

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Золотухина Дениса Борисовича

«Генерация и исследование пучковой и газоразрядной плазмы для модификации материалов и электрореактивного движения»,

представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук

по специальности 01.04.04 - Физическая электроника

Актуальность темы диссертации.

Воздействие низкотемпературной плазмы и пучков заряженных частиц является эффективным методом модификации поверхностных и объемных свойств материалов различной физической природы. Применение форвакуумных плазменных источников электронов, устойчиво функционирующих при давлениях от единиц до сотни Па, значительно упрощает проведение электронно-лучевой обработки диэлектрических материалов, поскольку в этом случае не требуется принятия специальных мер для нейтрализации зарядки электронным пучком поверхности обрабатываемого изделия. Это расширяет область применения электронно-лучевых технологий, включая электронно-лучевой синтез покрытий, а также стерилизацию внутренних поверхностей в диэлектрических полостях. Однако, несмотря на заметный прогресс форвакуумных плазменных источников электронов и успешную демонстрацию возможностей их применения для модификации материалов, физические аспекты генерации пучковой плазмы в условиях электронно-лучевого испарения мишени, а также транспортировки электронного пучка в диэлектрических полостях требуют проведения более детальных и комплексных исследований. Недостаточно исследованы и особенности синтеза покрытий электронно-лучевым испарением диэлектриков в сочетании с сопровождением процесса осаждения ионами пучковой плазмы.

Возрастающая в настоящее время потребность в малых космических аппаратах привела к появлению маломощных двигателей для ориентации и коррекции орбиты аппаратов. Одним из направлений развития миниатюрных двигателей является использование импульсной вакуумной дуги. Однако, для широкого применения таких плазменных двигателей требуется обеспечить высокие энергетические показатели при низких массогабаритных параметрах, а также увеличить время безаварийной работы таких плазменных двигателей. Изучение физических процессов в миниатюрных импульсных вакуумно-дуговых двигателях с целью повышения их параметров и ресурса является важной задачей.

Таким образом, тематика исследований диссертационной работы, направленная на изучение физических процессов в ряде плазменных и газоразрядных устройств, имеющих

перспективы практического применения, является актуальной.

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка цитируемой литературы и списка опубликованных автором работ по теме диссертации.

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована актуальность исследований, проведенных в рамках диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, решению которых посвящена работа.

Первая глава посвящена особенностям взаимодействия электронного пучка с диэлектрической мишенью при форвакуумных давлениях газа. Рассмотрены условия образования и параметры плазмы, образуемой при электронно-лучевом воздействии на диэлектрическую мишень. Приведены результаты исследования генерации пучковой плазмы в диэлектрической полости.

Вторая глава посвящена пучково-плазменному синтезу покрытий при электронно-лучевом испарении диэлектрической мишени в форвакуумной области давлений. Рассмотрены особенности генерации многокомпонентной плазмы при электронно-лучевом испарении мишени с низкой степенью электрической проводимости. Приведены результаты работ по осаждению покрытий из многокомпонентной пучковой плазмы, а также проанализированы особенности синтеза покрытий из плазмы импульсного дугового разряда повышенных давлений.

В третьей главе изложены особенности функционирования импульсного вакуумного дугового разряда в плазменных двигателях малых космических аппаратов. Рассмотрены задачи повышения энергетической эффективности и ресурса первой ступени вакуумно-дугового двигателя, а также приведены результаты работ по повышению параметров двигателя путем добавления второй ступени.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Научная новизна работы заключается в том, что в ней:

1. Выявлен определяющий вклад в ионизационные процессы вторичной электронной и ионно-электронной эмиссии с поверхности мишени, облучаемой электронным пучком в условиях форвакуума. Определены коэффициенты вторичной электронной эмиссии для диэлектрических материалов и оценен установившийся потенциал облучаемой поверхности.

2. Измерены параметры пучковой плазмы и определены условия инициирования пучково-плазменного разряда при распространении электронного пучка в свободном пространстве и его инжекции в диэлектрическую полость в условиях форвакуума. Определен физический механизм, обуславливающий более высокие параметры пучковой плазмы при инжекции электронов в диэлектрическую полость.

3. Установлена степень влияния давления и рода газа на скорость нагрева и установившуюся температуру диэлектрической мишени при ее нагреве электронным пучком в форвакуумном диапазоне давлений.

