из других металлов, другими видами ионов, с иными временной формой и длительностью импульса тока.

Таким образом, любой комбинации, включающей вид ионов, их начальную энергию, временную форму и длительность импульса тока, вещество мишени, соответствует своё максимальное значение коэффициента тепловой эрозии, которое достигается при некотором значении плотности тока J_{Dmax} , специфическом для этой комбинации. Облучение с более высокой, чем J_{Dmax} , плотностью тока нецелесообразно, так как будет увеличиваться доля энергии, которая поглотится парами мишени. Для каждого указанного набора величина D_{max} тем больше, чем больше E_0 . При $E_0 = 100..1000$ кэВ D_{max} достигает $10^4..10^5$ атом/ион. При $E_0 < 100$ кэВ коэффициенты эрозии оказываются на один-два порядка ниже. Чем легче ионы пучка, тем большие значения D_{max} имеют место. Но они обеспечиваются гораздо более высокими значениями плотности тока и энергии пучка, чем при использовании средних

и тяжелых ионов. На рис. 5 приведены зависимости максимальных коэффициентов тепловой эрозии от начальной энергии ионов при длительности импульса 100 нс, рассчитанные для ряда распространенных металлов.

На рис. 6 показано изменение коэффициентов тепловой эрозии меди в зависимости от длительности импульса тока. Наблюдается уменьшение D с ростом τ (при постоянном значении плотности энергии в пучке). Это связано с возрастанием оттока тепла в глубину мишени за счет теплопроводности в период облучения. Заметим, что уменьшение коэффициента эрозии с увеличением длительности импульса тока при одном и том же значении плотности энергии проявляется при обработке мишеней из любых материалов. Однако диапазон длительности импульсов тока, где этот эффект значителен, зависит от способности мишеней проводить тепло. Для металлов уменьшение D заметно даже в субмикросекундном диапазоне. Для веществ с более низкими значениями коэффициента теплопроводности существенное уменьшение коэффициентов эрозии начинает проявляться в микросекундном диапазоне.

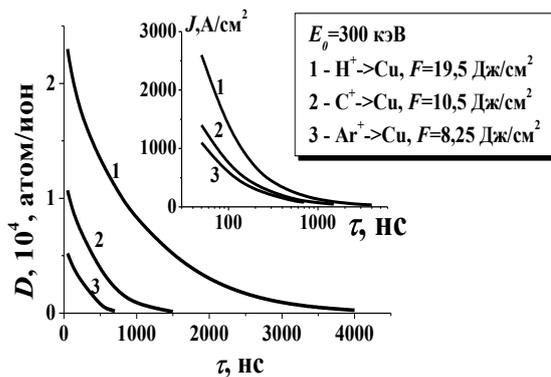


Рис. 6. Зависимость испарительной составляющей коэффициента эрозии D поверхности медного образца и обеспечивающего его значения плотности тока J ионного пучка от длительности импульса тока.

Показано, что в отличие от коэффициентов распыления коэффициенты тепловой эрозии непрерывно уменьшаются с увеличением угла падения пучка на поверхность, отсчитываемого от нормали к ней.

Обнаружено значительное изменение коэффициента эрозии поверхности двухслойной (многослойной) мишени по сравнению со случаем облучения массивной мишени из такого же материала, как и внешний слой (покрытие) сопоставляемой композиции. Этот эффект является следствием изменения стока тепла за счет теплопроводности из приповерхностной области покрытия по сравнению с облучением однородной массивной мишени. Причем, может наблюдаться как увеличение, так и уменьшение D , в зависимости от соотношения коэффициентов теплопроводности веществ покрытия и подложки. Установлено, что степень его изменения при прочих равных условиях зависит от толщины покрытия.

Для выявления режимов облучения, при которых энергоэффективность удаления атомов оказывается наибольшей, было исследовано изменение составляющих баланса энергии пучка в мишени в зависимости от его параметров. Установлено, что в рассматриваемом диапазоне параметров структура баланса энергии имеет следующий вид:

$$K_{ev} + K_{cond} + K_{screen} = 1, \quad (10)$$

где K_{ev} , – доля энергии пучка, расходуемой на нагрев, плавление и испарение тонких приповерхностных слоев мишени; K_{cond} - на нагрев остающейся конденсированной составляющей мишени, включая плавление и распро-

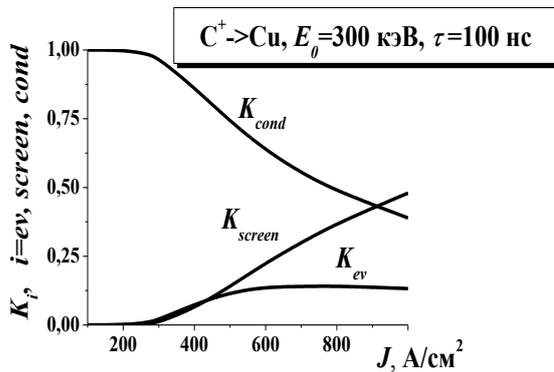


Рис. 7. Изменение составляющих баланса энергии от плотности тока пучка ионов углерода с начальной энергией 300 кэВ при длительности импульса 100 нс.

конденсированной фазы, сокращается за счет того, что испарение наступает раньше и происходит с большей скоростью. В итоге обнаруживается максимум в $K_{ev}(J)$. Он приходится на $J = J_{Dmax}$ и оказывается тем больше, чем выше начальная энергия ионов и короче импульс тока при одной и той же плотности энергии в пучке.

Величина K_{ev} названа нами коэффициентом использования энергии пучка на эрозию и может рассматриваться как показатель энергоэффективности эрозии. Получено, что при облучении металлов субмикросекундными протонными пучками с $E_0=700..1000$ кэВ максимально возможный коэффициент использования энергии пучка на эрозию достигает значений 0,6..0,7. Ионы углерода в диапазоне $E_0=100..1000$ кэВ создают K_{ev} на уровне 0,1..0,4.

Энергия пучка, приходящаяся на один атом, удаленный с поверхности мишени E_a , также является индикатором энергоэффективности эрозии. На рис. 8 показана зависимость $E_a(P)$ при облучении меди протонами и ионами углерода с разной начальной энергией. Использование пучков с более легкими ионами и с большими значениями их начальной энергии при одинаковой плотности мощности понижает удельные затраты энергии пучка на удаление атомов. Нижний предел для E_a – величина поверхностной

странение тепла в холодные слои путем теплопроводности; K_{screen} - на потери энергии бомбардирующих частиц в парах мишени.

На рис. 7 на примере облучения меди ионами углерода приведены зависимости K_{ev} , K_{cond} и K_{screen} от плотности тока пучка. Для других комбинаций параметров субмикросекундных ионных пучков и других металлов качественный вид этих кривых такой же. С возрастанием J увеличивается доля энергии пучка, теряемой в парах. При этом доля энергии, расходуемой на нагрев

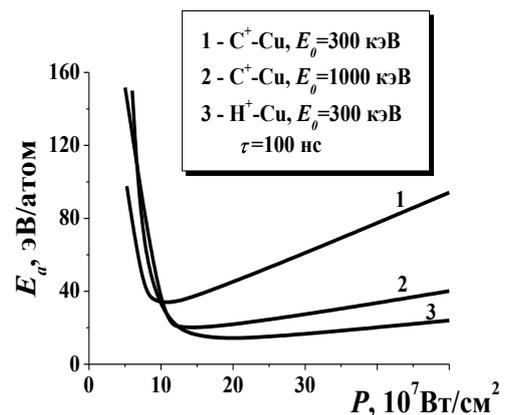


Рис. 8. Энергия пучка, приходящаяся на один удаленный атом вещества мишени (E_a), в зависимости от плотности мощности ионного пучка при облучении меди.

энергии связи атомов. Расчеты показывают, что для субмикросекундного ионного облучения его достижение невозможно, так как значительная, а во многих случаях и почти полная, фаза испарения приходится на период облучения. Поэтому потери энергии пучка в парах неизбежны. Сток тепла из области энерговыделения в течение действия импульса тока также невозможно предотвратить полностью.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что при воздействии на твердое тело импульсных ионных пучков с начальной энергией частиц в диапазоне 0,01..1 МэВ и длительностью импульса тока короче 1 мкс можно выделить три режима эрозии с характерным для каждого из них уровнем радиационного разогрева поверхности. Характеристики режимов эрозии и параметры пучков, при которых они реализуются, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Режимы эрозии металлов при облучении мощными субмикросекундными ионными пучками.

| Режим 1: $Y=S$; $Y < 10^2$ атом/ион | Режим 2: $Y = S + D$; $Y = 10^2..10^3$ атом/ион | Режим 3: $Y = D$; $Y = 10^3..10^5$ атом/ион |
|---|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • легкие ионы с $P < 1 \cdot 10^8$ Вт/см²; • средние и тяжелые ионы с $P < (1..5) \cdot 10^7$; E_0 – любая из заданного диапазона | <ul style="list-style-type: none"> • средние и тяжелые ионы с $E_0 \leq 100$ кэВ, $P \sim (1..5) \cdot 10^7$ Вт/см² | <ul style="list-style-type: none"> • легкие ионы с $P > (1..5) \cdot 10^8$ Вт/см², E_0 – любая из заданного диапазона; • средние и тяжелые ионы с $E_0 > 100$ кэВ, $P > (0,5..1) \cdot 10^8$ Вт/см² |

Первый режим характеризуется тем, что здесь радиационный разогрев поверхности гораздо ниже температуры плавления. Испарение практически незаметно на фоне распыления. Коэффициент эрозии целиком определяется распылением. Эрозия металлов может быть описана в рамках моделей столкновительного распыления.

