

Московский государственный технический университет имени
Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)

На правах рукописи

КИРИЛЛОВ ДАНИИЛ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЭРОЗИИ КАТОДА И
ТЕПЛОМАССОБМЕНА МЕЖДУ МИКРОКАПЛЯМИ И ПЛАЗМОЙ
ВАКУУМНО-ДУГОВОГО ИСПАРИТЕЛЯ С АРОЧНЫМ
МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Специальность 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук



Москва, 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель: **Духопельников Дмитрий Владимирович**
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Одинокоев Вадим Васильевич**
доктор технических наук, заместитель
генерального директора по науке
ОАО «Научно-исследовательский институт
точного машиностроения» (НИИТМ)

Липаев Андрей Михайлович
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник федерального
государственного бюджетного учреждения
науки Объединённый институт высоких
температур Российской академии наук
(ОИВТ РАН)

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное
предприятие «Всероссийский научно-
исследовательский институт авиационных
материалов» (ФГУП «ВИАМ»)

Защита состоится «14» марта 2018 г. в 14 часов 00 минут на заседании
диссертационного совета Д 212.141.08 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по
адресу: 105005, Москва, Лефортовская наб., д. 1, ф-т
«Энергомашиностроение», ауд. 202э.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э.
Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью
учреждения, просим направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская
улица, д.5, стр.1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, учёному секретарю
диссертационного совета Д 212.141.08.

Автореферат разослан «___» _____ 20__ г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.141.08
кандидат технических наук, доцент



Егоров К.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Метод вакуумно-дугового испарения относится к термическим методам получения ионных и атомарных потоков вещества и используется с середины 70-х годов для нанесения покрытий. В отличие от общепринятых термических методов, таких как резистивное и электронно-лучевое испарение, в которых испарение происходит из расплавленной области, в данном методе формирование потока материала происходит с поверхности твёрдого холодного катода из катодного пятна. Поток материала в виде пара, ионов и капель поступает в вакуумный объём, где осаждается на подложках (деталях). Метод позволяет обеспечивать высокую энергию частиц, гибкость технологии и хорошую адгезию покрытия, но имеет существенный недостаток – присутствие в продуктах эрозии капельной фазы, состоящей из множества мелких капель материала катода. Существующие методы снижения массовой доли капельной фазы (фильтрация плазмы, импульсный режим работы дугового испарителя) связаны со значительным снижением эффективности метода, с усложнением и удорожанием конструкции.

Альтернативным методом снижения массовой доли капель в покрытии является применение дуговых испарителей с арочным магнитным полем, сформированное таким образом, что магнитные силовые линии образуют арку над поверхностью катода и концами упираются в его поверхность. При этом пространство под вершинами арок образует на поверхности катода замкнутую дорожку, по которой перемещаются катодные пятна. Поле такой конфигурации впервые было предложено И.Г. Кесаевым и В.В. Пашковой для удержания катодного пятна на поверхности катода дугового испарителя. Фактически, в области катодного пятна ток разряда всегда перпендикулярен линиям магнитного поля, которые в этом месте параллельны поверхности катода.

Наложение арочного магнитного поля на катод заставляет катодные пятна двигаться внутри арки магнитного поля в направлении, противоположном силе Ампера. Скорость направленного движения катодных пятен увеличивается при этом в 5-10 раз, что изменяет теплофизические условия испарения материала катода и снижает, как показали эксперименты, вероятность образования капель. Это приводит к уменьшению количества капель в продуктах эрозии в несколько раз. Однако, применение арочного магнитного поля снижает скорость эрозии катода и вызывает значительную неравномерность выработки катода. Зона эрозии имеет вид узкой канавки («кинжальная выработка»), повторяющей форму арки. При этом за счёт формирования магнитной ловушки в прикатодной области повышается концентрация плазмы, что может приводить к дополнительному нагреву и испарению капель. Всё это делает перспективным применение арочного магнитного поля в дуговых испарителях для снижения массовой доли капельной фазы и позволяет с

незначительными затратами существенно повысить качество осаждаемых покрытий.

В настоящее время не достаточно проработан вопрос применения арочного магнитного поля в технологии вакуумно-дугового испарения: нет количественных данных снижения скорости эрозии катода в арочном магнитном поле и массовой доли капель в покрытии, недостаточно исследован вопрос формирования профиля зоны эрозии катода.

Таким образом, актуальность работы обусловлена следующими положениями:

- необходимость разработки новых методов и систем для снижения доли капельной фазы в продуктах эрозии катода, вплоть до полного подавления каплеобразования;
- необходимы данные о влиянии арочного магнитного поля на интегральные характеристики эрозии катода (скорость эрозии, форму зоны эрозии, массовую долю капельной фазы в продуктах эрозии) и характеристики разряда для создания новых эффективных систем вакуумно-дугового испарения со сниженной долей капельной фазы.

Целью работы является разработка технических путей создания высокоэффективных вакуумно-дуговых испарителей с арочным магнитным полем и минимальной долей капельной фазы.

Основными задачами, решаемыми в данной работе являются:

1. Исследование влияния величины индукции арочного магнитного поля на интегральные характеристики вакуумно-дугового испарителя (вольт-амперные характеристики дугового разряда, ширина и форма зоны эрозии катода, скорость движения катодных пятен по поверхности катода и скорость эрозии катода).
2. Исследование формы капель в конденсате на поверхности подложки в диапазоне диаметров капель от 10 нм до 10 мкм для проведения оценки фазового состояния капель и оценки объёма материала, переносимого капельной фазой.
3. Определение функции распределения капель по диаметрам и массовой доли капель в продуктах эрозии катода с учётом формы капель для количественной оценки эффективности применения арочного магнитного поля.
4. Разработка математической модели процессов теплообмена между каплей и плазмой вакуумного дугового разряда с арочным магнитным полем и оценка возможности полного испарения капель с учётом излучения капель субмикронных размеров и одновременным приходом на каплю тепловых ионов и ионного пучка со стороны катода.
5. Разработка предложений по созданию систем со сниженной массовой долей капельной фазы в продуктах эрозии катода вакуумно-дугового испарителя.