4. Предложен и реализован метод получения композитных покрытий, основанный на последовательном электронно-лучевом испарении металлических и диэлектрических мишеней в форвакуумной области давлений. Определена скорость нанесения, измерены параметры и исследованы характеристики таких покрытий.

5. Предложен и реализован двухступенчатый вакуумно-дуговой плазменный двигатель, обеспечивающий повышение уровня полной и удельной тяги устройства. Показано, что электронно-лучевое осаждение защитного борсодержащего покрытия на межэлектродную поверхность вакуумно-дугового плазменного двигателя обеспечивает кратное увеличение его ресурса.

Научная и практическая значимость работы обусловлена тем, что в ней:

1. Изучены основные физические закономерности, характеризующие взаимодействие электронного пучка с энергией электронов от единиц до десяти кэВ с мишенями различной степени электрической проводимости в среде различных газов при форвакуумных давлениях с образованием многокомпонентной плазмы, содержащей ионы рабочего газа, остаточной атмосферы и паров материала мишени. Полученные знания позволили разработать методы осаждения многослойных комбинированных защитных и функциональных покрытий.

2. Создан новый тип маломощных устройств для электрореактивного движения малых космических аппаратов – вакуумно-дуговой двигатель с магнитоплазодинамическим ускорением плазмы. Совокупность параметров созданного устройства (тяга до 2 мН, отношение тяги к мощности до 37 мкН/Вт, энергетический КПД до 50%, потребляемая мощность менее 50 Вт) в настоящее время является рекордной для электрореактивных двигателей малых космических аппаратов. Достижение высоких параметров стало возможным в результате использования второй ступени дуговой разрядной системы во внешнем магнитном поле.

Замечания по диссертационной работе

1. Глава 1., стр. 13. Автором обнаружен и исследован очень интересный эффект немонотонного изменения температуры электронов с ростом концентрации паров металла в плазме, генерируемой электронно-лучевым испарением меди в гелиевой среде. Предложена физическая модель, основанная на балансах энергии и числа частиц в плазме, и проведены расчеты, результаты которых удовлетворительно совпадают с экспериментом. Однако,

качественное объяснение изменения температуры электронов, основанное на повышении уносимой ионами меди из разряда энергии по мере роста энерговклада пучка и увеличения концентрации атомов металла в плазме, мне не кажется убедительным. В модели потери энергии пучка на ионизацию растут монотонно с увеличением концентрации паров меди во всем диапазоне ее изменения, монотонно возрастает и энергия, уносимая возрастающим потоком ионов меди на стенки. Непонятно, в силу каких физических причин при этом меняется температура плазменных электронов и, причем, меняется немонотонно.

2. Глава 1., стр. 21. В результате анализа масс-зарядового состава ионов пучковой плазмы при азотировании титана автор обнаружил (Рис. 11), что повышение давления приводит к увеличению интенсивности пика атомарного азота в масс-спектре и интерпретировал этот факт, как резкое увеличение доли атомарного азота в плазме, ожидаемым следствием которого является рост эффективности азотирования. Однако, следует учитывать, что применение масс-спектрометрического метода при повышенных давлениях газа может приводить к значительным ошибкам измерений, в частности, наблюдавшееся увеличение отношения амплитуды линии атомарного азота к молекулярной линии может быть обусловлено интенсивной перезарядкой молекулярных ионов на молекулах азота в трубе дрейфа на входе в спектрометр, что приводит к изменению соотношения линий в масс-спектре. Эффект исследовался ранее, результаты описаны в работе [N.V. Gavrilov, O.A. Bureyev. Mass Analysis of Plasma Generated by Low-Energy Electron Beam in Low-Pressure N₂-Ar Mixtures. Proc. 16th International Symposium on High-Current Electronics, September 19—24, 2010, Tomsk, Russia, p. 35-38].

3. Глава 1, стр. 12. Автор отмечает, что «Особенностью форвакуумного диапазона давлений (1-100 Па) является тот факт, что при распространении электронного пучка в газе происходит формирование плотной пучковой плазмы, концентрация заряженных частиц в которой многократно превышает концентрацию электронов в пучке».

Точнее было бы написать, что это особенность распространения электронного пучка в газе при давлениях 1-100 Па.

4. Глава 3, стр. 38. Автор отмечает, что «Жесткие ограничения на размер, цену, вес и мощность, которые накладывает применение таких двигателей в малых космических аппаратах, ограничивают выбор доступных материалов электродов легкими, дешевыми, широкодоступными и легко обрабатываемыми металлами, такими как медь и титан».