Второй режим соответствует радиационному разогреву поверхности до температур плавления и немного выше. Здесь вклады распыления и испарения в общий поток атомов, покидающих поверхность в результате облучения, сопоставимы, так как испарение становится весьма ощутимым. Но все же, его интенсивность еще не настолько велика, чтобы оно стало преобладающим механизмом удаления атомов с поверхности. Поэтому математическая модель эрозии должна представлять суперпозицию распыления и поверхностного испарения.

Третий режим эрозии характеризуется тем, что из-за сильного радиационного разогрева (поверхностные слои облучаемого вещества получают тепловую энергию порядка $0,1L_0$ и выше, где L_0 – теплота сублимации при 0°К) интенсивность испарения очень велика. Коэффициенты эрозии достигают чрезвычайно больших величин ($10^4..10^5$ атом/ион). Вклад распылительного компонента не более 1%. Следовательно, при расчете коэффициента эрозии им можно пренебречь и полагать, что только испарительный компонент формирует зависимость коэффициента эрозии от

параметров облучения. Удаление атомов с поверхности металлов должно описываться в рамках моделей тепловой эрозии. Причем, если плотность мощности пучка меньше $(0,5..1) \cdot 10^9$ Вт/см², следует пользоваться двухфазной моделью испарения. При более высокой плотности мощности пучков, в первую очередь протонных, должна использоваться гидродинамическая модель.

Глава 3 посвящена описанию результатов исследования эрозии поверхности металлов под действием мощных импульсных электронных пучков с энергией 10...1000 кэВ. Площадь их следа на облучаемой поверхности составляет 10 см² и больше. В отличие от ионов, здесь практически отсутствует распыление. Основной причиной эрозии является высокоскоростной разогрев приповерхностных слоев вещества, приводящий к фазовым превращениям и генерации волн сжатия и разгрузки. Модельные представления эрозии при импульсном электронном облучении во многом схожи с мощными импульсными ионными пучками. Однако особенности энерговыделения при торможении ускоренных электронов в веществе вносят существенные коррективы в картину эрозионных процессов, полученную для субмикросекундного ионного воздействия. Наиболее существенные отличительные черты их энерговыделения (линейные потери энергии рассчитывались по методу аналитической аппроксимации Макарова) по сравнению с торможением ионов состоят в следующем. Во-первых, глубина проникновения электронов на 2 порядка превышает средний проективный пробег ионов с той же энергией и примерно на один порядок – протонов. Во-вторых, максимум энерговыделения находится на некотором расстоянии от поверхности. В третьих, при одинаковых E_0 величина линейных потерь энергии электронов как на поверхности, так и в максимуме, примерно на 2..3 порядка ниже, чем при торможении средних и тяжелых ионов и примерно на порядок ниже, чем при прохождении протонов. В отличие от средних и тяжелых ионов величина линейных потерь энергии электронов на поверхности и в максимуме несколько уменьшается с ростом их начальной энергии.

При исследовании испарения под действием электронных пучков оказалось, что тип кинетики испарения довольно сильно зависит от начальной энергии частиц. Облучение металлов пучками из низкоэнергетической группы ($E_0 < 100$ кэВ) при $P = 10^6..10^9$ Вт/см² создает поверхностное испарение. Поэтому для них была использована двухфазная модель испарения.

В случае высокоэнергетических пучков ($E_0 = 100..1000$ кэВ) поверхностное испарение имеет место только при $P < (1..5) \cdot 10^9$ Вт/см². При более высоких значениях плотности мощности развивается гидродинамический разлет вещества. Поэтому расчеты производились как по двухфазной, так и по гидродинамическим моделям испарения.

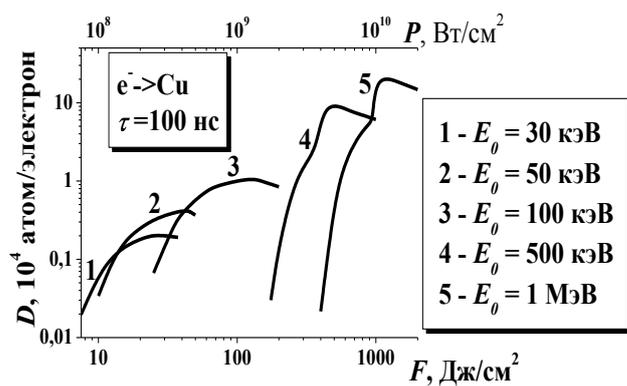


Рис. 9. Зависимость коэффициентов эрозии поверхности меди от плотности мощности и плотности энергии электронных пучков с разной начальной энергией частиц.

$P > (0,5..1) \cdot 10^{10}$ Вт/см² в облучаемом веществе развиваются мощные волны сжатия и разгрузки, и большая доля энергии, введенная в вещество, затрачивается на увеличение «холодной» составляющей внутренней энергии. Поэтому все кривые $D(P)$ имеют максимум (рис. 9).

Максимальное значение коэффициента эрозии D_{max} , как и в случае ионного облучения, достигается при некотором значении P_{Dmax} (и F_{Dmax}), специфическом для разных комбинаций начальной энергии пучка и длительности импульса тока. Чем выше начальная энергия электронов, тем большей величины D_{max} можно добиться.

На рис. 10 содержатся зависимости D_{max} от начальной энергии электронов, протонов и ионов углерода длительностью 100 нс. При одинаковой энергии частиц наибольшие коэффициенты эрозии имеют место в случае электронных пучков. Однако значения плотности энергии, обеспечивающие D_{max} у них на 1-2 порядка выше, чем в случае ионов с аналогичными значениями E_0 .

Структура баланса энергии в мишени при облучении импульсными электронными пучками с $E_0 = 10..1000$ кэВ отличается от случая ионов тем, что здесь доля энергии пучка, уносимой отраженными электронами, является довольно значительной (до 0,15..0,2 при $E_0 = 10..100$ кэВ в зависимости от атомного номера вещества мишени, с увеличением E_0 коэффициент отражения энергии уменьшается). В диапазоне 10...1000 кэВ потери энергии

Эволюция испарения происходит по-разному в зависимости от E_0 . Если для пучков из низкоэнергетической группы, как и в случае ионов, основной этап испарения приходится на период действия импульса тока, то для высокоэнергетических пучков совсем иная картина: переход вещества в пар почти полностью происходит после прекращения облучения. Это означает, что потери энергии высокоэнергетического пучка в парах должны быть малы. Однако этого не происходит, так как при

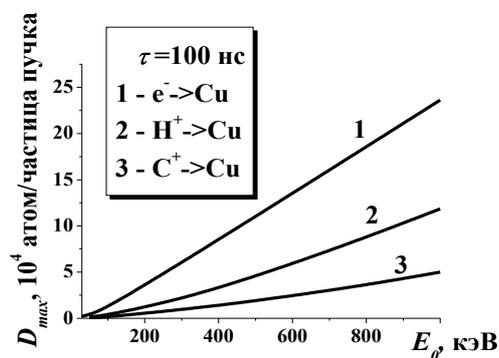


Рис. 10. Максимальные коэффициенты эрозии поверхности медной мишени D_{max} в зависимости от начальной энергии частиц в пучке E_0 .

электронов на тормозное излучение хотя несравненно выше, чем при ионном облучении, но ими можно пренебречь (например, даже в свинце при $E_0=1$ МэВ они на порядок ниже ионизационных потерь).

На рис. 11 показано изменение доли энергии пучка, расходуемой на испарение (K_{ev}), и энергии пучка, приходящейся на один атом, удаленный с поверхности (E_a), с увеличением начальной энергии электронов. Здесь расчеты K_{ev} и E_a сделаны при плотности тока, обеспечивающей достижение D_{max} . Как и в случае субмикросекундного ионного облучения, максимальные значения K_{ex} увеличиваются с ростом E_0 и с уменьшением длительности импульса тока. При $E_0=1$ МэВ они могут достигать значений, близких к 0,8. Наименьшие значения E_a возникают, когда вещество переходит в паровую фазу в режиме гидродинамического разлета. Они приближаются к энергии сублимации вещества мишени, приходящейся на один атом, и имеют место для электронных пучков с $E_0=500..1000$ кэВ.

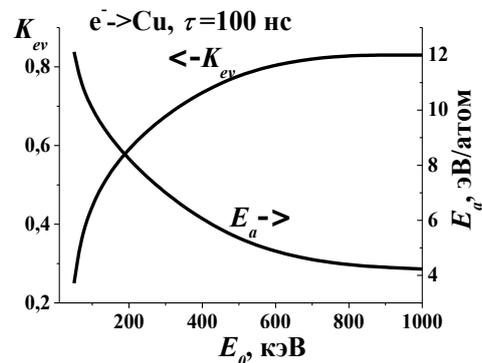


Рис. 11. Зависимость доли энергии электронного пучка, уносимой испаренным веществом (K_{ev}), и энергии, приходящейся на один атом, удаленный с поверхности (E_a), от начальной энергии электронов E_0 ; расчет выполнен на примере облучения медной мишени с плотностью тока, соответствующей $J_{Dmax}(E_0)$.