Достоверность результатов теоретических исследований обеспечивается использованием адекватных математических моделей и экспериментальной проверкой полученных результатов. Достоверность экспериментальных исследований гарантируется применением хорошо зарекомендовавших себя методов и методик, а также использованием современных средств измерения. Приведены оценки погрешности измерений.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые экспериментально показано и получены количественные характеристики снижения скорости эрозии катода вакуумно-дугового испарителя с ростом величины индукции арочного магнитного поля для всех исследованных материалов.
2. Получены новые количественные данные о снижении массовой доли капельной фазы в 1,5-2,5 раза при увеличении величины индукции арочного магнитного поля с 2,5 до 12 мТл для различных материалов катода.
3. Экспериментально и расчётным путём впервые показано, что снижение массовой доли капель в покрытии происходит как за счёт подавления образования капель на поверхности катода, так и за счёт частичного испарения капель в разряде.
4. Получены функции распределения капель по диаметрам в диапазоне от 10 нм до 10 мкм в продуктах эрозии катода при различных значениях индукции арочного магнитного поля.
5. Впервые проведено испарение хрупкого полупроводникового материала (кремний) в вакуумно-дуговом разряде с арочным магнитным полем в непрерывном режиме без термодеформационного разрушения катода.

Практическая значимость работы

1. Получены данные для проектирования вакуумно-дуговых испарителей с арочным магнитным полем с катодами из различных материалов.
2. Разработаны инженерные методики определения основных эрозионных характеристик вакуумно-дугового испарителя с арочным магнитным полем.
3. Разработана методика расчёта профиля выработки катода в арочном магнитном поле.
4. Даны практические рекомендации по снижению (вплоть до полного исчезновения капель) массовой доли капельной фазы.
5. Предложен новый способ испарения хрупких полупроводниковых материалов (таких, как кремний) в вакуумно-дуговом разряде с арочным магнитным полем без термодеформационного разрушения катода в непрерывном режиме.

Апробация результатов работы

Основные положения работы докладывались на следующих конференциях и семинарах:

1. Научные семинары кафедры «Плазменные энергетические установки Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана (Москва, 2013-2017).
2. 28-е заседание Международного научно-технического семинара «Электровacuумная техника и технология» (Москва, 2006).
3. III Международная научно-техническая конференция «Вакуумная техника, материалы и технология» (Москва, 2008).
4. VII Международная научно-техническая конференция «Вакуумная техника, материалы и технология» (Москва, 2012).
5. VIII Международная научно-техническая конференция «Вакуумная техника, материалы и технология» (Москва, 2013).
6. IX Международная научно-техническая конференция «Вакуумная техника, материалы и технология» (Москва, 2014).
7. X Международная научно-техническая конференция «Вакуумная техника, материалы и технология» (Москва, 2015).

Публикации

Основные научные результаты диссертации отражены в 12 научных статьях, в том числе в 11 статьях из Перечня ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, а также опубликованы тезисы 7 докладов.

Личный вклад соискателя

Все работы были выполнены непосредственно автором. Автором лично были разработаны: методика исследования продуктов эрозии катода вакуумно-дугового испарителя, методика расчёта формы зоны эрозии катода, методика определения временных характеристик катодного пятна, разработана математическая модель расчёта тепломассообмена между капелями и плазмой вакуумно-дугового разряда. Все экспериментальные работы, измерения, обработка экспериментальных данных, разработка расчётных программ были выполнены автором лично.

На защиту выносятся:

1. Зависимости скорости эрозии катода при различных индукциях аорчного магнитного поля для различных материалов (титан, алюминий, медь, кремний).
2. Зависимости формы поперечного сечения профиля эрозии катода от величины индукции аорчного магнитного поля для различных материалов (титан, алюминий, медь, кремний).
3. Зависимости скорости движения катодных пятен от величины индукции аорчного магнитного поля для различных материалов (титан, алюминий, медь, кремний).

4. Результаты исследования формы капель в конденсате для различных материалов (титан, алюминий, медь, кремний).
5. Функции распределения капель по диаметрам при различных индукциях магнитного поля для различных материалов (титан, алюминий, медь, кремний).
6. Зависимости массовой доли капельной фазы в продуктах эрозии от индукции арочного магнитного поля для различных материалов (титан, алюминий, медь, кремний).
7. Математическая модель процессов тепломассообмена между каплями и плазмой вакуумно-дугового разряда.
8. Результаты расчёта динамики изменения температуры и диаметра капли в дуговом разряде для различных материалов (титан, алюминий, медь, кремний).

Соответствие паспорту специальности.

Соответствие диссертации формуле специальности 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника» (технические науки): диссертационная работа посвящена исследованию процессов переноса тепла и массы в плазме вакуумно-дугового разряда и выявлению механизмов переноса массы и энергии при излучении, сложном теплообмене и физико-химических превращениях с целью определения влияния арочного магнитного поля на характеристики генерации капель в катодном пятне и их испарение в плазме вакуумно-дугового разряда.

Отражённые в диссертации научные положения соответствуют области исследования специальности 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Диссертационная работа изложена на 187 страницах, содержит 113 иллюстраций и 21 таблицу. Библиография включает 176 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы основные цели и задачи исследования, сформулированы положения, определяющие новизну и практическую ценность полученных результатов, а также положения, выносимые на защиту.

В первой главе дано краткое описание вакуумно-дугового разряда и метода вакуумно-дугового испарения. Описан основной недостаток метода – наличие в продуктах эрозии капель материала катода (Рисунок 1). Сделан обзор наиболее распространённых установок вакуумно-дугового испарения. Представлен обзор предполагаемых механизмов эрозии катода в катодном пятне вакуумной дуги. Под процессом эрозии катода вакуумно-дугового испарителя понимается комплексный процесс уноса материала из катодного

пятна, в результате которого образуются пары, капли и плазма материала катода. Рассмотрены механизмы образования капель в катодном пятне и распространения капель в пространстве. Приведены основные характеристики продуктов эрозии катода: нейтрального пара, ионной фазы, электронов и капель. Приведён обзор результатов измерений размеров капель, плотности потока капельной фазы и скорости движения капель.

