

Отзыв

официального оппонента, д.ф.-м.н. Кралькиной Елены Александровны, в.н.с. физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, на диссертационную работу Машерова Павла Евгеньевича "Разработка космического источника ионов на основе высокочастотного ионного двигателя", представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – "Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов"

Актуальность темы

В настоящее время большое количество отработавших космических аппаратов, находящихся на геостационарной орбите (ГСО), представляет угрозу для безопасности новых космических миссий. Основные принципы предупреждения образования космического мусора приняты в ООН и закреплены в нашей стране государственным стандартом. Согласно указанным документам космические аппараты после завершения работы должны быть уведены из области ГСО. В связи с этим диссертационная работа Машерова П. Е., посвященная разработке источника ионов для удаления крупногабаритных объектов космического мусора с ГСО, является актуальной.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

На основе критического анализа литературы и требований к параметрам источников ионов, необходимых для вывода крупногабаритного мусора из области ГСО, автором поставлена задача разработать источник на основе индуктивного ВЧ-разряда, где возможно получение плазмы высокой плотности при относительно невысоких мощностях, вложенных в плазму, и отсутствует контакт плазмы с электродами, поддерживающими разряд. Последнее указывает на возможность повышения ресурса источника ионов. Кроме того, автор делает вывод, что специфика рассматриваемой технической задачи требует создания ионного пучка клиновидной формы, существенно отличающегося от конусообразных ионных пучков известных космических ионных двигателей. Постановка задачи и предлагаемые П. Е. Машеровым методы ее решения представляются обоснованными и выполненными на высоком научно-техническом уровне. Список использованной литературы содержит 138 наименований. Выводы и результаты, полученные диссертантом, обоснованы и достоверны, так как опираются на многочисленные экспериментальные данные, выполненные с помощью современных, частично усовершенствованных автором экспериментальных методов исследования ВЧ-



разряда, а также на данные, полученные с помощью численного моделирования, и на результаты, полученные другими авторами.

Достоверность и новизна исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Новизна результатов, полученных автором диссертации, подтверждается:

- выбором узла ввода ВЧ-мощности и схмотехнического решения линии питания индуктивного ВЧ-разряда;
- использованием интегральной диагностики энергоэффективности внешней цепи разряда и энерговклада в плазму;
- разработанной методикой измерения массы ионов и толщины объемного заряда на цилиндрическом зонде;
- результатами моделирования ускорительных ячеек ионно-оптической системы;
- использованием щелевой ионно-оптической системы и получением клиновидного пучка ионов.

Достоверность результатов подтверждается многочисленными экспериментальными данными, полученными с помощью современных, частично усовершенствованных автором экспериментальных методов исследования ВЧ-разряда, а также данными, полученными с помощью численного моделирования, включая сравнение там, где это возможно, с результатами других авторов.

Значимость для науки и практики полученных автором результатов

Работа, выполненная П. Е. Машеровым, представляет интерес как в целом, так и в отдельных ее частях. Так, разработанный прототип источника ионов имеет несомненное будущее как в заявленном диссертантом применении для очистки ГСО от крупногабаритного мусора, так и в наземных технологиях модификации поверхности материалов, напыления покрытий, травления и т.д. Кроме того, использованная методика оценки энергоэффективности внешней цепи индуктивного ВЧ-разряда и энерговклада в плазму должна стать необходимым подготовительным элементом всех разработок на основе ВЧ разряда. Предложенные в диссертации усовершенствования зондового метода, являющегося основным методом изучения плазмы, расширяют возможности получения информации об исследуемых плазменных объектах.

Конкретные рекомендации по использованию результатов диссертации

Результаты диссертации могут быть использованы при разработках и/или создании ВЧ ионных источников или ионных двигателей на ряде предприятий, связанных с Роскосмосом: ЦНИИМаш, ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», АО «КБ химавтоматики» (АО КБХА), ОКБ «Факел», АО «ИСС» им. академика М. Ф. Решетнёва.

Содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения.

В **первом** разделе диссертации выполнен обзор литературы, проанализированы требования к разработке ВЧ источника ионов для космических приложений, обосновано использование плоских индукторов с ферритовым сердечником в качестве узла ввода ВЧ-мощности.

Во **втором** разделе диссертации описана лабораторная модель источника ионов, экспериментальный стенд для ее испытания, представлены результаты отработки системы поджига разряда.

В **третьем** разделе описаны методологические вопросы, связанные с измерением и оптимизацией интегральных характеристик узла ввода ВЧ-мощности без разряда и с разрядом, а также приведены основные параметры зондов Ленгмюра и методик зондовых измерений, использованных для диагностики плазмы в ВЧ-источнике ионов.