Результаты расчетов свидетельствуют о том, что субмикросекундные электронные пучки способны превосходить по энергоэффективности ионные пучки при одинаковых значениях E_0 . В таблице 2 содержатся расчетные данные, позволяющие сравнить способности субмикросекундных ионных и электронных пучков в создании тепловой эрозии поверхности металлов.

Таблица 2. Показатели тепловой эрозии поверхности металлов под действием субмикросекундных электронных и ионных пучков.

| Наименование показателей | Электронные пучки с $E_0=100..1000$ кэВ и $\tau = 100$ нс | Пучки средних и тяжелых ионов с $E_0=100..1000$ кэВ и $\tau=100$ нс | Пучки протонов с $E_0=100..1000$ кэВ и $\tau = 100$ нс |
|---|---|---|--|
| Начало заметного испарения: | | | |
| $P_b, (Вт/см^2) / F_b, (Дж/см^2)$ | $10^8..10^9 / 10^1..10^2$ | $(1..10) \cdot 10^7 / 1..10$ | $(5..20) \cdot 10^7 / 5..20$ |
| Показатели эрозии в режимах облучения, обеспечивающих наибольшую интенсивность и энергоэффективность: | | | |
| $P_{Dmax} (Вт/см^2)$ | $10^9..10^{10}$ | $(5..20) \cdot 10^7$ | $10^8..10^9$ |
| $F_{Dmax} (Дж/см^2)$ | $100..1000$ | $5..20$ | $10..100$ |
| $D_{max} (атом/частица пучка)$ | $10^4..10^5$ | $10^3..10^4$ | $10^4..10^5$ |

| Наименование показателей | Электронные пучки с $E_0=100...1000$ кэВ и $\tau = 100$ нс | Пучки средних и тяжелых ионов с $E_0=100..1000$ кэВ и $\tau=100$ нс | Пучки протонов с $E_0=100...1000$ кэВ и $\tau = 100$ нс |
|--|--|---|--|
| Толщина удаленного слоя, (м) | $10^{-5}..10^{-4}$ | $10^{-7}..10^{-6}$ | $10^{-6}..10^{-5}$ |
| Коэффициент использования энергии пучка на удаление атомов | 0,5..0,8 | 0,1..0,3 | 0,3..0,7 |
| Энергия пучка, приходящаяся на один удаленный атом, эВ | < 10 | 20..40 | < 20 |
| Кинетика испарения | Гидродинамический разлет вещества; | Поверхностное испарение; | Поверхностное испарение, граничащее с гидродинамическим разлетом вещества. |

Таким образом, свойства эрозии поверхности под действием мощных импульсных электронных пучков в качественном отношении аналогичны случаю субмикросекундных пучков ионов, но в количественном отношении имеются различия. В случае электронов максимальные значения показателей интенсивности и энергоэффективности тепловой эрозии оказываются более высокими, хотя они соответствуют большим значениям плотности мощности и плотности энергии пучка. Толщина удаленного слоя в результате однократного облучения электронным пучком на 1..2 порядка выше, чем при ионном облучении с теми же значениями начальной энергии частиц.

В четвертой главе представлены результаты исследования возможностей остророфокусированных сканирующих пучков заряженных частиц для создания интенсивной эрозии поверхности, выявлению ее закономерностей в зависимости от параметров пучков.

За основу были взяты параметры пучков, создаваемых электронными пушками с плазменным катодом, описанные в монографии [5]. Ускоряющее напряжение у них достигает 50 кВ, ток – до 0,1 А.

Устройства, производящие низкоэнергетические пучки заряженных частиц непрерывного действия, являются более простыми и надежными. Они имеют стабильные рабочие параметры. Поэтому расширение их функциональных возможностей в обработке материалов представляет большой практический интерес для промышленного использования. В частности, если пучок непрерывного действия невысокой мощности, ток которого не превышает сотен миллиампер, сжимать в пространстве, т.е. производить его фокусировку до радиуса поперечного сечения менее 1 мм, то достигаются значения плотности мощности, близкие к случаю ранее рассмотренных мощных импульсных пучков.

Тепловое и эрозионное действие подобных пучков на вещество в чем-то совпадает с мощными импульсными пучками с большим неподвижным следом, но также имеются существенные различия. С одной стороны, быстрое перемещение сфокусированного пучка вдоль обрабатываемой поверхности создает как бы импульсный характер энергетического воздействия на любой ее элемент. С другой – область поверхности, единообразно подверженной облучению, на порядки меньше, чем при использовании мощных микро- и субмикросекундных пучков.

Для сканирующего сфокусированного пучка основными его параметрами являются начальная энергия частиц E_0 при их попадании на поверхность, ток в пучке I , радиус следа на поверхности образца r , скорость перемещения следа по поверхности V_x .

При построении математической модели эрозии под действием сфокусированных сканирующих пучков мы исходили из того, что она вызывается испарением в случае электронов и является совокупностью распыления и испарения для ионных пучков. Но ранее было установлено, что распылительный компонент при плотности мощности выше 10^6 Вт/см² гораздо слабее испарительного. Поэтому моделирование эрозии под действием сфокусированных сканирующих пучков в первую очередь связано с описанием испарения.

Плотность мощности рассматриваемых пучков существенно ниже 10^9 Вт/см², поэтому была использована двухфазная модель испарения.

Отличительные особенности эрозии в случае сканирующего сфокусированного пучка связаны с тем, что выделение энергии его частиц на поверхности локализовано в некотором очень маленьком пятне радиусом r . Причем это пятно быстро перемещается по поверхности. Поэтому в общем случае здесь должна решаться трехмерная краевая задача на основе уравнения теплопроводности. Однако ее двумерная постановка в декартовых координатах может быть корректной, если предположить следующее:

1) радиус r следа пучка на поверхности гораздо больше глубины проникновения R его частиц в вещество ($r \gg R$) вдоль оси OZ , совпадающей с нормалью к поверхности;

2) пучок движется прямолинейно по поверхности (вдоль оси OX);

3) скорость его перемещения такова, что за время присутствия следа пучка на любом элементе поверхности тепло не успевает заметно распространиться из зоны энерговыделения в направлении оси OY , перпендикулярном направлению движения пучка ($V_x \gg 2a/r$, где V_x – скорость движения следа пучка вдоль поверхности, a – коэффициент температуропроводности облучаемого материала). Заметим, что именно такую скорость сканирования следует использовать, так как в этом случае потери энергии из области энерговыделения, обусловленные теплопроводностью, будут небольшими.

Тогда задача расчета пространственно-временного температурного поля и количества испаряющегося вещества под действием сфокусированного сканирующего пучка принимает следующий вид:

$$\frac{\partial E_T(x, z, t)}{\partial t} - v_f(T) \frac{\partial E_T(x, z, t)}{\partial z} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T(x, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, z, t)}{\partial z^2} \right) + W(x, z, t). \quad (11)$$

Начальные и граничные условия задаются соотношениями (3)-(6).

Функция энерговыделения $W(x, z, t)$, создаваемая пучком, движущимся по поверхности вдоль оси ОХ со скоростью V_X и имеющим в сечении нормальное распределение плотности тока, представляется выражением:

$$W(x, z, t) = G(z) \cdot \frac{1}{e} J_{\max} \exp \left(- \frac{(x - X_C(t))^2}{2r^2} \right), \quad (12)$$

где $G(z)$ – линейные потери энергии тормозящейся частицы пучка по нормали к поверхности мишени, e – заряд электрона, $X_C(t)$ – координата центра следа в текущий момент времени; $J_{\max} = (I/(2\pi r^2))$, где I – полный ток в пучке.

Если пучок движется вдоль поверхности с постоянной скоростью и при этом его ток, радиус поперечного сечения и энергия частиц не изменяются, то относительно центра следа формируется стационарное температурное поле, и параболическое уравнение теплопроводности фактически становится эллиптическим. Однако методом решения этой стационарной задачи является счет на установление нестационарной задачи на основе уравнения (11). Поэтому она принята за основу.

Оценочные расчеты показали, что плотность паров, находящихся перед любым элементом поверхности во время действия на него следа пучка, перемещающегося со скоростью 0,1..100 м/с, ничтожно мала по сравнению с плотностью конденсированного вещества. Следовательно, потери энергии пучка в парах незначительны по сравнению с той энергией, которая передается конденсированной фазе мишени. Это обстоятельство оказывает большое влияние на зависимости показателей эффективности эрозии от параметров облучения.

Количество энергии E_{beam} , передаваемой от пучка каждому элементу поверхности, равно $(E_0 I) / (\sqrt{2\pi} \cdot V_X \cdot r)$, т.е. заметное испарение материала будет происходить, если скорость сканирования ниже некоторой предельной величины $V_{хир}$. Также должно иметь место ограничение скорости сканирования снизу V_{xb} , которое связано с тем, что при слишком медленном перемещении пучка вдоль поверхности значительная доля его энергии будет уходить из области энерговыделения в результате теплопроводности. Тогда доля энергии пучка, потраченная на испарение, сократится. За V_{xb} можно принять скорость перемещения следа, при которой размер области распространения тепла за время его прохождения по любому элементу поверхности соизмерим с радиусом следа, т.е. $V_{xb} \approx 2a/r$.