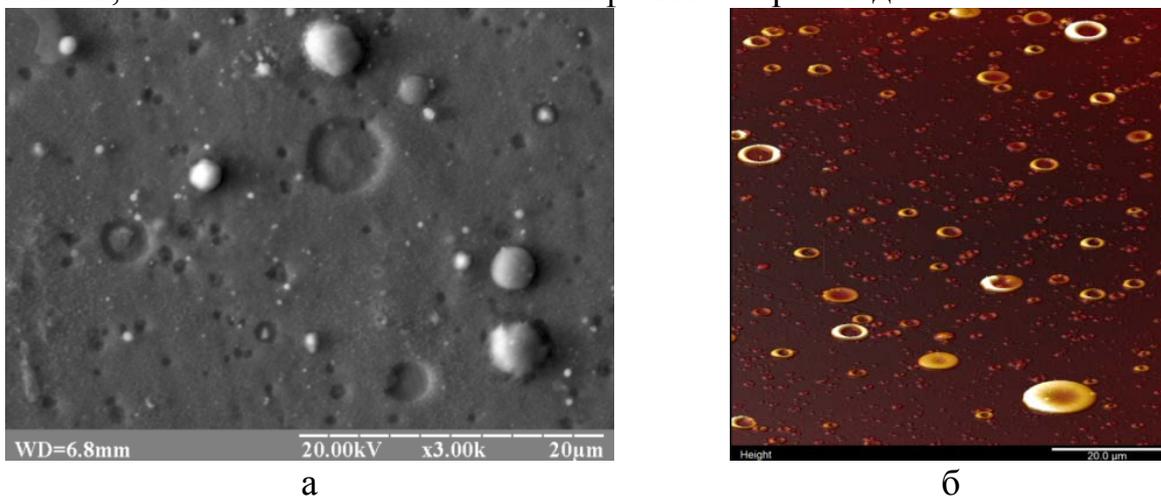


Рисунок 1.

Капли материала катода в конденсате на подложке
а) сферические капли (титан); б) плоские капли (медь)

Описаны различные методы снижения массовой доли капельной фазы: сепараторы капель различной конструкции и импульсный режим работы испарителя. Оценены их достоинства и недостатки. Описаны особенности применения арочного магнитного поля для управления движением катодных пятен, и показано, что использование арочного магнитного поля приводит к снижению количества капель в конденсатах. Отмечено, что в настоящее время недостаточно представлены или полностью отсутствуют какие-либо данные по влиянию арочного магнитного поля на скорость эрозии катода и на массовую долю капель в продуктах эрозии катода.

Рассмотрены вопросы испарения капель в плазме дугового разряда, а также описаны различные модели теплообмена между каплями и плазмой вакуумно-дугового разряда. Показано, что в зависимости от модели теплообмена предсказывается как полное испарение капель в плазме вакуумно-дугового разряда, так и невозможность их испарения. Приведены данные, свидетельствующие о том, что при увеличении концентрации и температуры электронов возможно испарение значительной части капель.

Во второй главе приведено описание экспериментального вакуумного стенда и экспериментального дугового испарителя с арочным магнитным полем (Рисунок 2). Вакуумно-дуговой испаритель состоит из водоохлаждаемого катода, анода, нейтральной вставки, центральной и периферийной магнитных катушек. Магнитное поле арочной конфигурации на поверхности катода создавалось центральной магнитной катушкой. При изменении тока в периферийной катушке изменялась топология магнитного

поля и, соответственно, изменялось положение центра арки магнитного поля. Типичный ток разряда испарителя от 80 до 140 А при напряжении от 18 до 25 В, типичные значения индукции арочного магнитного поля в центре арки магнитных силовых линий на поверхности катода от 2 до 12 мТл.

Также в главе приведено описание методик измерений. Проведена оценка погрешностей измерений по применяемым методикам.

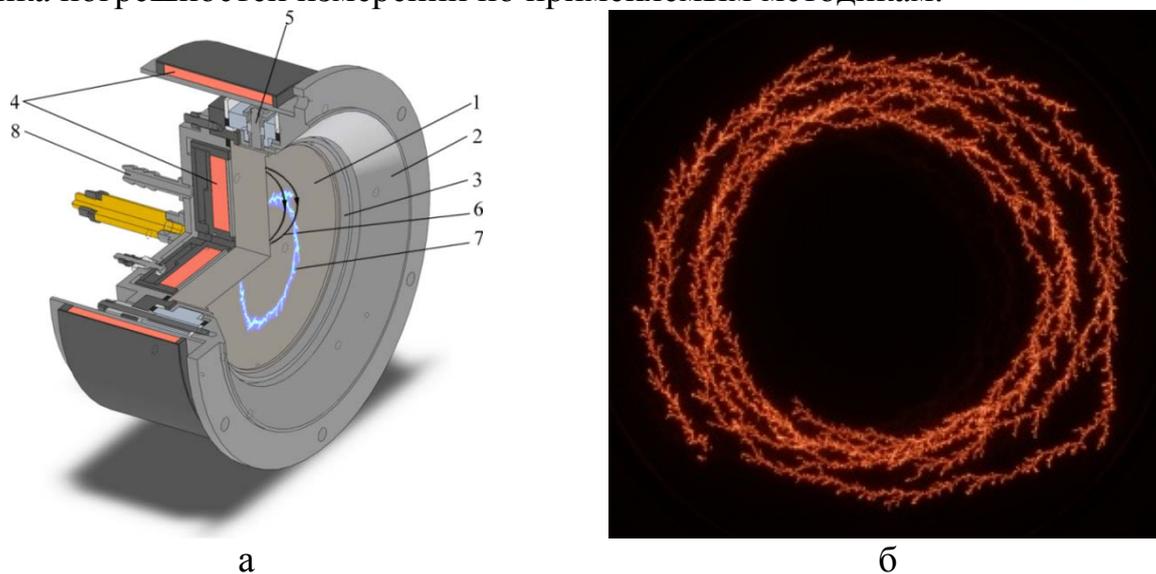


Рисунок 2.

Вакуумно-дуговой испаритель с арочным магнитным полем переменной конфигурации (а) и движение катодных пятен по поверхности катода (б)
1 – катод; 2 – анод; 3 – нейтральная вставка; 4 – магнитная система; 5 – устройство инициации разряда (поджиг); 6 – силовые линии арочного магнитного поля; 7 – трек катодных пятен; 8 – штуцер системы охлаждения

В третьей главе описаны исследования влияния арочного магнитного поля на вольт-амперные характеристики разряда: приведены вольт-амперные характеристики в зависимости от величины индукции арочного магнитного поля, показано влияние величины индукции арочного магнитного поля на напряжение дугового разряда. Предложена математическая модель, описывающая влияние индукции арочного магнитного поля на изменение вольт-амперной характеристики разряда.

Рассмотрены вопросы влияния арочного магнитного поля на динамику движения катодных пятен. Под катодным пятном понималась ограниченная область катодной привязки, формирующая на катоде отдельный кратер размером 50-200 мкм и являющаяся областью интенсивного испарения, ионизации и образования капельной фазы. Предложен способ оценки времени жизни катодного пятна, определяющий нагрев локальной области катода. Получены времена жизни катодного пятна, определяющие время воздействия на катод и, соответственно, локальный разогрев материала. На материалах титан и медь времена жизни составили 29 мкс и 324 мкс соответственно. При увеличении индукции арочного магнитного поля до 7 мТл время жизни уменьшается соответственно в 1,2 и в 6,8 раза, что

приводит к снижению нагрева области привязки дуги на катоде. Этот результат был подтверждён измерением размеров кратеров на поверхности катода: средний размер кратера при увеличении индукции арочного магнитного поля уменьшился в 1,5 и 1,3 раза для титана и для меди соответственно и составил 78 и 203 мкм.