Интегральная диагностика узла ввода ВЧ-мощности, выполненная диссертантом, подтвердила возможность заметного упрощения конструкции модели и её повышенную энергоэффективность.

Использованная в работе автоматизированная зондовая станция VGPS-12 обеспечивает повышенную точность классических зондовых измерений, которые проводятся в режиме реального времени. Диссертанту удалось расширить область применения цилиндрических и плоских зондов Ленгмюра, а именно предложить методики измерения толщины зондового слоя и массы ионов рабочего газа. Автором показано, что плоские зонды в составе имитатора пристеночного плоского зонда обеспечивают оценку плотности ионного тока на стенку под плавающим потенциалом, каковой является эмиссионный электрод ионно-оптической системы источника ионного пучка.

В **четвертом** разделе представлены результаты исследования плазмы в газоразрядной камере источника ионов. Проведённые эксперименты показали повышенную равномерность плазмы перед электродами ионно-оптической системы, позволили предсказать значения плотности ионного тока на эмиссионный электрод. Эти

результаты были использованы в дальнейшем при проектировании ускорительных ячеек модели ионно-оптической системы. Оценивая результаты, представленные в четвертом разделе, следует отметить детальный анализ корректности выполненных измерений.

Пятый раздел диссертации посвящен поиску конструктивных особенностей ионно-оптической системы, позволяющей минимизировать угол расходимости ионного пучка, созданию электродов и отработке характеристик лабораторной модели источника ионов с электродами ионно-оптической системы со щелевыми отверстиями, которые согласно расчётным результатам должны формировать ионный пучок с полууглом расходимости поперёк щелей в 3-4 градуса. Испытания модели на большой вакуумной камере подтвердили правильность расчётной подготовки ИОС и показали улучшенный полуугол поперечной расходимости ионного пучка в пределах 2-3 градусов при практически нулевом угле расходимости ионного пучка вдоль щелевых отверстий ИОС.

В целом испытания лабораторной модели показали её повышенную эффективность, что весьма важно для успешного решения задач увода объектов космического мусора с геостационарной орбиты.

Достоинства и недостатки работы

Диссертация П.Е. Машерова является законченной работой, в которой предложен и апробирован новый ВЧ-источник ионов с конкурентноспособными параметрами. Работу отличает большое внимание к методологическим аспектам, анализу корректности использованных методов диагностики плазмы. Вместе с тем работа не свободна от недостатков:

1. В работе выполнено сравнение баланса мощности в разрабатываемом диссертантом источнике ионов и источнике типа RIT. Внешняя цепь указанных источников содержит системы согласования разного вида. В связи с этим выполненное сравнение потерь ВЧ-мощности во внешней цепи представляется некорректным. Известно, что эффективность энерговклада в плазму с помощью того или иного узла ввода ВЧ-мощности характеризуется эквивалентным сопротивлением плазмы. Представляло бы большой интерес сравнение эквивалентного сопротивления плазмы, возбуждаемой планарной антенной с ферритовым сердечником, с той же величиной, полученной при возбуждении индуктивного разряда соленоидальной антенной RIT.

2. Разработанная зондовая методика определения массы ионов может представлять интерес для диагностики плазмы сложных, химически активных газов. В диссертации

отсутствует оценка погрешности метода, его чувствительности к изменению среднего массового состава ионной компоненты плазмы.

3. В работе присутствуют погрешности в оформлении диссертации, иногда курьезные. Так, в диссертации говорится об «электродинамике электрона».

4. В работе используется большое количество аббревиатур, затрудняющих чтение. Целесообразно было бы свести аббревиатуры в отдельный список и поместить их в начало работы.

В целом отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы. Диссертация П.Е. Машерова является законченной научно-квалификационной работой, посвященной разработке источника ионов на основе ВЧ-ионного двигателя для задач увода крупномасштабного мусора с ГСО. Диссертация написана логичным, ясным языком. Автореферат правильно и полно отражает её содержание. Результаты опубликованы в 21 печатной работе, в их числе 5 статей в рецензируемых научных журналах из списка ВАК.

Представленная работа соответствует требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Доктор физико-математических наук,
Ведущий научный сотрудник
физического факультета МГУ
119991, Москва, Ленинские горы,
МГУ, физический факультет,
кафедра физической электроники
Телефон: +7(495)939-4773
e-mail: ekralkina@mail.ru

Кралькина Е.А.

Декан физического факультета МГУ
доктор физико-математических наук, профессор