При одной и той же начальной энергии частиц, постоянном времени присутствия следа пучка на каком-либо элементе поверхности ($t_{beam} = 2r/V_X$) и равных значениях J_{max} оказывается, что скорости испарения, толщины испарившегося слоя и коэффициенты эрозии примерно равны. Это

обусловлено тем, что количество переданной энергии любому облученному элементу поверхности, плотность мощности и пространственное распределение энерговыделения по глубине мишени постоянны.

Из-за того, что потери энергии острогофокусированного сканирующего пучка в парах малы по сравнению энергией, передаваемой конденсированному веществу, зависимость коэффициента эрозии от плотности тока качественно отличается от поведения $D(J)$ под действием мощных пучков заряженных частиц с относительно большим неподвижным следом. Для острогофокусированных сканирующих пучков коэффициент эрозии D увеличивается с ростом плотности тока при небольших J_{max} , а затем, по мере его усиления, выходит на насыщение, стремясь к постоянному значению D_{lim} , своему для разных значений t_{beam} и веществ мишени (рис. 12). Значение D_{lim} соответствует гипотетическому случаю, в котором энергия всех частиц пучка расходуется на испарение. В реальности значения D_{lim} недостижимы, так как в период действия пучка на любой элемент поверхности, находящийся на его пути, часть энергии успевает уйти из зоны торможения частиц за счет теплопроводности. Кроме того, нужно затратить энергию некоторого количества частиц пучка на нагрев вещества до температуры, при которой испарение станет заметным. Но степень приближения к D_{lim} является индикатором эффективности эрозии.

Например, для железа наибольшие коэффициенты эрозии в диапазоне энергий электронов, не превышающих 50 кэВ, составляют величины порядка $(1..5) \cdot 10^3$ атом/электрон. Установлено, что при одинаковой начальной энергии электронов коэффициенты эрозии в случае острогофокусированных сканирующих пучков оказываются в несколько раз выше, чем для микросекундных с неподвижным следом. Этот результат объясняется почти полным отсутствием потерь энергии острогофокусированного сканирующего пучка в парах вещества мишени.

В рассматриваемом режиме обработки баланс энергии низкоэнергетического электронного пучка на любом элементе поверхности можно представить следующим образом:

$$K_{ev} + K_{cond} + K_{ref} = 1, \quad (13)$$

где K_{ev} – доля энергии пучка, расходуемой на нагрев, плавление и испарение тонких приповерхностных слоев мишени; K_{cond} – доля энергии пучка,

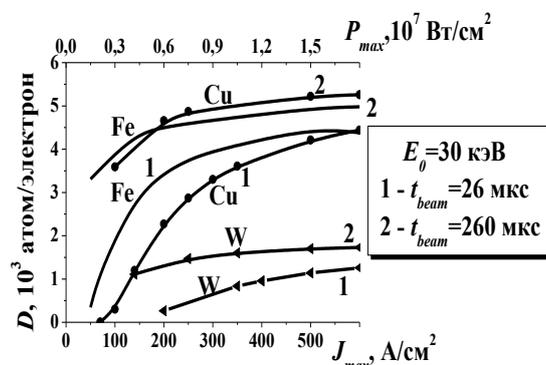


Рис. 12. Зависимость коэффициента эрозии поверхности мишеней из разных металлов от плотности тока J_{max} электронного пучка при различных значениях t_{beam} .

расходуемая на нагрев остающейся конденсированной фазы вещества мишени, K_{ref} – доля отраженной энергии.

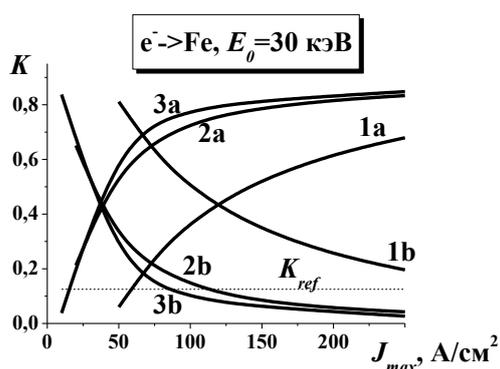


Рис. 13. Составляющие баланса энергии в зависимости от плотности тока остросфокусированного сканирующего электронного пучка при разных значениях t_{beam} (мкс): 26 (1), 260 (2), 520 (3); здесь (a) – K_{ev} , (b) – K_{cond} .

На рис. 13 на примере железа показано изменение составляющих баланса энергии в зависимости от плотности тока в следе пучка и времени его воздействия на элемент поверхности. С увеличением J_{max} быстро возрастает та часть энергии пучка, которая идет на нагрев и испарение вещества. Причем она стремится к своему предельному значению $K_{lim} = 1 - K_{ref}$.

В диапазоне $V_x > 2a/r$, т.е. когда распространение тепла в течение t_{beam} мало по сравнению с размерами следа пучка, уменьшение V_x приводит к

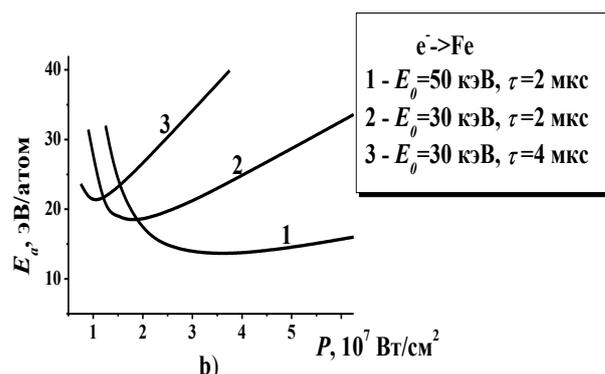
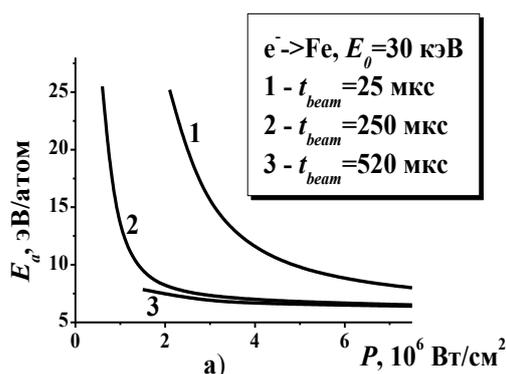


Рис. 14. Энергия пучка, расходуемая на удаление одного атома (E_a) с поверхности железной мишени, в зависимости от плотности мощности: а) – сфокусированного сканирующего электронного пучка; б) – неподвижного мощного импульсного электронного пучка.

росту D и K_{ev} , так как элемент поверхности получает больше энергии, затрачиваемой на удаление атомов. Поэтому для любого значения J_{max} величина K_{ev} тем выше, чем больше t_{beam} .

Приведенные выше результаты демонстрирует тот факт, что в режимах облучения, при которых потери энергии пучка в парах ничтожно малы, для повышения эффективности использования его энергии на эрозию однозначно следует добиваться увеличения плотности тока J_{max} . При этом не важно, за счет чего это будет производиться - за счет увеличения I или уменьшения r .

На рис. 14 представлены зависимости количества энергии пучка, приходящейся на один атом, удаленный с поверхности (E_a), от плотности мощности пучка. Результаты относятся к двум видам электронных пучков:

остросфокусированному сканирующему и неподвижному микросекундному. Отсюда видно, что в первом случае E_a гораздо меньше. Такая ситуация обусловлена малыми потерями энергии остросфокусированного сканирующего пучка в парах, в отличие от облучения мощным импульсным пучком, где эти потери могут быть весьма значительны.

Таким образом, при облучении поверхности электронным пучком с энергией частиц $E_0=10...100$ кэВ и с фокусировкой, дающей $r \leq 500$ мкм, достижимы значения K_{ev} , превышающие 0,8. Этот результат гораздо выше максимально возможной энергоэффективности эрозионной обработки металлов, производимой с помощью сканирующего луча лазера, а также с помощью мощных субмикросекундных пучков заряженных частиц.

Выполнено сравнение производительности обработки поверхности двумя видами электронных пучков: остросфокусированным сканирующим и неподвижным импульсным. В качестве критерия производительности взято отношение:

$$g = \frac{t_S}{t_F} = \frac{S_F Z_{evF}}{2r \cdot V_X \cdot Z_{ev} \cdot \tau_F}, \quad (14)$$

где t_S и t_F – время, необходимое остросфокусированному сканирующему и неподвижному импульсному пучкам соответственно для удаления одинакового количества вещества с одинаковой площади поверхности (предполагается, что обрабатываемая площадь не меньше площади следа неподвижного пучка); S_F – площадь следа неподвижного пучка, Z_{evF} – толщина испарившегося слоя за один импульс, τ_F – период следования импульсов электронного пучка с неподвижным следом. Оказалось, что остросфокусированный сканирующий пучок может быть более выгодным инструментом для удаления вещества с поверхности металлов и по производительности обработки (рис. 15).

