

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Швыдкого Георгия Вячеславовича «Характеристики высокочастотного емкостного разряда в квазирадиальном магнитном поле», представленную на соискание ученой степени кандидата физико – математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы

Характерной особенностью нашего времени является активизация исследований и практической деятельности по изучению и освоению окружающего Землю космического пространства. Диссертационная работа Швыдкого Г.В. посвящена детальному изучению физического механизма высокочастотного емкостного разряда (ВЧЕР) в квазирадиальном магнитном поле в разрядной камере с традиционной геометрией стационарного плазменного двигателя (СПД) для космических полетов. При этом имеются в виду полеты космических аппаратов на сверхнизких околоземных орбитах (~ 200 км), где наличие остаточной атмосферы требует применения двигателей, способных долговременно работать не только на инертных газах, но и на их смесях с воздухом и, в идеале, исключительно на воздухе. По данным литературы, в силу целого ряда перечисленных диссертантом причин, в качестве естественного кандидата на обеспечение рабочего процесса упомянутых двигателей выступает ВЧЕР.

ВЧЕР низкого давления в течение многих лет является объектом интенсивных фундаментальных исследований, обусловленных как богатством происходящих в нем физических процессов, так и широкими возможностями его практического применения. Согласно сказанному, тема диссертационной работы Г.В. Швыдкого является актуальной как с научной, так и практической точек зрения.

**Целью диссертационной работы** является комплексное исследование влияния внешних параметров на свойства ВЧЕР низкого давления при наличии внешнего магнитного поля с преимущественной радиальной составляющей.

Для достижения поставленной цели автор решает в диссертации следующие **задачи**:

1. На основе обзора литературы выделить и проанализировать влияние внешних параметров ВЧЕР на параметры плазмы и распределение потенциала в приэлектродных слоях разряда.

2. Экспериментально исследовать продольное распределение параметров плазмы в источнике плазмы и в струе на выходе из источника, имеющего геометрию СПД, в зависимости от величины внешнего магнитного поля, рабочей частоты, расхода и типа рабочего газа в двух режимах горения разряда при наличии и отсутствии замыкания электродов по постоянному току.
3. Экспериментально исследовать электротехнические характеристики разряда, а именно действительную и мнимую части его импеданса, в зависимости от величины внешнего магнитного поля, рабочей частоты, расхода и типа рабочего газа в двух режимах горения разряда: при наличии и отсутствии замыкания электродов по постоянному току.

4. Экспериментально исследовать влияние подключения дополнительного канала постоянного тока на параметры ЕВЧР и исходящей из него плазменной струи, при наличии внешнего магнитного поля с преимущественной радиальной составляющей. **Новизна** полученных в диссертации результатов подтверждается тем, что впервые проведены комплексные экспериментальные исследования фундаментальных физических свойств ВЧЕР низкого давления, помещенного в магнитное поле с радиальной составляющей в условиях геометрии СПД, в результате определены локальные и интегральные параметры плазмы, ВАХ разряда, квазистационарный потенциал плазмы, энергия ионов и распределение концентрации плазмы вдоль разрядного канала при различных схемах организации разряда. Впервые изучена частотная (2, 4 и 13.56 МГц) зависимость интегральных характеристик указанного разряда – ВАХ, сдвига фаз между ВЧ напряжением и током, энергии и плотности ионного пучка. Новые полученные результаты позволяют рассматривать исследованный источник ионов в качестве прообраза электрического ракетного двигателя (ЭРД). При этом измерены энергия и плотность ионного потока для рабочих газов криптон и воздух, использование которых актуально в современных ЭРД.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается тем, что экспериментальная работа проводилась с использованием надежного сертифицированного оборудования и общепринятых методик измерений и диагностики плазмы. В работе применялись современные методы сбора, хранения и обработки данных, а результаты сопоставлялись с ранее проведенными надежными исследованиями, теоретическими расчетами и математическим моделированием.

**Практическая ценность результатов**, полученных в работе, заключается в том, что приобретенная научно-техническая информация необходима при разработке и оптимизации ЭРД с геометрией СПД, а также – промышленного источника ионов для наземного применения.

Отметим наиболее существенные полученные в работе результаты, относящиеся к выяснению физического механизма исследованного ВЧЕР и важные для его практического технического применения:

- Изучены три модификации ВЧЕР, отличающиеся схемами его организации, приводящими к значительным отличиям в локальных и интегральных параметрах разряда, на основании чего сделаны выводы о возможности области применимости каждой схемы.
- Исследованная многопараметрическая экспериментальная схема ВЧЕР в поперечном магнитном поле дает значительные возможности для оптимизации созданного на его основе источника плазмы в отношении конкретного практического применения.
- Представляют интерес результаты изучения аксиальных распределений локальных значений концентрации плазмы  $n_e$  (Рис. 56), значений потенциала  $U_s$  (Рис.57), а также – значения средней энергии ионного пучка (Рис.63) для режимов ВЧЕР, соответствующих условиям для создания ЭРД.
- Исследовано влияние частоты ВЧ генератора как фундаментального параметра ВЧЕР в поперечном магнитном поле на его интегральные параметры, в частности, на частотную зависимость импеданса разряда.
- Экспериментально показано практическое отсутствие влияния величины индукции магнитного поля в широком диапазоне на параметры исследованного ВЧЕР.

Диссертационная работа включает в себя: введение, 4 главы, заключение и список цитируемой литературы. Объем диссертации составляет 161 страницу и содержит 79 рисунков и 1 таблицу. Библиография состоит из 109 наименований. Автореферат диссертации достаточно полно отражает содержание работы. Основные результаты и положения диссертационной работы опубликованы в научной печати и представлены на научных конференциях и семинарах.

По содержанию и оформлению работы можно сделать следующие замечания:

- 1) В тексте диссертационной работы разделы **Введение** и Глава1 **Обзор литературы** занимают не вполне оправданно существенную часть общего объема диссертации.

- 2) В состав основных положений диссертации, выносимых на защиту, не внесена важная задача исследования 4, хотя она, естественно, и нашла отражение в выводах **Заключения** диссертации.
- 3) Главу 4 **Импеданс разряда** было бы логичнее не делать последней в тексте диссертации, поскольку в приведенной редакции она воспринимается несколько обособленно от основного текста работы.
- 4) В тексте диссертации встречаются отдельные опечатки, орфографические ошибки (например, на стр. 83, 84), на стр.96-97 имеется неудачная фраза: «...сдвиг фаз между ВЧ полем и напряжением существенно возрастает и приближается к 0 град.» Однако, сделанные замечания не снижают ценности диссертационной работы, являющейся завершенным научным трудом, содержащим новую информацию о сложном механизме ВЧЕР в поперечном магнитном поле и широких возможностях его практического применения.  
В соответствии с выше изложенным, следует заключить, что работа Швыдкого Г.В. удовлетворяет всем требованиям, установленным Положением о присуждении ученых степеней в МГУ имени М.В. Ломоносова и паспорту специальности 1.3.9 – физика плазмы, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико – математических наук по специальности 1.3.9. – физика плазмы.

Доцент кафедры «Физика  
полупроводников и криоэлектроники»  
физического факультета МГУ,  
доктор физ.-мат. наук

В.П. Савинов

Подпись д.ф.-м.н. Савинова В.П. удостоверяю,