

На правах рукописи

БУЯНОВА Мария Николаевна

**АНАЛИЗ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
МУЛЬТИПАКТОРНОГО РАЗРЯДА**

01.04.08 – физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород, 2010

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте прикладной физики РАН (ИПФ РАН, г. Нижний Новгород).

Научный руководитель доктор физико-математических наук,
профессор В.Е. Семенов (ИПФ РАН)

Официальные оппоненты доктор физико-математических наук,
профессор А.И. Смирнов (ИПФ РАН)

доктор физико-математических наук,
профессор Н.Л. Александров (МФТИ,
Московская обл., г. Долгопрудный)

Ведущая организация Учреждение Российской академии
наук Институт общей физики
им. А.М. Прохорова РАН
(ИОФ РАН, г. Москва)

Защита состоится _____ 2010 г в ____ часов на заседании
диссертационного совета Д002.069.02 в ИПФ РАН (603950 г. Нижний Нов-
город, ул. Ульянова, 46).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПФ РАН.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор

Ю. В. Чугунов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Мультипакторный разряд [1] (вторично-эмиссионный разряд) проявляется как лавинообразное увеличение числа свободных электронов во внутреннем вакуумном пространстве мощных радиочастотных приборов. В большинстве случаев в основе данного эффекта лежит синхронизм между движением облака свободных электронов и колебаниями СВЧ электрического поля. Синхронизм имеет место при выполнении резонансных условий, обеспечивающих воспроизведение параметров движения для каждого нового поколения эмитированных электронов. Развитие разряда происходит за счет вторичной электронной эмиссии с внутренних поверхностей вакуумных систем при условии достаточно высокой энергии удара электрона. Количественная формулировка условий развития мультипакторного разряда зависит от геометрии исследуемого вакуумного устройства, конфигурации электромагнитного поля, материала и характера обработки внутренних поверхностей.

Мультипакторный разряд является нежелательным эффектом, приводящим к нарушению работы и повреждению вакуумных систем генерации и передачи СВЧ излучения [2,3]. В связи с необходимостью исключить негативные последствия при разработке таких систем, с 1940-х годов было проведено большое число теоретических, экспериментальных и основанных на численном моделировании исследований условий возникновения и свойств мультипакторного разряда [4-33]. Было обнаружено, что мультипакторному разряду подвержены системы самой различной геометрии и конфигурации электромагнитного поля. Одним из последствий развития электронной лавины является локальный нагрев внутренних поверхностей вакуумного СВЧ устройства, возникающий из-за многократных ударов об эти поверхности электронов лавины. Вследствие нагрева возможно существенное повреждение внутренних компонентов системы (внутренних поверхностей стенок волновода, диэлектрического выходного окна). Нагрев внутренних поверхностей также может привести к появлению газа в вакуумном пространстве устройства, и, в дальнейшем, к газовому разряду. Кроме того, следствием развития мультипакторного разряда является изменение характеристик пропускаемого через вакуумное устройство СВЧ сигнала, в частности, повышение уровня шума. Особое значение этот нежелательный эффект имеет для проектирования современных космических систем связи. Развитие мультипакторного разряда в вакуумном резонаторе может привести к снижению его добротности. При возникновении мультипакторного разряда в системе, включающей соединение различных СВЧ

устройств, ухудшается качество передачи сигнала между компонентами, проявляющееся как повышение мощности отраженного сигнала.

В настоящее время проблема возникновения и развития мультипакторного разряда стала особенно актуальной в связи с широким применением вакуумных СВЧ устройств, в частности, с развитием космических систем связи. Европейское космическое агентство (European Space Agency, ESA), а также национальный центр космических исследований Франции (Centre National d'Etudes Spatiales, CNES) регулярно участвуют в организации исследований мультипакторного разряда, включающих изучение фундаментальных характеристик этого эффекта, тестирование вакуумных систем, разработку программного обеспечения для проведения численных экспериментов и расчетов параметров оборудования. Кроме того, ESA, CNES и другие европейские исследовательские организации участвуют в проведении регулярных международных совещаний по проблеме мультипакторного разряда MULCOPIM (The International Workshop on Multipactor, Corona and Passive Intermodulation). В России исследованиями мультипакторного разряда занимаются рабочие группы в Институте общей физики РАН, Институте прикладной физики РАН, Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ»; результаты исследований регулярно представляются на различных международных и российских конференциях, посвященных вакуумной технике и физике микроволн (в частности, на международных совещаниях "Strong Microwaves in Plasmas"/"Strong Microwaves: Sources and Applications" и научно-технических конференциях "Вакуумная наука и техника").