Относительно зависимости коэффициента эрозии от энергии частиц необходимо заметить, что для остросфокусированных сканирующих пучков наблюдается та же закономерность, что и при облучении мощными импульсными пучками: чем больше начальная энергия частиц, тем интенсивнее они испаряют вещество при одинаковой плотности мощности. Что же касается коэффициента использования энергии пучка на испарение, то при $E_0=(10...50)$ кэВ его значение мало зависит от энергии частиц, а определяется величиной плотности мощности.

Исследовалось испарение металлов остросфокусированными сканирующими ионными пучками с такими же параметрами. Более высокие

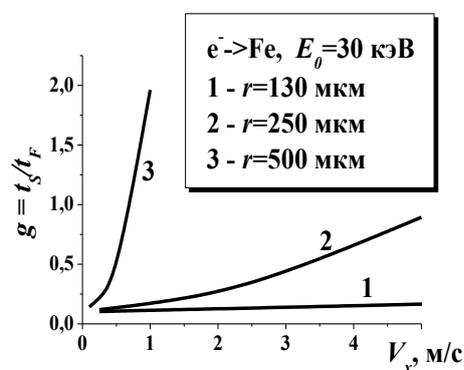


Рис. 15. Изменение g - критерия производительности электронного остросфокусированного сканирующего пучка по отношению к неподвижному импульсному с увеличением скорости сканирования V_x и радиуса следа r ; здесь $E_0=30$ кэВ для обоих пучков, $\tau_F = 1$ с.

значения показателей эрозии (примерно на 10..20%) по сравнению со случаем электронов вызваны меньшим отражением энергии бомбардирующих ионов от поверхности.

В пятой главе рассмотрена роль процессов тепловой эрозии в технологиях обработки материалов, основанных на удалении вещества с поверхности под действием мощных импульсных пучков заряженных частиц. Второй задачей (и очень важной) был сбор результатов экспериментальных исследований характеристик тепловой эрозии и проведение их сравнения с результатами наших расчетов. Это дало возможность сделать оценку степени надежности разработанных нами моделей.

Здесь также представлены разработанные нами методики для решения некоторых технологических задач, позволяющие расчетным путем определять результаты обработки по заданным параметрам облучения и находить оптимальные параметры пучков.

В разделе 5.1 рассмотрено использование мощных импульсных пучков заряженных частиц в технологиях осаждения покрытий. Проанализированы полученные в экспериментах особенности осаждения покрытий в этом случае. Они во многом обусловлены высокоскоростным удалением вещества с облучаемой поверхности. Данное обстоятельство свидетельствует в пользу гипотезы о том, что потоки осаждаемого вещества вероятнее всего создаются в результате интенсивного испарения.

Представлена методика нахождения темпа осаждения покрытий на основе данных о скорости получения эрозионного материала на поверхности облучаемой мишени. Темп осаждения, т.е. толщина пленки, осаждаемой в результате одного импульса тока пучка, является очень важным технологическим параметром, который во многом определяет производительность и энергоэффективность технологий осаждения покрытий, использующих импульсные источники энергетического воздействия на вещество. Поэтому расчетная методика, позволяющая предсказывать эту характеристику в зависимости от параметров облучения, может оказаться востребованной при разработке подобных технологий.

Эта методика построена на представлении о том, что вещество, испаряющееся с облучаемой поверхности мишени со скоростью $v(t)$ и удаляющееся от нее в режиме течения сплошной среды или как молекулярный пучок, осаждается на подложке, расположенной параллельно к поверхности мишени на расстоянии L (наклон подложки может быть легко учтен). Угловое распределение интенсивности I испаренного потока, распространяющегося от мишени в режиме молекулярного пучка, описывается законом косинуса. В случае распространения эрозионного материала в режиме течения сплошной среды для I может быть использована следующая зависимость:

$$I(\varphi) \sim \exp(-n\varphi), \text{ где } 3 \leq n \leq 4,3. \quad (15)$$

Она получена в экспериментах и опубликована в работе [6]. Здесь угол φ отсчитывается от нормали к поверхности мишени. Ширина распределения

(15) должна характеризоваться половинным углом $\varphi_{1/2}$ ($(2 \cdot \varphi_{1/2})$ – угол раствора конуса, на боковых поверхностях которого интенсивность потока эрозионного материала уменьшается в e раз по сравнению с $\varphi = 0^\circ$).

Мы предложили следующую формулу для расчета темпа осаждения Z_{dep} :

$$Z_{dep}(x, y) = \frac{1}{\rho_f} \int_0^{t_{end}} dt \int_{S_C} v_{depi}(x, y, t) dS_i, \quad (16)$$

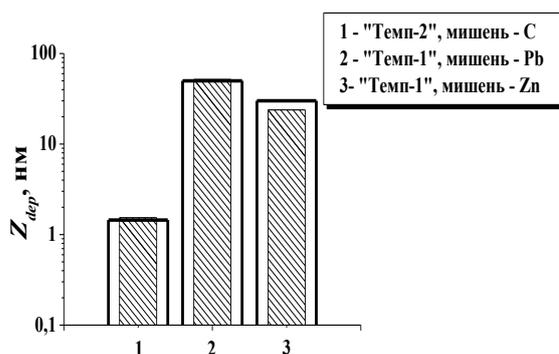


Рис. 16. Темп осаждения металлических и графитовых покрытий с использованием ионных ускорителей «Темп-1» и «Темп-2»: заштрихованные столбцы – расчет, прозрачные – результаты эксперимента из [6] (для 1) и из [7] (для 2 и 3).

где $v_{depi}(x, y, t)$ – плотность потока осаждаемого вещества на подложке в точке (x, y) при его испарении из площадки dS_i в момент времени t ; t_{end} – время окончания испарения; S_C – площадь следа пучка на поверхности мишени; ρ_f – плотность пленки, которая в расчетах принималась равной плотности испаряемого вещества. Значение $v_{depi}(x, y, t)$ рассчитывается по данным о скорости испарения v с площадки dS_i на поверхности мишени в момент времени t с учетом выражения, описывающего диаграмму направленности эрозионного материала. Для нахождения v была использована двухфазная модель испарения.

Проанализированы результаты расчета темпа осаждения (Z_{dep}) покрытий из графита и некоторых металлов в зависимости от параметров субмикросекундных ионных пучков, генерируемых на современных ускорителях. Оказалось, что значения Z_{dep} , рассчитанные с помощью разработанной нами модели тепловой эрозии и методики для расчета темпа осаждения, довольно близки к значениям, полученным в экспериментах (в порядке примера на рис. 2 и рис. 16 приведены результаты подобного сопоставления). Это обстоятельство свидетельствует о том, что: 1) здесь действительно «работает» механизм тепловой эрозии, заложенный в двухфазную модель испарения, на основе которой выполнен расчет удаления атомов с поверхности мишени; 2) сама модель с весьма высокой точностью описывает эрозию; 3) разработанная методика расчета темпа осаждения является пригодной для прогнозирования скорости роста покрытий и оценки производительности технологии.

Рассмотрен вопрос о производительности осаждения металлических покрытий при использовании частотно-импульсных установок. На рис. 17 приведены рассчитанные зависимости темпа осаждения и технологической скорости получения различных металлических пленок от плотности энергии пучка ускорителя «Темп-2» [6]. При частоте следования импульсов

(5..10) мин⁻¹ (0,08..0,17 Гц) скорость роста металлических пленок составляет примерно (5..50) нм/с.

Показано, что в частотно-импульсном режиме работы ускорителя зависимость толщины осажденного покрытия от количества импульсов является линейной, если частота следования импульсов ν гораздо меньше 10^5 Гц. При $\nu > 10^6$ Гц темп осаждения может уменьшиться из-за того, что пары не будут успевать разлетаться от поверхности мишени между импульсами, и тогда потери энергии пучка в них увеличатся.

На основе результатов расчетов сделан вывод о том, что мощные импульсные электронные пучки с $E_0 > 10$ кэВ при плотности мощности выше 10^6 Вт/см² могут использоваться в технологиях осаждения модифицирующих покрытий. Причем, в случае низкоэнергетических электронных пучков темп осаждения соизмерим с возможностями ионных пучков с $E_0 = 100..1000$ кэВ. В случае электронных пучков из высокоэнергетической группы он оказывается на один - два порядка выше. Однако для этого они должны обладать гораздо более высокой плотностью энергии по сравнению с субмикросекундными ионными пучками.

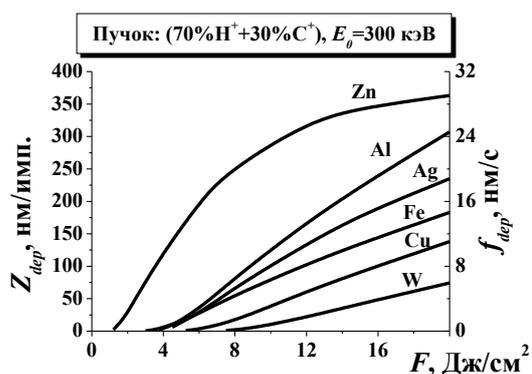


Рис. 17. Зависимости темпа (Z_{dep}) и технологической скорости ($f_{dep} = Z_{dep} \nu$) осаждения различных металлических пленок от плотности энергии пучка ионного ускорителя типа «Темп-2» с $E_0 = 300$ кэВ, $\tau = 70$ нс, $\nu = 0,08$ Гц.