Проведено исследование влияния индукции арочного магнитного поля на скорость эрозии катода и показано, что при увеличении индукции арочного магнитного поля скорость эрозии снижается в 1,5-3,9 раза в зависимости от материала катода (Рисунок 3).

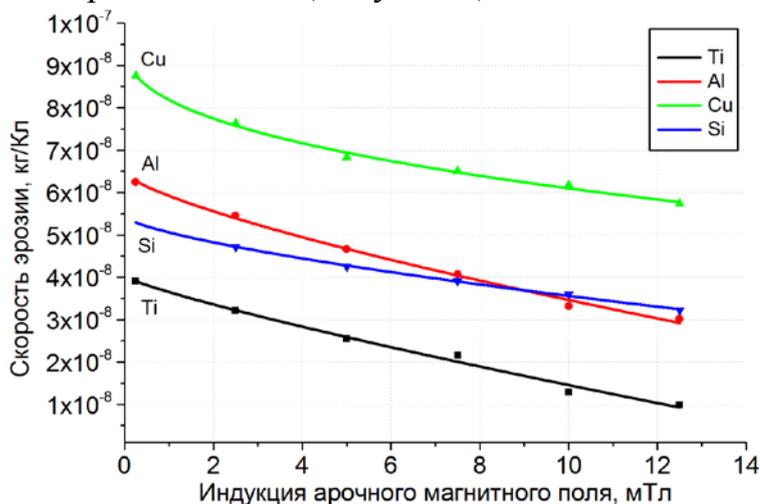


Рисунок 3.

Влияние арочного магнитного поля на скорость эрозии катода дугового испарителя

Показано, что профиль зоны эрозии катода в арочном магнитном поле описывается функцией Гаусса (Рисунок 4). Приведена методика ускоренного определения ширины зоны эрозии катода методом оптической регистрации. Показано, что увеличение индукции арочного магнитного поля приводит к уменьшению ширины зоны эрозии. При увеличении тока разряда ширина зоны эрозии наоборот увеличивается (Рисунок 5). Приведены кривые и эмпирические зависимости, описывающие зависимость ширины зоны эрозии и скорости движения катодных пятен от индукции арочного магнитного поля и тока разряда для различных материалов. Измерения и расчёты выполнены для различных материалов: титан, алюминий, медь, кремний. На основе полученных данных был создан алгоритм расчёта изменения профиля катода дугового испарителя с арочным магнитным полем и оценён коэффициент использования материала катода.

Выполнен расчёт профиля выработки катода промышленного вакуумно-дугового испарителя с арочным магнитным полем переменной конфигурации и проведена коррекция закона изменения конфигурации арочного магнитного поля. В результате был увеличен коэффициент использования материала катода с 37 до 80 %.

Были проведены экспериментальные исследования изменения размеров капель при их движении в плазме вакуумно-дугового разряда. Показано, что

происходит испарение мелких капель размером менее 0,5 мкм, в то время как капли размером более 1 мкм практически не испаряются.

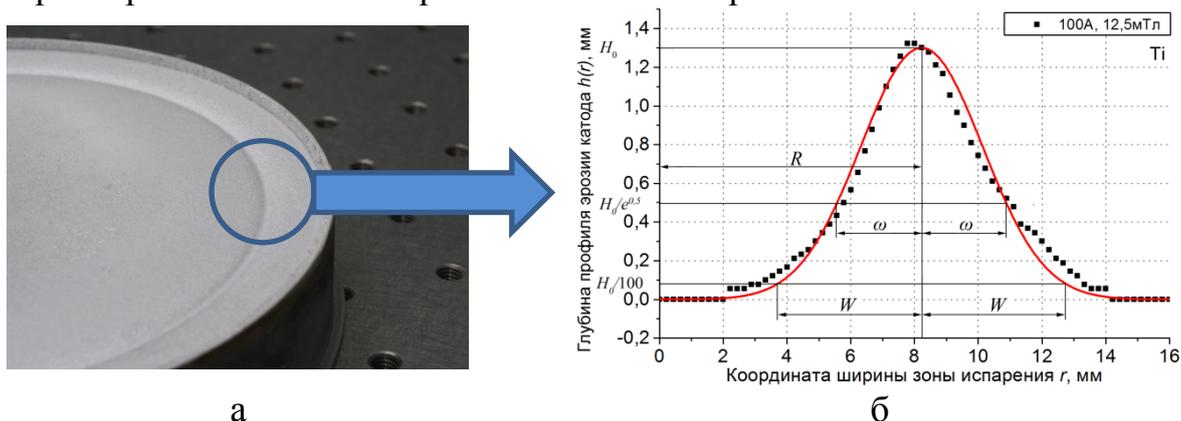


Рисунок 4.

Профиль зоны эрозии катода вакуумно-дугового испарителя а – проработанный катод дугового испарителя; б – аппроксимация профиля зоны эрозии кривой Гаусса

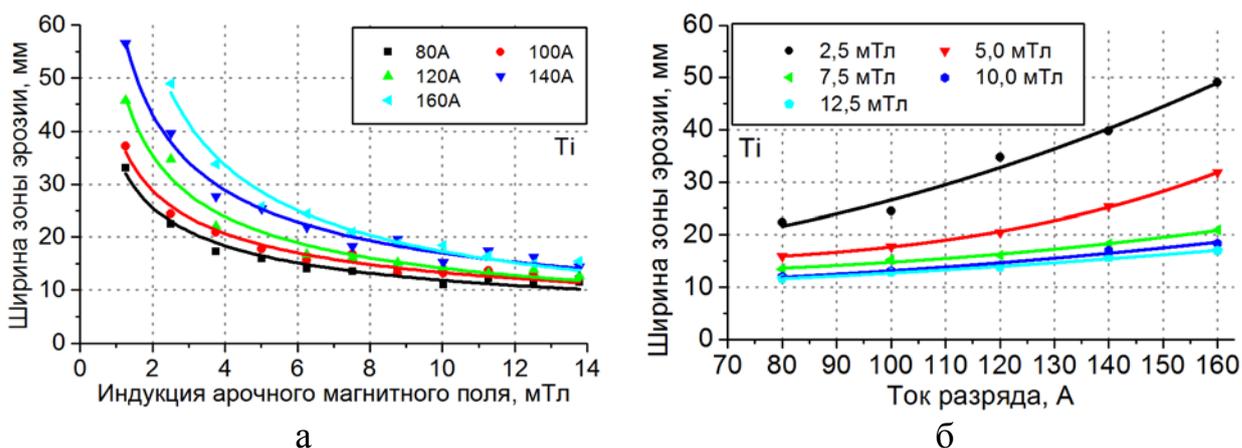


Рисунок 5.