По этому поводу уместно заметить, что стоимость запуска и вывода на орбиту космического аппарата настолько высока, что на ее фоне экономия на материале электродов миниатюрного двигателя представляется несущественной. Скорее всего, выбор обусловлен свойствами материалов.

5. Там же. Автор пишет, что «Подробное изучение зависимости ресурса маломощного (несколько Вт) вакуумно-дугового двигателя было стимулировано ограниченным числом публикаций по данному вопросу».

Все же, наверное, проведение исследований было стимулировано возникшей технической потребностью, которая, как писал Ф. Энгельс, «...продвигает науку вперед больше, чем десяток университетов».

6. Глава 1. Стр. 15. Автор описывает предложенный способ измерения потенциала диэлектрической мишени по отношению интенсивностей линий гелия I_{501}/I_{587} : «Физическая основа метода заключается в том, что энергии вторичных электронов, необходимые для возбуждения свечения атомов или молекул газа, как правило, меньше энергии ионизации, и это позволило по соотношению интенсивностей разных линий свечения рабочего газа оценить потенциал мишени даже в случае, когда он достаточно мал (менее 100 В)».

Точнее было бы сказать, что метод основан на зависимости сечения возбуждения линии от энергии электронов, в данном случае, вторичных электронов, а то, что пороговая энергия электронов и максимум сечения возбуждения находятся в области малых энергий – это, скорее, особенность метода.

7. Глава 1. Стр. 19. Автор описывает зависимость концентрации плазмы от потенциала мишени для нескольких энергий пучка (рис. 8). «Рост ускоряющего напряжения в изученном диапазоне вызывает снижение коэффициента вторичной электронной эмиссии и, соответственно, сечения ионизации электронами пучка. Все эти факторы приводят к снижению концентрации плазмы после достижения максимума». Скорее всего, в этой фразе речь идет о частоте ионизаций и не электронами пучка, а вторичными электронами.

8. Глава 2, стр. 28. Автор описывает зарядку поверхности алюмооксидной керамики под действием пучка. «Совершенно другая ситуация наблюдается в случае мишени из алюмооксидной керамики. Разность потенциалов $\Delta\phi$ между гранями ее поверхности (при условии постоянства протекающего через мишень тока пучка и полного отсутствия пучковой плазмы) составила бы от 3,6 кВ (при ~ 1300 °С) до 10 МВ (при 600 °С). В скобках следовало бы добавить еще одно условие «при бесконечно большой энергии электронов».

9. Глава 3, стр. 46. Автор обсуждает эффект «активации» разряда во второй ступени. Из контекста следует, что речь идет о переключении разряда на основной анод после зажигания вспомогательного разряда, для чего напряжение на основном аноде должно быть выше потенциала плазмы. В ряде публикаций эта ситуация ранее рассматривалась достаточно детально. Непонятно, зачем понадобилось вводить новый термин при описании хорошо известного и исследованного явления. Возможно, автор хотел акцентировать внимание именно

на скачкообразном увеличении количества выбрасываемых двигателем ионов.

Большинство приведенных замечаний объясняется небрежностью изложения, и, в целом, замечания не влияют на общую положительную оценку работы.

Диссертационная работа Золотухина Д.Б. выполнена на высоком научном уровне и содержит решение научно-технической проблемы генерации пучковой и газоразрядной плазмы в условиях повышенных давлений форвакуумного диапазона, которая имеет важное значение для развития плазменной эмиссионной электроники, а также предложены новые научно обоснованные технические решения в области инновационных технологий электронно-лучевой и ионно-плазменной модификации диэлектрических изделий, синтеза диэлектрических покрытий и разработки электрореактивных плазменных двигателей. Диссертация представляет собой законченное исследование. Результаты работы достаточно полно представлены в публикациях автора. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Таким образом, диссертация Золотухина Дениса Борисовича удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, её автор заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.04 – Физическая электроника.

Официальный оппонент

д.т.н., член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник ФГБУН

«Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук»

620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 106, Тел.: (343) 267-87-96

e-mail: gavrilov@iep.uran.ru



Гаврилов Николай Васильевич

«25» 05 2022 г.

Подпись Гаврилова Николая Васильевича заверяю:

Ученый секретарь ИЭФ УрО РАН

к.ф.-м.н.



/Кокорина Е.Е./

«25» 05 2022 г.