В разделе 5.2 показана возможность использования тепловой эрозии, создаваемой под действием мощных пучков заряженных частиц, в задачах микрорельефной обработки поверхности твердого тела.

Формирование заданного микрорельефа поверхности рассмотрено на примере обработки тонких кварцевых пластин мощными ионными пучками с целью создания обратных мезаструктур. Подобные изделия являются основными элементами высокочастотных кварцевых пьезорезонаторов.

Особенность кварца состоит в том, что при нагревании до температуры выше 573°C в нем происходит превращение α -фазы, которая обладает пьезоэлектрическими свойствами, в β -фазу, эти свойства теряющую. Поэтому была поставлена задача найти такие параметры облучения, при которых процесс обработки обладал бы наибольшей производительностью, но при этом толщина нежелательной β -фазы была бы минимальной.

С помощью двухфазной модели испарения было установлено, что при облучении поверхности кварца в режимах, обеспечивающих достижение достаточно больших толщин испарившегося слоя, можно добиться того, что толщина слоя β -фазы будет приемлемой, т.е. не превышающей нескольких

длин проективного пробега ускоренных ионов. Оптимальные значения энергии ионов лежат в пределах 0,5...1 МэВ, плотности тока - 100...1000 А/см², длительность импульса – 100...200 нс.

В разделе 5.3 сделана оценка роли испарения в сглаживании микрорельефа поверхности при облучении импульсными пучками заряженных частиц. Для этого был разработан двумерный вариант модели поверхностного испарения, предусматривающий наличие выступов на облучаемой поверхности. Показано, что импульсные ионные пучки субмикросекундной длительности с начальной энергией частиц 100..1000 кэВ и плотностью мощности 10⁷..10⁹ Вт/см² способны заметно сглаживать микрорельеф поверхности металлов с высотой пиков до 10 мкм. Причем, существенный вклад в сглаживание вносит механизм преимущественного испарения вершин микропиков по сравнению с впадинами. Эффективность сглаживания зависит как от плотности мощности, так и от начальной энергии частиц, оптимальное значение которых определяется высотой пиков (максимальное уменьшение высоты микропиков имеет место, если размер области энерговыделения составляет 10..30% от высоты пика).

При облучении импульсными электронными пучками данный механизм сглаживания проявляется гораздо слабее. Для пучков микросекундной длительности с плотностью энергии на уровне единиц джоулей на квадратный сантиметр он практически не работает.

В шестой главе описаны свойства эрозии поверхности жидкофазных мишеней магнетронных распылительных систем (МРС). Сходство этого явления со случаем облучения поверхности твердого тела мощными пучками заряженных частиц состоит в том, что здесь тоже имеет место нелинейное возрастание интенсивности эрозии по мере увеличения мощности магнетрона, которое обусловлено развитием испарения. При этом значительная доля энергии ионов, эстрагируемых из плазмы магнетронного разряда и бомбардирующих поверхность мишени, способна расходоваться на удаление атомов с нее.

Магнетронные распылительные системы (МРС) зарекомендовали себя как эффективный инструмент для получения тонкопленочных покрытий с широким спектром свойств и назначений. Здесь потоки ионов, поступающие из области горения плазмы в прикатодную зону и ускоряемые в ней до энергий порядка 10² эВ, попадают на поверхность мишени. Существование скрещенных электрического и магнитного полей вблизи мишени, позволяет создавать интенсивную ионизацию в области вблизи катода. Поэтому плотность потока ионов, бомбардирующих поверхность мишени, оказывается довольно высокой, способной не только производить ее распыление, но и нагревать. При этом температура мишени зависит от ряда обстоятельств, в том числе и от условий теплоотвода. Если ограничить теплопроводный сток с мишени на элементы катодного узла, то она может разогреться до температуры плавления и выше. Тогда помимо распыления включается испарительный механизм удаления атомов с поверхности. Так

как в этом случае мишень под действием плазмы расплавляется, то она должна быть помещена в тигель из тугоплавкого материала.

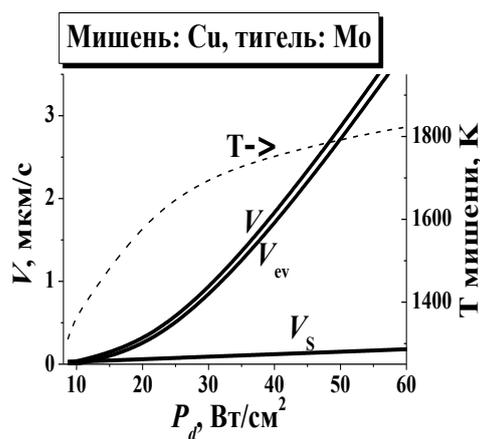


Рис. 18. Температура T и скорость эрозии V поверхности мишени в зависимости от плотности мощности разряда МРС; V_{ev} и V_s – составляющие скорости эрозии в результате испарения и распыления соответственно.

Для случая МРС с жидкофазной мишенью разработана своя модель тепловых и эрозионных процессов. В ней заложено представление о формировании эмиссионных потоков атомов, аналогичное случаю мощных импульсных ионных пучков, т.е. поток вещества с единицы поверхности мишени складывается из двух независимых компонентов, созданных в результате распыления и испарения. Скорость распыления практически прямопропорциональна величине ионного тока. Для нахождения скорости испарения необходимо знать температуру мишени, которая определяется тепловой составляющей внутренней энергии ее поверхностных слоев. Поэтому возникла необходимость в решении задачи расчета температуры мишени.

В отличие от случаев облучения мишеней мощными импульсными пучками заряженных частиц, здесь в системе «мишень - окружающая среда» устанавливается стационарный температурный режим (многочисленные экспериментальные исследования подтверждают этот факт). Поэтому модель тепловых и эрозионных процессов построена на основе уравнения баланса энергии в системе «мишень в тигле» в установившемся режиме работы МРС. Она также включает процедуры, описывающие распространение потока эмитированных атомов от мишени к подложке, и позволяет рассчитывать не только характеристики эрозионных процессов, но и скорость роста осаждаемых покрытий.

Наши исследования показали, что основной вклад в поток энергии, которую получает мишень, создает ионный ток. Поэтому облучение мишени в МРС может рассматриваться как ее бомбардировка ионным пучком. Выявлено, что основной сток энергии с мишени происходит за счет теплового излучения, испарения и распыления. В некоторых случаях (для мишеней из тяжелых металлов) следует учитывать отражение энергии ионов от поверхности.

С помощью разработанной модели тепловых и эрозионных процессов были получены данные об интенсивности и энергоэффективности удаления вещества с поверхности мишени в зависимости от плотности мощности разряда P_d (т.е. отношения мощности разряда к площади области горения плазмы вблизи мишени), а также от свойств материалов мишени и тигля. Рассмотрен вопрос о соотношении вкладов распыления и испарения в

интегральный поток атомов, эмитируемых с поверхности мишени и осаждаемых на подложку.

Характерная зависимость скорости эрозии поверхности мишени МРС от плотности мощности разряда, полученная на примере меди, помещенной в молибденовый тигель, имеет вид, представленный на рис. 18. При невысоких значениях P_d мишень только распыляется. Поток атомов за счет распыления линейно увеличивается с ростом P_d . При достижении некоторого значения плотности мощности мишень разогревается до такой степени, что потоки атомов за счет испарения и распыления становятся одинаковыми. Затем увеличение P_d приводит к сильному (нелинейному) возрастанию испарительного компонента.

Получено, что величина плотности мощности разряда (PI), при которой поток испарившихся атомов становится соизмеримым с потоком распыленных частиц и который можно рассматривать как пороговый для начала нелинейного роста скорости эрозии, зависит от теплофизических свойств вещества мишени, в частности, от специфической зависимости давления насыщенного пара от температуры, а также от степени черноты тигля ε_T (чем меньше ε_T , тем больше скорость эрозии при заданном значении плотности мощности разряда) и площади его излучающей поверхности.

При наращивании P_d выше уровня PI испарительный компонент довольно быстро становится доминирующим в эрозионном потоке. Здесь наблюдается существенное уменьшение E_a - величины энергии, вложенной в разряд, которая приходится на один атом, удаленный с поверхности мишени (рис. 19). Именно при таких значениях плотности мощности создается выигрыш в энергозатратах на формирование эмиссионных потоков, который обусловлен нелинейным ростом скорости испарения. На рис. 19 продемонстрировано, что при работе МРС с жидкометаллическими мишенями вполне достижимы режимы, в которых почти вся энергия ионного пучка расходуется на удаление частиц с поверхности. Это свидетельствует о гораздо более высокой энергоэффективности создания потока эрозионного материала по сравнению с использованием твердотельных мишеней МРС и даже мощных ионных и низкоэнергетических электронных пучков.

