

### **Отзыв официального оппонента**

о диссертационной работе Вашина Сергея Александровича «Повышение электрической прочности межэлектродных промежутков многолучевых клистронов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.1 – Вакуумная и плазменная электроника

Диссертация Вашина С.А. посвящена исследованиям, направленным на усовершенствование методик высоковольтной тренировки, изучению влияния давления остаточных газов и технологических процессов изготовления, разработке технологии нанесения СВЧ-поглощающих покрытий с целью повышения электрической прочности и, как результат, долговечности и надежности многолучевых клистронов различного уровня выходной мощности.

#### **Актуальность работы**

Импульсные СВЧ-приборы являются основой радиоэлектронной аппаратуры, применяемой для решения практических задач в области навигации, радиолокации, космической связи. На современном этапе развития СВЧ-технологий и устройств наблюдается неуклонное повышение требований к характеристикам создаваемых приборов, в частности, к их ресурсу, надежности, стабильности выходных параметров. Определяющее значение для решения поставленных задач имеют внедрение новых технологических методов изготовления приборов, применение перспективных материалов и конструктивных решений, обеспечивающих высокую электрическую прочность приборов в процессе их эксплуатации.

#### **Краткая характеристика основного содержания работы**

По структуре, содержанию и изложению материала диссертация Вашина С.А. является завершенным научным трудом, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников. Диссертация объемом 166 страниц (с приложением), включая 75 рисунков, библиография содержит 123 наименования, написана технически грамотным языком, оформлена надлежащим образом.

Во введении изложена актуальность темы исследований, обсуждаются цели и задачи диссертационной работы, научная новизна, научно-практическая значимость работы, научные положения, выносимые на защиту, личный вклад автора в результаты проведенных исследований.

В первой главе приведен обзор литературных данных о способах и методах повышения электрической прочности межэлектродных промежутков электровакуумных приборов различного назначения. По результатам проведенного анализа особенностей применения и схемного исполнения реально эксплуатируемого оборудования, а также задач, решение которых должно достигаться в процессе высоковольтной тренировки электродных систем приборов, сформулированы основные цели и задачи диссертационного исследования.

Вторая глава посвящена исследованиям влияния давления газов внутривакуумного объема отпаянных приборов в процессе высоковольтной тренировки на электрическую прочность, а также исследованиям десорбции газов с поверхностей МЛК, как одного

из факторов нарушения электрической прочности. На основе полученных результатов предложено для ускорения процесса высоковольтной тренировки выполнять ее при повышенных давлениях газов в приборе. Для снижения токов утечек в отпаянных многолучевых клистродах автором предложено применять дополнительное обезгаживание прибора до давления  $10^{-6}$  Па. Результаты исследований были использованы в дальнейшем для разработки методик высоковольтной тренировки МЛК.

В третьей главе приведены результаты разработки нескольких методик высоковольтной тренировки для обеспечения повышенной электрической прочности межэлектродных промежутков многолучевых клистронов. Для снижения поверхностных токов изолятора прибора предложено проводить испарение проводящих пленок собственным током утечки при контроле температуры изолятора и ограничении мощности разогрева. Положительным свойством предложенных технологических операций явилось сохранение термоэмиссионных свойств катода в приборе после проведения тренировки межэлектродных промежутков.

В четвертой главе исследованы технологические процессы изготовления приборов, оказывающие влияние на электрическую прочность многолучевых клистронов. Полученные результаты позволили выработать рекомендации по выбору температуры обезгаживания приборов и предложить методику откачки сложно удаляемых газов путем включения накальной цепи прибора. Использование электроннолучевой сварки в малогабаритных приборах позволила снизить технологические потери из-за токов утечки на изоляторах. Разработана технология напыления детонационных покрытий СВЧ – энергии, обладающих повышенной прочностью сцепления с подложкой. По результатам испытаний установлено, что опытные образцы детонационных покрытий из  $TiO_2$  обладают необходимыми свойствами для их дальнейших испытаний на реальных приборах.

**В Заключение** дана общая характеристика работы и сформулированы основные результаты исследований.

#### **Оценка научной новизны результатов работы**

В диссертации Вашина С.А. получен ряд результатов, характеризующихся научной новизной:

1. Впервые показано, что повышение давления остаточных газов в отпаянных МЛК от  $10^{-4}$  до  $10^{-3}$  Па обеспечивает ускорение процесса высоковольтной тренировки приборов и снижение токов автоэлектронной эмиссии.

2. Установлено, что в процессе проведения одновременной тренировки межэлектродных зазоров сетка-катод и сетка-анод повышение напряжения на аноде МЛК до пробивного значения позволяет получать пробои на другом промежутке, за счет чего снижаются токи автоэлектронной эмиссии на межэлектродном промежутке сетка-катод.

3. На основе исследований процессов высоковольтной тренировки показано, что во время разогрева проводящей пленки изолятора собственным током при температуре

изолятора не превышающей 170°C обеспечивается сохранность изолятора и снижение токов утечки.

4. Повышение напряжения до пробивного значения и разогрев изолятора ЭВП током автоэлектронной эмиссии до 170°C в процессе высоковольтной тренировки позволяет снизить значительные (от 1 до 10 мА) токи автоэлектронной эмиссии межэлектродного промежутка сетка-анод.

5. Температура нагрева поверхностей МЛК в процессе высоковольтной тренировки линейно зависит от выделяемой мощности на тренируемом вакуумном промежутке.

6. Применение новой технологии детонационного напыления, а также разработанных способов подготовки поверхности подложки позволяет получать покрытие поглотителя СВЧ-энергии из  $TiO_2$  с прочностью сцепления ~ 40 МПа..