Влияние величины индукции арочного магнитного поля (а) и тока разряда (б) на ширину зоны эрозии катода (титан)

В четвёртой главе приведены результаты исследований капельной фазы продуктов эрозии катода вакуумно-дугового испарителя и влияния арочного магнитного поля на дисперсные характеристики капельной фазы. Проведено исследование формы капель в конденсатах и показано, что капли приходят на подложку в жидком состоянии (Рисунок 6). Для характеристики формы капель было предложено использовать отношение высоты капли к её диаметру (аспектное отношение): $A = h/d$. Показано, что на поверхности подложки наблюдаются в основном два типа форм капель: «диск» и «атолл», а форма капель – плоская. Это говорит о том, что капли приходят на поверхность в жидком виде.

Из анализа размеров отпечатков капель на поверхности подложек были получены функции распределения по диаметрам отпечатков капель в конденсатах при различных индукциях арочного магнитного поля и для

нескольких материалов катода (титан, алюминий, медь, кремний) (Рисунок 7). Рассчитана массовая доля капель в покрытии и показано, что при увеличении индукции арочного магнитного поля до 12,5 мТл массовая доля капель в покрытии снижается в 1,5-2,5 раза в зависимости от материала катода (Рисунок 8).

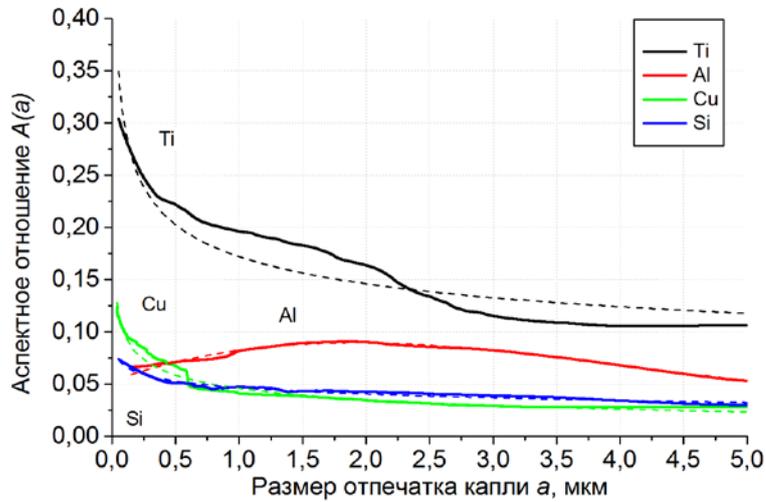


Рисунок 6.

Зависимость отношения высоты капли к её диаметру (аспектного отношения $A(a)$) от диаметра капли

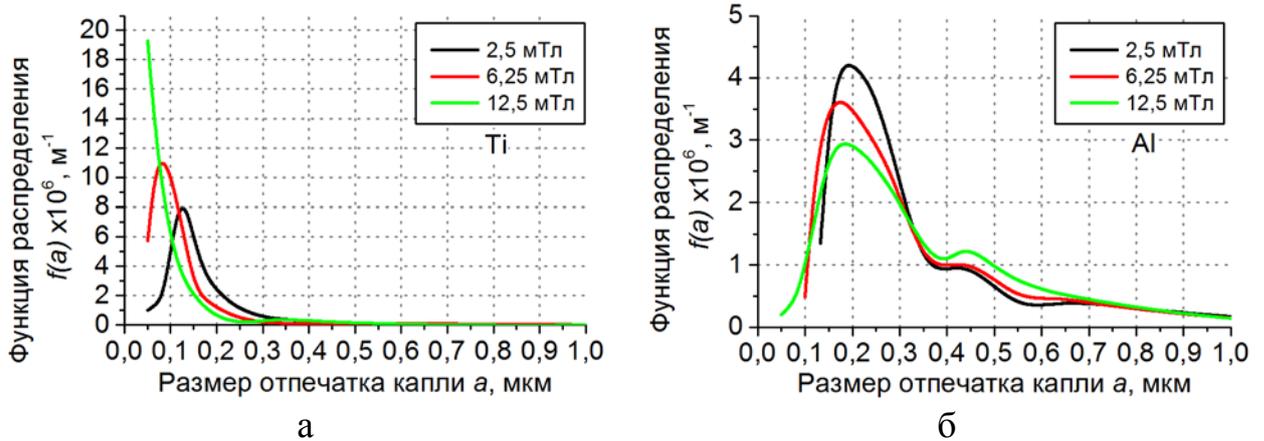


Рисунок 7.

Функция распределения капель по размерам для различных материалов при различных индукциях арочного магнитного поля
а – титан; б – алюминий

С учётом формы капель на подложке рассчитаны функции распределения по диаметрам капель в плазме вакуумно-дугового разряда из предположения сферической формы жидкой капли при пролёте разрядного промежутка. Получено распределение массы капель между фракциями капель в плазме дугового разряда. Показано, что наибольший вклад в общую массу капель вносят капли размером от 0,15 до 0,91 мкм. Оценён диапазон размеров капель, которые вносят наибольший вклад в общую массу капель (Рисунок 9). Измерения формы и размеров капель, а также расчёты

дисперсных характеристик и массовой доли капельной фазы выполнены для титана, алюминия, меди, кремния. Полученные данные использованы для разработки математической модели процессов тепломассообмена между каплями и плазмой вакуумно-дугового разряда.

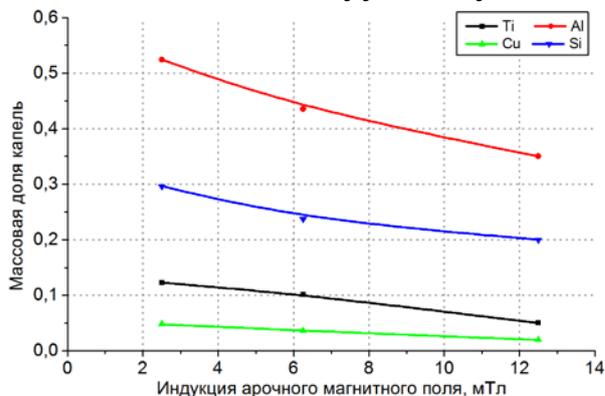


Рисунок 8.