Изучен вопрос об изменении интенсивности эмиссии атомов с поверхности мишени при работе МРС в режиме самораспыления, когда магнетронный разряд поддерживается только атомами эрозионного

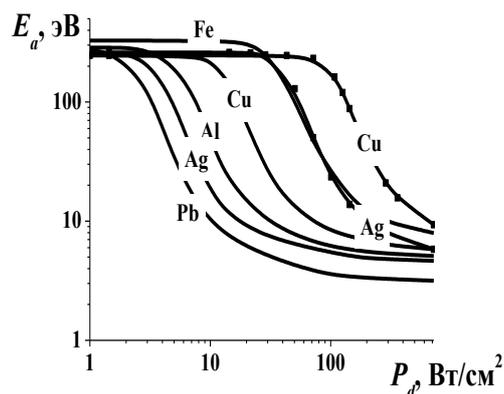


Рис. 19. Зависимости величины энергии разряда, расходуемой на удаление одного атома с поверхности мишени (E_a), от плотности мощности разряда (P_d), рассчитанные для мишеней, изготовленных из разных металлов и помещенных в молибденовый (сплошная гладкая линия) и в графитовый (линия с точками) тигли.

материала, по сравнению с режимом, предусматривающим непрерывную подачу рабочего газа. Установлено, что небольшое изменение скорости эрозии поверхности жидкофазной мишени должно иметь место только при $P_d \leq P_1$.

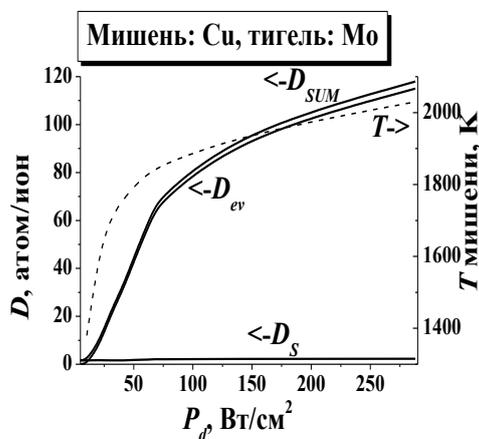


Рис. 20. Зависимость коэффициента эрозии поверхности жидкофазной мишени от плотности мощности разряда МРС; D_{ev} и D_s – составляющие за счет испарения и распыления соответственно, D_{SUM} – суммарный коэффициент эрозии.

частиц с $E_0 > 100$ кэВ.

На рис. 21 показаны зависимости скорости осаждения покрытий в МРС с жидкофазными мишенями. В рассмотренном диапазоне P_d имеет место переход от распылительного к преимущественно испарительному механизму эрозии. Его можно разделить на 3 участка: начальный, соответствующий работе МРС в режиме распыления; переходный, где вклады распыления и испарения соизмеримы, и участок с доминированием испарительного компонента. На участке P_d с доминированием испарения скорость

роста покрытий достигает $10^2 \dots 10^3$ нм/с. Если бы не было сильного разогрева мишени и испарения, то значения V_{dep} были бы почти на 2 порядка ниже. Плотность потока осаждаемых частиц изменяется от 10^{16} шт./($\text{см}^2 \cdot \text{с}$) в режиме распыления до 10^{18} шт./($\text{см}^2 \cdot \text{с}$) при доминировании испарения.

Рассчитаны коэффициенты эрозии металлов в широком диапазоне плотности мощности разряда (рис. 20). В режиме развитого испарения они достигают 10^2 атом/ион и непрерывно увеличиваются с ростом P_d , стремясь к некоторому предельному значению, соответствующему гипотетическому случаю, когда практически вся энергия ионного тока будет расходоваться на удаление атомов. Коэффициенты тепловой эрозии примерно на один - два порядка выше коэффициентов распыления, но на два - три порядка ниже значений коэффициентов тепловой эрозии при использовании мощных субмикросекундных пучков заряженных

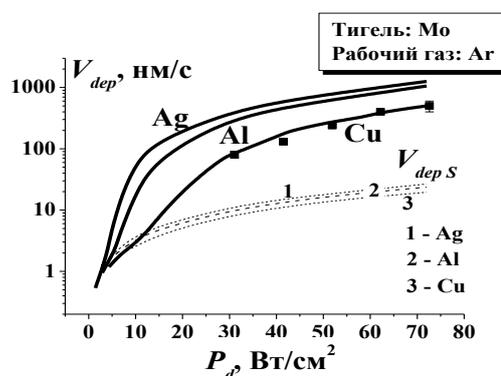


Рис. 21. Скорость роста покрытий при использовании металлических мишеней; сплошные линии – суммарная скорость роста, прерывистые – за счет распылительного компонента эрозии, точки – данные из экспериментов, выполненных в лаборатории 23 ФТИ ТПУ.

Сопоставлены показатели интенсивности и энергоэффективности эрозии и производительности осаждения пленок в МРС с жидкофазными мишенями и при использовании мощных субмикросекундных ионных пучков. Преимущества использования мощных импульсных пучков во многом связаны с гораздо более высокой скоростью удаления атомов с поверхности мишени, создающей плотность потока осаждаемых атомов на уровне $10^{21}..10^{22}$ шт./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$. Однако более высокая технологическая производительность осаждения покрытий в настоящее время свойственна магнетронным распылительным системам с жидкофазными мишенями, так как частота следования импульсов современных импульсных ионных ускорителей пока довольно низкая.

Основные результаты и выводы

Создан ряд моделей эрозии поверхности твердого тела, испытывающего фазовые превращения под действием пучков заряженных частиц и плазмы магнетронного разряда. Исследованы свойства эрозии в зависимости от параметров пучков и мишеней. С единых позиций проанализированы интенсивность и энергоэффективность эрозии, вызываемой разными видами мощных пучков заряженных частиц и плазмой магнетронного разряда.

Наиболее важные результаты диссертационной работы можно сформулировать следующим образом.

1. Определены основные механизмы эрозии и исследована кинетика удаления вещества с поверхности при ее облучении импульсными пучками заряженных частиц с начальной энергией $10..1000$ кэВ и плотностью мощности $10^6..10^{10}$ Вт/ см^2 . Установлено, что при плотности мощности ниже $(0,5..1) \cdot 10^9$ Вт/ см^2 основным является активационный механизм удаления атомов с поверхности конденсированного вещества мишени, создающий поверхностное испарение, а при 10^9 Вт/ см^2 и более он переходит в безактивационный, при котором поверхностное испарение может трансформироваться в гидродинамический разлет вещества.

2. На примере металлов получены данные о свойствах эрозии поверхности под действием мощных импульсных пучков заряженных частиц в зависимости от параметров облучения. Наибольшие коэффициенты эрозии достигают $10^4..10^5$ атом/частица. Они имеют место в субмикросекундных режимах облучения с начальной энергией частиц, превышающей 100 кэВ.

Основные свойства эрозии поверхности твердого тела при облучении импульсными пучками заряженных частиц с плотностью мощности $10^6..10^{10}$ Вт/ см^2 можно сформулировать следующим образом:

1) интенсивность и энергоэффективность эрозии определяется формой и размерами пространственно-временной функции энерговыделения в результате торможения бомбардирующих частиц в облучаемом веществе;

2) для любой комбинации «тип частиц - их начальная энергия - длительность импульса тока - вещество мишени» характерен свой

максимальный коэффициент эрозии, которому свойственно специфическое значение плотности тока; чем больше глубина проникновения бомбардирующих частиц в заданное вещество, тем выше значение максимального коэффициента эрозии;

3) увеличение длительности импульса тока при заданной начальной энергии частиц и неизменном значении плотности энергии пучка приводит к уменьшению коэффициента эрозии и возрастанию затрат энергии пучка на удаление атомов;

4) нелинейное возрастание интенсивности эрозии по мере роста плотности энергии пучка может рассматриваться как пороговый процесс; наименьшие значения плотности энергии для инициации этого явления имеют место в случае использования субмикросекундных ионных пучков с энергиями частиц выше 100 кэВ.

3. Острогофокусированные сканирующие пучки заряженных частиц с начальной энергией 10..100 кэВ и радиусом следа на облучаемой поверхности 100...1000 мкм способны создавать эрозию за счет испарения с коэффициентами на уровне 10^3 атом/частица; ее интенсивность и энергоэффективность тем выше, чем больше плотность тока пучка и начальная энергия частиц; энергоэффективность и производительность обработки поверхности с помощью острофокусированных сканирующих пучков могут превосходить мощные импульсные пучки.

4. Эрозия, вызванная испарением, обычно является основным механизмом удаления вещества с поверхности в технологиях модифицирования свойств материалов, использующих мощные импульсные пучки заряженных частиц. Разработанные модели позволяют прогнозировать результаты облучения и вычислять оптимальные параметры пучков.

5. Поток атомов с поверхности жидкофазных мишеней магнетронных распылительных систем вначале состоит из двух компонентов: распылительного и испарительного. По мере роста плотности мощности разряда доля испарительного компонента нелинейно возрастает и становится доминирующим. Коэффициенты эрозии металлов при этом находятся на уровне 10^2 атом/ион. Пороговая величина плотности разряда, при которой наблюдается нелинейный рост интенсивности эрозии, определяется специфической зависимостью давления насыщенного пара вещества мишени от температуры и степенью черноты тигля.

6. Эмиссия атомов с поверхности жидкофазной мишени магнетронной распылительной системы может быть существенно более энергоэффективной, чем в случае мощных импульсных ионных пучков, но при этом коэффициенты эрозии на 2..3 порядка ниже.