**Практическая значимость работы** заключается в разработке и внедрении в производство электровакуумных приборов нескольких методик высоковольтной тренировки, разработке технологии изготовления поглотителя СВЧ-энергии с помощью детонационного напыления из материала  $TiO_2$  с существенно более высокой прочностью сцепления с подложкой

Результаты исследований внедрены в технологический процесс изготовления приборов СВЧ и подтверждены актами о внедрении АО «НПП «Исток» им. Шокина».

**Достоверность и апробация работы.** Достоверность результатов обеспечивалась использованием поверенного и аттестованного измерительного оборудования, применением статистических методов обработки результатов экспериментов, а также соответствием полученных автором данных с данными, полученными при проведении исследований другими научными группами.

Представленные в диссертационной работе результаты прошли апробацию на международных и российских конференциях.

Область проведенных диссертационных исследования соответствует паспорту специальности 2.2.1. – «Вакуумная и плазменная электроника».

Основные результаты работы достаточно полно отражены в опубликованных работах. По материалам диссертации опубликовано 8 работ в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК, получено 4 патента РФ на изобретения.

Вынесенные на защиту положения, выводы и рекомендации хорошо обоснованы. Автореферат содержит основные результаты исследования и в полной мере отражает содержание диссертации.

**К работе имеются следующие замечания:**

1. Представленная в п.2.1. формула (2.1.2) не имеет отношения «к постоянной времени зажигания НЭМ». Эта формула позволяет лишь сделать оценку времени нарастания напряжения, прикладываемого к межэлектродному промежутку после включения источника питания. При этом необходимо учитывать емкость подводящих цепей и окружающих конструктивных элементов, которые, как правило, кратно превышают собственные емкости электродной системы насоса. Следует отметить, что время, затрачиваемое на зажигание НЭМ, определяется для рассматриваемых случаев не длительностью фронта прикладываемого напряжения, а динамикой развития

разрядных процессов в межэлектродном промежутке, о чем автор указывает ниже, упоминая о том, что исследованные насосы включались с секундными задержками.

2. Приведённые в п.2.2. результаты исследований влияния давления газа на частоту электрических пробоев указали на значительный разброс экспериментальных результатов для трех образцов однотипных клистронов. Для выработки практических рекомендаций по проведению тренировки электровакуумных приборов требуется формирование более обширной базы экспериментальных данных, а также выработка конкретных предложений по набору контролируемых параметров в случае реализации новой технологической операции.

3. В исследованиях процессов десорбции газов электрическим полем (п.2.6.1) не приведена информация об учете погрешностей измерений давления газа, что не позволяет дать оценку достоверности полученных значений потоков десорбированных газов с электродов прибора. Представленные результаты позволяют сформировать лишь качественную картину происходящих процессов. Вопрос об оценке погрешностей измеренных в работе величин остается открытым и для других параграфов диссертации.

4. В п.3.1.1. автор делает заключение о возможности устранения большинства центров обострения поля на основании проведенного сравнения интегрального вложения энергии в разряд и энергии, необходимой для испарения одиночного острия. При этом остались без рассмотрения вопросы о динамике развития разряда, о перераспределении энергии между различными процессами, происходящими в разряде, о неоднородности его структуры, о размерах и числе электродных пятен и др. Фактически режимы тренировки на постоянном напряжении выбраны эмпирическим путем на основании общих рекомендаций более ранних исследований.

5. В тексте диссертации отсутствует информация об используемых средствах измерения токов и напряжений, а также о конкретных параметрах элементов схем испытательных стендов (п.2.2, п.3.1.1, п.3.3), что затрудняет проведение анализа исследованных режимов тренировки межэлектродных промежутков и полученных при этом результатов.

6. Следует отметить, что, к сожалению, в работе есть целый ряд грамматических ошибок и опечаток, допущенных при оформлении текста диссертации, а также встречается некорректное использование общепринятой терминологии. Так, например, в п 1.2 при обсуждении методов повышения электропрочности ЭВП автор упоминает «высокотемпературный электронный пучок», ссылаясь на работу [33], авторы которой не применяли ни таких терминов, ни подобного способа обработки поверхности, да и в целом остается непонятным, о каких характеристиках электронного пучка идет речь.

Указанные замечания не снижают научную новизну и практическую ценность диссертации и не оказывают существенного влияния на положительную оценку работы в целом.

## Заключение

Диссертационная работа является законченным научным исследованием, выполненным автором самостоятельно на высоком научном уровне. Полученные результаты соответствуют современному уровню исследований в области вакуумной электроники, СВЧ-энергетики и технологий. В диссертации получены новые научно обоснованные технические и технологические решения, создающие условия для повышения электрической прочности межэлектродных промежутков электровакуумных приборов.

По критериям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, научной новизне, практической значимости и достоверности диссертационная работа Вашина Сергея Александровича соответствует требованиям п. 9-11 и 13-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.1 – Вакуумная и плазменная электроника.

22 марта 2023 г.



Масленников Сергей Павлович

Доктор технических наук по специальности 01.04.13 - Электрофизика, электрофизические установки, профессор кафедры «Прикладная ядерная физика» НИЯУ МИФИ

Адрес:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31  
Тел. 8(495)788 56 99, доб. 9796  
e-mail: [spmaslennikov@mephi.ru](mailto:spmaslennikov@mephi.ru)

Подпись сотрудника НИЯУ МИФИ С.П. Масленникова заверяю.

Подпись удостоверяю  
Заместитель начальника отдела  
документационного обеспечения  
НИЯУ МИФИ



*В. М. Самаров*