Влияние индукции арочного магнитного поля на массовую долю капель в покрытии для различных материалов

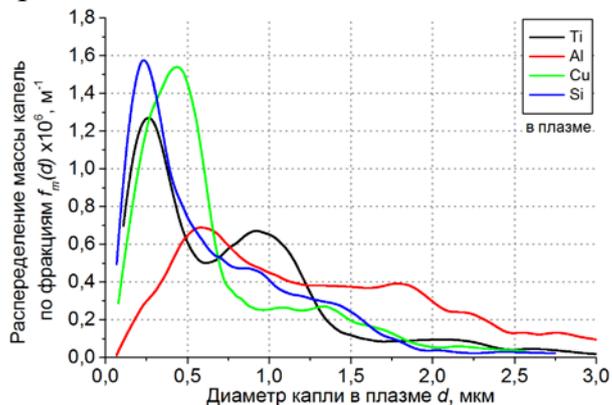


Рисунок 9.

Функции распределения массы капель между фракциями в потоке плазмы дугового разряда для различных материалов

В пятой главе проведён анализ различных процессов тепломассообмена между изолированной каплей и плазмой вакуумно-дугового разряда. Проведён расчёт тепловых потоков и потоков массы между каплями и плазмой.

Особенностью применяемой математической модели является следующее:

1. Расчёт проводился для капель диаметром 1 мкм и меньше, так как экспериментальные данные, полученные в главе 4 с учётом формы капель, показали, что большая часть массы капельной фазы переносится каплями размером от 0,15 до 0,92 мкм.
2. Впервые учитывалось изменение излучательной способности для капель субмикронного размера при уменьшении их размеров и температуры.
3. В модели учитывалось, что капля одновременно взаимодействует с тепловыми ионами и ионным пучком, генерируемым катодным пятном. При этом для учёта прихода тепловых ионов рассматривался случай, когда радиус собирающей сферы намного больше радиуса частицы и меньше радиуса Дебая, а длина свободного пробега ионов много больше радиуса Дебая. Соотношение между током тепловых ионов и током ионного пучка определялось экспериментально.

Показано, что наибольший вклад в тепловой баланс капли вносит тепловой поток со стороны приходящих на каплю ионов, а охлаждение обеспечивается, главным образом, испарением. Составлена математическая модель расчёта динамики изменения температуры и массы капли при её движении в плазме дугового разряда:

$$\begin{cases} \frac{dT}{dt} = \frac{1}{mc} \left[I_{ib} E_{ib} + I_{iT} E_{iT} - e (2\pi M_{am} kT)^{-1/2} p^*(T) \pi d^2 \varepsilon_{cs} - \varepsilon(T, d) \sigma T^4 \pi d^2 \right] \\ \frac{dm}{dt} = \frac{M_{am}}{e} (I_{ib} + I_{iT}) - M_{am} (2\pi M_{am} kT)^{-1/2} p^*(T) \pi d^2 \end{cases}$$

Ток тепловых ионов I_{iT} , ток ионов пучка I_{ib} , энергия ионов в пучке E_{ib} , энергия тепловых ионов E_{iT} , приходящих на каплю, рассчитывались, соответственно, как:

$$\begin{aligned} I_{ib} &= en_{ib} V_i \frac{\pi d^2}{4} \left(1 - \frac{2Z_{cp} e \phi_{\kappa}}{M_i V_i^2} \right); & E_{ib} &= \frac{m_i \langle V_i^2 \rangle}{2e} + Z_{cp} |\phi_{\kappa}| + \varepsilon_{cs} + \phi_i(Z) - Z_{cp} \phi_{вых}; \\ I_{iT} &= 0,4en_{iT} \sqrt{\frac{2kT_e}{M_i}} \pi d_i^2; & E_{iT} &= \langle \varepsilon_{iT} \rangle + |\phi_{\kappa}| + \varepsilon_{cs} + \phi_i(Z) - \phi_{вых}, \end{aligned}$$

где T – температура капли, К; t – переменная времени, с; d , m , c – диаметр, масса и удельная теплоёмкость капли соответственно, м, кг, Дж/кг/К; $\langle \varepsilon_{ib} \rangle = m_i V_i^2 / 2e$ – средняя энергия движения ионов в пучке, эВ; $\langle \varepsilon_{iT} \rangle = kT_{кин} / e$ – средняя энергия тепловых ионов, эВ; d_i – диаметр собирающей сферы, м; $p^*(T)$ – давление насыщенных паров материала капли, Па; M_{am} , m_i – масса атома и иона соответственно, кг; $\varepsilon(T, d)$ – излучательная способность капли; n_{iT} , n_{ib} – концентрации тепловых ионов и ионов пучка соответственно, м⁻³; V_i – скорость движения ионов в пучке, м/с; ϕ_{κ} – потенциал капли, В; ε_{cs} – энергия связи атомов, эВ; Z_{cp} – средний заряд иона в пучке; ϕ_i – потенциал ионизации, эВ; $\phi_{вых}$ – работа выхода электрона, эВ.

Площадь собирающей сферы πd_i^2 определяется приходом на каплю ионов с одной стороны и формированием объёмного положительного заряда с другой стороны. При этом размер собирающей сферы d_i может быть получен из совместного решения уравнения Ленгмюра-Блоджетта для сферического конденсатора и уравнения Бома для определения плотности ионного тока на границе собирающей поверхности:

$$I_i = \left(\frac{16\pi}{9} \varepsilon_0 \right) \left(\frac{2e}{M_i} \right)^{1/2} \frac{U^{3/2}}{\alpha_L^2}; \quad I_{iT} = 0,4n_{e0} \sqrt{\frac{2kT_e}{M_i}} \pi d_i^2.$$

Откуда

$$d_i = \left(\frac{16}{9} \left(\frac{e}{kT_e} \right)^{3/2} \frac{U^{3/2}}{\alpha_L^2} \right)^{1/2} R_D,$$

где α_L – табулированная функция Ленгмюра; U – разность потенциалов между плазмой и зондом (соответствует потенциалу капли ϕ).

Концентрации тепловых ионов и ионов пучка из катодного пятна в плазме вакуумно-дугового разряда были определены экспериментально с помощью системы двух плоских зондов, один из которых расположен перпендикулярно потоку (параллельно поверхности катода), второй расположен параллельно потоку (перпендикулярно поверхности катода). Показано, что в плазме вакуумно-дугового разряда присутствуют одновременно хаотически движущиеся ионы и высокоэнергетичный ионный пучок, но преобладают хаотически движущиеся ионы с тепловой энергией (0,1-0,2 эВ). Концентрации тепловых ионов и ионов в пучке составляют

соответственно: $n_{iT} = 0,85n_e; n_{ib} = 0,15n_e$. Потенциал капли φ_k был найден из условия равенства ионного и электронного тока на каплю.