Список основных публикаций автора по теме диссертации

1. Асаинов О.Х., Кривобоков В.П., Лигачев А.Е., Сапульская (Блейхер) Г.А. Тепловые процессы при обработке поверхности металлов

- сильноточными наносекундными пучками ионов // Физика и химия обработки материалов. – 1987. - № 2. – С. 53-59.
2. Диденко А.Н., Асаинов О.Х., Кривобоков В.П., Лигачев А.Е., Сапульская (Блейхер) Г.А. Особенности взаимодействия сильноточных наносекундных ионных пучков с поверхностью металлов // В сб. «Физика электронных и атомных столкновений». – Л.: Изд. ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 1987. – С. 188-199.
 3. Асаинов О.Х., Кривобоков В.П., Сапульская (Блейхер) Г.А. Способ имплантации. – Авторское свидетельство № 1549404 от 08.11.1989.
 4. Кривобоков В.П., Пащенко О.В., Сапульская (Блейхер) Г.А., Степанов Б.П. Эрозия кварца под действием мощных наносекундных ионных пучков // Физика и химия обработки материалов. – 1991. - № 6. – С. 25-32.
 5. Кривобоков В.П., Пащенко О.В., Сапульская (Блейхер) Г.А. Компьютерное моделирование эрозии и термомеханических процессов в твердом теле, облучаемом мощными наносекундными пучками заряженных частиц // Известия ВУЗов. Физика. – 1993. - № 12. – С. 37-41.
 6. Кривобоков В.П., Пащенко О.В., Сапульская (Блейхер) Г.А. Исследование механизмов интенсивного переноса атомов в веществе, облучаемом мощными наносекундными пучками заряженных частиц // Журнал технической физики. – 1994. – Т. 64. – Вып. 5. – С. 37 - 42.
 7. Ананьин П.С., Куликов В.Д., Кривобоков В.П., Пащенко О.В., Сапульская (Блейхер) Г.А. Регистрация акустических волн в твердом теле при мощном импульсном электронном облучении // Известия ВУЗов. Физика. – 1994. - № 4. – С. 120-124.
 8. Блейхер Г.А., Кривобоков В.П., Пащенко О.В. Диссипация энергии мощных импульсных пучков заряженных частиц в твердом теле. Тепловые процессы // Известия ВУЗов. Физика. – 1997. - № 2. – С. 67-89.
 9. Блейхер Г.А., Кривобоков В.П., Пащенко О.В., Янин С.Н. Влияние изменения плотности твердого тела на диффузионную подвижность атомов при облучении мощными наносекундными пучками заряженных частиц // Письма в журнал технической физики. – 1998. – Т. 24. - № 3. – С. 75-79.
 10. Блейхер Г.А., Кривобоков В.П., Пащенко О.В. Тепломассоперенос в твердом теле под действием мощных импульсных пучков заряженных частиц. – Новосибирск: Наука, 1999. – 176 с. (монография).
 11. Bleykher G.A., Krivobokov V.P., Paschenko O.V. Mathematical Simulation of Heat Processes in Solids Irradiated by High Current Pulse Beam of Charged Particles // Proceedings of the International Congress on Radiation Physics, High Current Electronics and Modification of Materials. – Tomsk, Sept. 24-29, 2000. – V. 3. – P. 115-125.
 12. Блейхер Г.А., Кривобоков В.П., Пащенко О.В. Теплофизические процессы в твердом теле при воздействии мощных импульсных пучков

- заряженных частиц // Известия ТПУ. – 2000. – Т. 303. – Вып. 2. – С. 71-91.
13. Блейхер Г.А., Кривобоков В.П., Пащенко О.В. О механизмах эрозии поверхности при облучении импульсными ионными пучками // Proceedings of the 12th International Conference on Radiation Physics and Chemistry of Inorganic Materials. – Tomsk, Sept. 23-27, 2003. – P. 277-279.
 14. Bleykher G.A., Krivobokov V.P., Paschenko O.V. On Erosion Mechanisms of the Solid Surface under the Treatment with Submicrosecond Ion Beam // Proceedings of the 7th International Conference on Modification of Materials with Particles Beams and Plasma Flows. – Tomsk, July 25-29, 2004. – P. 281-284.
 15. Bleykher G.A., Krivobokov V.P., Stepanova O.M. The Analysis of Metal Surface Erosion under Irradiation by Pulsed Electron Beams // Известия ВУЗов. Физика. – 2006. - № 10. Приложение. – С. 346-349.
 16. Bleykher G.A., Krivobokov V.P. Theoretical Foundations of Treatment of Materials by Pulse Electron and Ion Beams: Text-book. – Tomsk: Publishing House of TPU, 2006. – 195 p.
 17. Блейхер Г.А., Кривобоков В.П., Платонов М.А. Влияние параметров облучения на эрозию поверхности металлов импульсными ионными пучками // Известия ВУЗов. Физика. – 2007. - № 8. – С. 49-54.
 18. Блейхер Г.А., Кривобоков В.П., Степанова О.М. Параметры импульсных ионных пучков для обеспечения максимальных коэффициентов эрозии поверхности металлов // Известия ВУЗов. Физика. – 2007. - № 5. – С. 31-36.
 19. Блейхер Г.А., Кривобоков В.П., Степанова О.М. Эрозия металлов при облучении мощными импульсными ионными пучками // Известия ВУЗов. Физика. – 2007. - № 10/3. – С. 55-59.
 20. Bleykher G.A., Krivobokov V.P. Model of Metal Surface Erosion under Irradiation by High-Power Pulsed Ion Beams // Journal of Engineering Thermophysics. – 2008. – V. 17. – No. 1. – P. 24-29.
 21. Блейхер Г.А., Кривобоков В.П. Технологические возможности мощных импульсных ионных пучков для эрозионной обработки поверхности металлов // Известия ВУЗов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2008. - № 1. - С. 23-29.
Bleykher G.A., Krivobokov V.P. Technological Possibilities of High-Power Pulsed Ion Beams for the Erosion Treatment of Metal Surface // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2008. – V. 49. – No. 4. – P. 297-302.
 22. Bleykher G.A., Krivobokov V.P., Stepanova O.M. On Evaporation Smoothing Mechanism of Metal Surface under the Irradiation by Submicrosecond Ion Beams // Proceedings of the 9th International Conference on Modification of Materials with Particles Beams and Plasma Flows. – Tomsk, Sept. 21-26, 2008. – P. 230-233.
 23. Bleykher G.A., Krivobokov V.P., Tretyakov R.S., Yurjeva A.V. Atoms Emission and Balance of Energy at Magnetron Sputtering System Work with

- the Heat-Insulated Target // Известия ВУЗов. Физика. – 2009. – Том 52. - № 8/2. – С. 386-389.
24. Блейхер Г.А., Кривобоков В.П., Третьяков Р.С., Юрьева А.В. Тепловые и эрозионные процессы при работе магнетронных распылительных систем с неохлаждаемыми мишенями // Известия ВУЗов. Физика. – 2009. – Том 52. - № 11/2. – С. 180 - 185.
25. Bleykher G.A., Krivobokov V.P. The Surface Erosion under Influence of the Fine-Focused Scanning Electron Beams // Proceedings of the 10th International Conference on Modification of Materials with Particles Beams and Plasma Flows. – Tomsk, Sept. 19-24, 2010. – P. 397-400.
26. Блейхер Г.А., Кривобоков В.П. Анализ энергоэффективности эрозионного воздействия острогофокусированных сканирующих пучков заряженных частиц на поверхность металлов // Известия ВУЗов. Физика. – 2010. – Том 53. - № 10/2. – С. 97-102.
27. Bleykher G.A., Krivobokov V.P. Thermal Erosion of Metal Surfaces under the Action of Strongly Focused Scanning Electron Beams // Journal of Engineering Thermophysics. – 2011. – V. 20. – No. 2. – P. 1-9.

Список цитированной литературы

1. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой. Вып. 1. Физическое распыление одноэлементных твердых тел / Под ред. Бериша Р. М.: Мир.- 1984.- 336 с.
2. Плешивцев Н.В. Катодное распыление / М.: Атомиздат, 1968. – 343 с.
3. Струц В.К., Матвиенко В.М., Петров А.В., Рябчиков А.И. Структура и свойства содержащих фуллерены углеродных покрытий // Изв. ВУЗов. Физика. – 2009. – № 11/2. – С. 217-222.
4. Renk T.J., Provencio P.P., Prasad S.V., Shlapakovski A.S., Petrov A.V., Yatsui K., Jiang W., Suematsu H. Materials Modification Using Intense Ion Beams // Proceedings of the IEEE. – 2004. – V. 92. – No. 7. – P. 1057-1081.
5. Окс Е.М. Источники электронов с плазменным катодом: физика, техника, применения. – Томск: НТЛ, 2005. – 216 с.
6. Закутаев А.Н. Осаждение тонких пленок из абляционной плазмы, генерируемой на мишени при воздействии мощного ионного пучка // Дисс. на соискание уч. степени к.ф.-м.н. – Томск. – 1998. – 162 с.
7. Isakov I.F., Remnev G.E., Zakutaev A.N. High-Rate Deposition of Thin Films by High-Power Ion Beam // Proc. of the 9th Int. Conf. on High-Power Particle Beams / Edited by Mosher D. and Cooperstein G. – 1992. – P. 1966 -1970.