

**ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук Кропоткина Андрей Никитича
на тему: «Физические процессы в плазме индукционных разрядов в
реакторах для обработки материалов микроэлектроники»
по специальности 1.3.9. Физика плазмы**

Диссертационная работа Кропоткина Андрея Никитича посвящена исследованию физических процессов в низкотемпературной плазме индукционных разрядов, используемых в современных реакторах плазменной обработки материалов микроэлектроники, а также разработке самосогласованных численных моделей, позволяющих описывать электромагнитные, газодинамические и плазмохимические процессы в таких системах. Работа относится к числу исследований, находящихся на стыке фундаментальной физики плазмы и прикладных задач микро- и нанoeлектроники, что определяет ее высокую научную и практическую значимость. **Актуальность** выбранной темы обусловлена возрастающими требованиями современной микроэлектронной промышленности к точности управления плазменными технологическими процессами, необходимостью создания моделей, способных надежно прогнозировать характеристики разрядов в сложных газовых смесях, а также развитием методов численного моделирования, позволяющих существенно сократить объем дорогостоящих экспериментальных исследований.

Во введении диссертации подробно обоснована актуальность и научная новизна темы, а также сформулированы цель и задачи работы.

В диссертации приведен подробный обзор литературы, посвященной численному моделированию индукционных разрядов и физическим процессам в низкотемпературной плазме. Рассмотрены существующие гидродинамические и кинетические подходы, их достоинства и ограничения, что позволило обоснованно сформулировать задачи настоящего исследования и определить направления дальнейшего развития методов моделирования.

В первой главе диссертации автором описана разработанная самосогласованная гидродинамическая модель индукционного разряда в

аргоне с учетом неоднородности температуры и течения нейтрального газа. Представленные результаты имеют самостоятельную научную ценность, поскольку позволяют количественно оценить влияние процессов, которыми в ряде ранее разработанных моделей пренебрегали.

Во второй главе рассматриваются вопросы применимости различных приближений для описания движения ионов в плазме. Автор проводит систематическое сравнение результатов, полученных при использовании полного уравнения сохранения импульса ионов и традиционного диффузионно-дрейфового приближения. Представленные результаты имеют важное методическое значение, поскольку позволяют более обоснованно выбирать используемые модели при численном моделировании технологических разрядов.

Третья глава посвящена исследованию индукционных разрядов в кислороде, хлоре, а также их смесях с аргоном. Следует отметить значительный объем проделанной работы по построению и адаптации плазмохимических схем реакций для электроотрицательных газов. Автор анализирует влияние состава смеси на концентрации активных частиц, степень электроотрицательности плазмы и потоки ионов на обрабатываемую поверхность. Особый интерес представляют результаты моделирования тройной смеси $O_2/Cl_2/Ar$, позволяющие объяснить изменение состава активных радикалов и особенности режимов плазменного травления рутения.

В четвертой главе представлены результаты исследования индукционных разрядов во фторуглеродных газах C_4F_8 и C_3F_8 . Существенным результатом работы является разработка плазмохимической схемы реакций и набора сечений электронных процессов для газа C_3F_8 , что позволило впервые выполнить самосогласованное моделирование индукционного разряда в данном газе. Проведенные расчеты в C_4F_8 демонстрируют изменение состава плазмы и распределения активных компонентов при изменении мощности разряда, что представляет несомненный интерес для практического применения при разработке процессов атомно-слоевого плазменного травления материалов микроэлектроники.

Полученные результаты логично обобщены в заключении, где сформулированы основные выводы исследования и показано, что поставленные во введении задачи успешно решены.

Одним из достоинств диссертационной работы является то, что разработанные автором плазмохимические модели проверены на большом количестве опубликованных в литературе экспериментальных данных. Используемые автором наборы сечений взаимодействия электронов с молекулами и атомами являются самосогласованными, т. е. рассчитанные для отдельных “чистых” газов коэффициенты переноса, константы скорости ионизации и диссоциативного прилипания в зависимости от приведенного электрического поля хорошо согласуются с экспериментальными результатами. Перечисленное выше гарантирует высокую предсказательную способность созданных автором плазмохимических моделей.

Всем полученным в диссертации расчетным зависимостям автор дал ясное физическое объяснение.

Научная новизна диссертационной работы не вызывает сомнений. К числу наиболее значимых результатов следует отнести разработку самосогласованной гидродинамической модели индукционного разряда, учитывающей неоднородность температуры и течение нейтрального газа, разработку новых плазмохимических схем реакций для разрядов во фторуглеродных газах, включая C_3F_8 , а также моделирование процессов в многокомпонентных электроотрицательных смесях. Большинство перечисленных результатов получено впервые и представляет собой существенный вклад в развитие моделирования низкотемпературной плазмы.

Степень обоснованности **научных положений**, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, представляется высокой. Выбор математического аппарата является обоснованным и соответствует современному уровню развития вычислительных методов в физике плазмы. Особое внимание уделено анализу ограничений некоторых применяемых приближений, что свидетельствует о критическом подходе автора к интерпретации полученных результатов.

Достоверность результатов работы обеспечивается использованием современных методов математического моделирования, сопоставлением

результатов расчетов с опубликованными экспериментальными данными, а также внутренней согласованностью полученных зависимостей. Важным аргументом в пользу достоверности работы является также успешная апробация результатов на международных научных конференциях и публикация основных результатов исследования в рецензируемых научных изданиях.

Несмотря на безусловно высокое качество выполненной работы, по диссертации имеются отдельные замечания.

1. В диссертации подробно исследовано влияние различных физических факторов на характеристики индукционного разряда, однако обсуждение чувствительности результатов моделирования к неопределенности используемых плазмохимических констант носит ограниченный характер. Между тем для сложных молекулярных и особенно фторуглеродных смесей такая неопределенность может оказывать заметное влияние на количественные результаты расчетов.

2. При анализе результатов моделирования автор в основном рассматривает стационарные режимы работы реакторов. Представляло бы интерес обсуждение возможностей дальнейшего развития предложенной модели применительно к импульсным режимам возбуждения индукционного разряда, которые в настоящее время активно используются в технологической практике.

3. В разных главах диссертации для одних и тех же величин (плотность концентрации, константа скорости реакции) используются разные единицы измерения, что представляет некоторое неудобство при чтении.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М. В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.9. Физика плазмы (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М. В. Ломоносова. Диссертационное исследование оформлено согласно требованиям Положения о совете по защите

диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Кропоткин Андрей Никитич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9. Физика плазмы.

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник отдела теоретической физики, вычислительной
математики и перспективных разработок,
Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт
инновационных и термоядерных исследований (ГНЦ РФ ТРИНИТИ)

Кочетов Игорь Валерианович

Дата подписания: 21.08.2026

Контактные данные:

тел.: 7() , e-mail: kochet@triniti.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

01.04.03 – Радиофизика, включая квантовую радиофизику

Адрес места работы:

108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Пушкиновых, вл. 12,
Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт
инновационных и термоядерных исследований (ГНЦ РФ ТРИНИТИ), отдел
теоретической физики, вычислительной математики и перспективных
разработок

Тел.: 7...; e-mail: kochet@triniti.ru

Подпись И.В. Кочетова удостоверяю:
Ученый секретарь ГНЦ РФ ТРИНИТИ,
кандидат физико-математических наук

А.А. ЕЖОВ

21.08.2026