Решение системы дифференциальных уравнений проводилось методом Рунге-Кутты четвёртого порядка точности. В качестве начальных условий было принято, что температура капли соответствует температуре плавления материала катода, начальный диаметр капли от 0,4 до 1 мкм. Пролётное расстояние было принято 250 мм. В качестве материалов капель были рассмотрены: медь, титан, алюминий, кремний. Установлено, что температура крупных капель в процессе движения ниже температуры кипения, но превышает температуру плавления материала катода для всех исследованных материалов (Рисунок 10). Получено, что магнитное поле существенно влияет на динамику испарения капель. Так, в присутствии арочного магнитного поля происходит полное испарение капель размером 0,4-0,5 мкм (для различных материалов катода), в то время как при его отсутствии размер полностью испарённых капель не превышает 0,2 мкм (Рисунок 11). Размер крупных капель с начальным диаметром более 0,5 мкм при движении в плазме уменьшается незначительно – в 1,2-2,5 раза в присутствии арочного магнитного поля и в 1,04-1,06 раза при его отсутствии (для различных материалов катода). Теоретические расчёты удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными (см. главу 3).

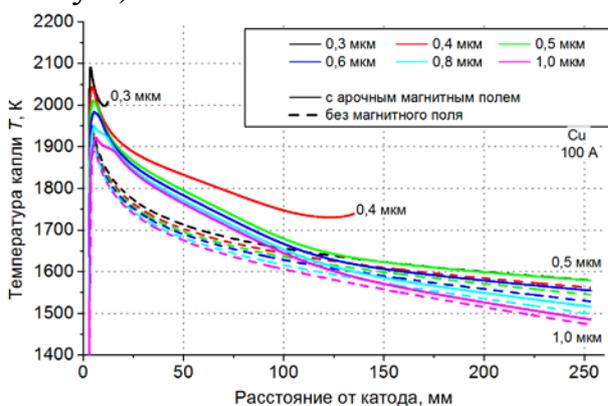


Рисунок 10.

Динамика изменения температуры капли при её движении в плазме вакуумно-дугового разряда от катода (медь)

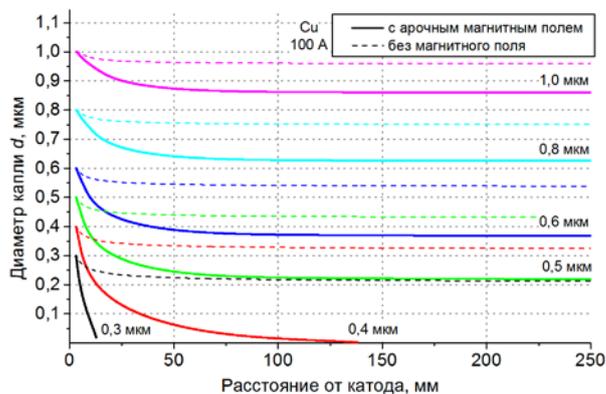


Рисунок 11.

Динамика изменения диаметров движущихся в плазме капель различного начального размера (медь)

Расчёты показали, что увеличение концентрации плазмы до значений $6 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ приводит к полному испарению капель меди размером до 1 мкм на пролётном расстоянии 250 мм (Рисунок 12). При этом увеличение температуры электронов оказывает меньшее влияние на скорость испарения капли, чем увеличение концентрации плазмы.

Даны технические предложения по разработке систем вакуумно-дугового испарения, позволяющие обеспечить существенное снижение массовой доли капельной фазы вплоть до её полного устранения, такие как

ввод дополнительной мощности в плазму и создание эффективных электронных ловушек. В качестве системы дополнительного ввода мощности предлагается использовать геликоновый разряд (индуктивный разряд в продольном магнитном поле), который позволяет увеличить концентрацию плазмы и температуру электронов во всём объёме индуктора.

В заключении даны выводы по результатам проведённых исследований, а также сделаны выводы по наиболее эффективному пути снижения капельной фазы вплоть до её полного устранения.

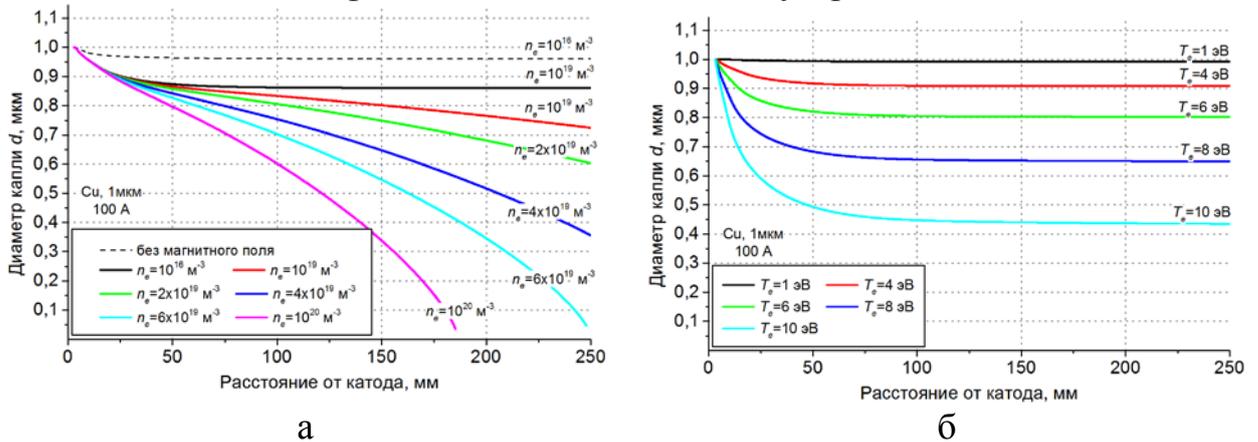


Рисунок 12.

Динамика испарения капли меди размером 1 мкм при увеличении концентрации плазмы (а) и температуры электронов (б)

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Исследованы интегральные характеристики процесса эрозии катода вакуумно-дугового испарителя с арочным магнитным полем. Показана существенная зависимость напряжения разряда от индукции арочного магнитного поля для различных материалов (титан, алюминий, медь, кремний). Получены новые количественные данные, свидетельствующие о том, что при увеличении индукции арочного магнитного поля скорость эрозии катода снижается в 1,5-3,9 раза для всех исследованных материалов. На основе разработанной методики ускоренного определения профиля эрозии катода проведена корректировка режима работы промышленного вакуумно-дугового испарителя и достигнуто увеличение коэффициента использования материала катода с 37 до 80 %.
2. Показано, что в дуговом испарителе с арочным магнитным полем капли приходят на подложку в жидком виде для всех исследованных материалов. Получены дисперсные характеристики капельной фазы в продуктах эрозии катода и показано, что диаметры капель в плазме, переносящих 80 % массы капельной фазы, составляют от 0,15 до 0,91 мкм. Показано, что при использовании арочного магнитного поля, массовая доля капельной фазы в продуктах эрозии катода снижается в 1,5-2,5 раза в зависимости от материала катода.

3. Разработана математическая модель тепломассообмена между каплями и плазмой вакуумно-дугового разряда с учётом процессов излучения субмикронных капель, прихода на каплю одновременно тепловых ионов и ионного пучка со стороны катода, испарения материала капли, термоэмиссии электронов с поверхности капли и других. Показано, что арочное магнитное поле существенно влияет на динамику испарения капель в плазме вакуумно-дугового разряда: при отсутствии магнитного поля размер крупных капель (диаметром более 1 мкм) почти не уменьшается, полное испарение капель происходит при их диаметре не более 0,2 мкм; при наличии арочного магнитного поля происходит полное испарение капель размером до 0,5 мкм, в то время как диаметр крупных капель уменьшается в 1,2-2,5 раза в зависимости от материала катода. Проведена экспериментальная проверка, подтверждающая выполненные расчёты.
4. Экспериментально показано, что при наложении внешнего арочного магнитного поля существует два механизма снижения массовой доли капельной фазы в покрытии: подавление образования капель в катодном пятне и испарение капель в плазме вакуумно-дугового разряда.
5. Показано, что интенсивность испарения капель существенным образом зависит от величины концентрации плазмы и в меньшей степени от температуры электронов. Полное испарение капель размером до 1 мкм может быть осуществлено путём увеличения концентрации до $6 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Даны технические предложения по разработке систем вакуумно-дугового испарения, обеспечивающих снижение массовой доли капельной фазы как вследствие подавления образования капель в катодном пятне, так и их испарения в плазме вакуумно-дугового разряда.
6. Впервые была показана возможность испарения хрупких полупроводниковых материалов в непрерывном режиме с помощью вакуумно-дугового разряда в арочном магнитном поле при полном отсутствии термодеструкционных разрушений катода и определены технологические режимы процесса.

Основные результаты, представленные в диссертации, опубликованы в 12 научных статьях, в том числе в 11 статьях, включенных в перечень ведущих рецензируемых научных журналов ВАК РФ:

1. Dukhopelnikov D.V., Kirillov D.V., Bulychev V.S. Characteristics of silicon microdroplets in coatings deposited by vacuum arc evaporation // Polymer Science. Series D. 2016. Т. 9. № 2. С. 238-242. DOI: 10.1134/S1995421216020040. (0,31 п.л./0,1 п.л.).
2. Духопельников Д.В., Кириллов Д.В., Булычёв В.С. Характеристики кремниевых микрокапель в покрытиях, осаждённых методом вакуумного дугового испарения // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2015. № 12, С. 18-24. (0,44 п.л./0,15 п.л.).
3. Вакуумная дуга на поликристаллическом кремниевом катоде / Духопельников Д.В., Кириллов Д.В., Воробьев Е.В. и др. // Наука и

- образование: электронный журнал. 2014. № 11. С. 188-197. Режим доступа к журналу URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/748209.html> (дата обращения: 21.01.2017). (0,63 п.л./0,125 п.л.).
4. Влияние выработки катода дугового испарителя на равномерность толщины покрытия и угловое распределение продуктов эрозии / Духопельников Д.В., Кириллов Д.В., Воробьев Е.В. и др. // Наука и образование: электронный журнал. 2014. № 4. С. 1-9. DOI:10.7463/0414.0707391. Режим доступа к журналу URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/707391.html> (дата обращения 09.09.2017). (0,56 п.л./0,19 п.л.).
 5. Духопельников Д.В., Кириллов Д.В., Щуренкова С.А. Динамика движения катодных пятен по поверхности катода в поперечном магнитном поле // Наука и образование: электронный журнал. 2012. № 1. С.1-9. Режим доступа к журналу URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/256359.html> (дата обращения: 22.01.2017). (0,56 п.л./0,19 п.л.).
 6. Духопельников Д.В., Кириллов Д.В., Рязанов В.А. Исследование профиля выработки катода дугового испарителя сарочным магнитным полем // Наука и образование: электронный журнал. 2012. № 11. С. 21-32. DOI: 10.7463/1112.0482485. Режим доступа к журналу URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/482485.html> (дата обращения: 21.01.2017). (0,75 п.л./0,25 п.л.).
 7. Вакуумная дуга с монокристаллическим кремниевым катодом для получения наноструктурированных материалов / Марахтанов М.К., Духопельников Д.В., Кириллов Д.В. и др. // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2008. № 9. С. 22-27. (0,38 п.л./0,063 п.л.).
 8. Структура и особенности движения катодного пятна вакуумной дуги на протяженном титановом катоде / Духопельников Д.В., Жуков А.В., Кириллов Д.В. и др. // Измерительная техника. 2005. № 10. С. 42-44. (0,188 п.л./0,047 п.л.).
 9. Духопельников Д.В., Кириллов Д.В. Влияние магнитного поля на вольт-амперную характеристику вакуумного дугового разряда // Наука и образование: электронный журнал. 2015. № 11. С. 124-135. Режим доступа к журналу URL: <http://old.technomag.edu.ru/doc/820267.html> (дата обращения 09.09.2017). (0,75 п.л./0,38 п.л.).
 10. Оптимизация траектории движения катодного пятна для повышения равномерности выработки катода вакуумного дугового испарителя / Духопельников Д.В., Кириллов Д.В., Рязанов В.А. и др. // Наука и образование: электронный журнал. 2012. № 01. С. 1-8. DOI:77-30569/256359. (0,56 п.л./0,13 п.л.).
 11. Жуков А.В., Кириллов Д.В., Курилович Д.А. Взаимосвязь особенностей движения катодной привязки и частоты колебаний тока разряда слаботочной вакуумной дуги // Известия высших учебных заведений. Серия: Машиностроение. 2012. № 5. С. 50-54. (0,31 п.л./0,1 п.л.).
- а также в 7-и сборниках тезисов и материалов конференций.