Конечной целью большинства исследований является предупреждение развития мультипакторного разряда в трехмерной системе со сложной конфигурацией электромагнитного поля. Однако для того, чтобы иметь возможность рассчитать риск возникновения лавины в некоторой системе, либо корректно объяснить полученные ранее экспериментальные результаты, прежде всего необходимо провести подробный анализ базовых моделей. Следует отметить, что, несмотря на интенсивное изучение мультипакторного разряда в течение долгого времени, имеющиеся на данный момент представления о его свойствах не могут считаться совершенно полными даже для простых моделей. В связи с этим представляется весьма важным детальное изучение физики данного явления на основе систем простейшей геометрии, но с учетом как можно большего числа существенных параметров.

Цель работы

Целью настоящей диссертационной работы является теоретическое исследование условий возникновения и основных свойств мультипакторного разряда в различных системах с применением аналитических и численных методов.

Научная новизна работы

1. Для двустороннего мультипакторного разряда между параллельными электродами впервые исследована система новых сложных резонансных режимов, которым отвечают времена пролета электрона, отличные от нечетного числа полупериодов высокочастотного поля.
2. Впервые определены условия возникновения и свойства двустороннего мультипакторного разряда между параллельными электродами в высокочастотном электрическом поле с квадратурным фазовым модулированием с учетом влияния разброса электронов по начальным скоростям и уровня вторичной эмиссии.
3. Впервые установлено, что при приближении к стадии насыщения характер мультипакторного разряда, развивающегося между параллельными электродами, меняется с двустороннего на односторонний, при условии, что коэффициент вторичной эмиссии превышает некоторое пороговое значение. Смена характера разряда сопровождается резким повышением уровней насыщения плотности электронов и мощности переноса энергии на поверхности эмиссии.
4. Для одностороннего мультипакторного разряда на диэлектрической поверхности, развивающегося под действием поля частично отраженной плоской электромагнитной волны круговой поляризации в отсутствие постоянных электрических и магнитных полей, впервые определена зависимость максимально допустимого (без развития разряда) значения плотности потока передаваемой энергии от коэффициента отражения волны.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Для двустороннего мультипакторного разряда между параллельными электродами возможны новые резонансные режимы, которым отвечают времена пролета электрона, отличные от нечетного числа полупериодов высокочастотного поля. Наличие таких режимов приводит к существенному расширению области параметров, где возможно развитие разряда.
2. Оценки порогов возникновения мультипакторного разряда некорректны без учета разброса вторичных электронов по начальным скоростям.

Влияние этого фактора на положение и ширину областей параметров, где возможно развитие разряда, а также на динамику его развития, особенно существенно в случае, когда характерное время пролета электрона превышает период высокочастотного поля. Учет разброса электронов по начальным скоростям также необходим при оценке порога возникновения и характеристик развития мультипакторного разряда в условиях немонохроматического высокочастотного поля.

3. На стадии насыщения свойства мультипакторного разряда между параллельными электродами зависят от величины коэффициента вторичной эмиссии. При приближении к стадии насыщения становятся возможны односторонние режимы развития разряда, если коэффициент вторичной эмиссии достаточно высок. Эти режимы оказываются доминирующими на стадии насыщения, если коэффициент вторичной эмиссии превышает некоторое пороговое значение. Смена характера разряда сопровождается резким повышением уровней насыщения плотности электронов и мощности переноса электронами энергии на электроды.
4. Развитие одностороннего мультипакторного разряда на диэлектрической поверхности под действием частично отраженной электромагнитной волны возможно и при отсутствии постоянных электрических или магнитных полей. Условия возникновения разряда в этом случае существенно зависят не только от амплитуды высокочастотного электрического поля на поверхности диэлектрика, но и от величины коэффициента отражения падающей волны. Возникновение мультипакторного разряда возможно даже в режиме чисто бегущей волны, если ее амплитуда превышает определенное пороговое значение.

Практическая и научная ценность

Исследованы новые резонансные режимы двустороннего мультипакторного разряда между параллельными электродами и влияние разброса электронов по начальным скоростям на развитие разряда; учет новых режимов и разброса по начальным скоростям позволяет корректно определить положение и ширину областей параметров, при которых возможно развитие мультипакторного разряда. Предложена процедура численного расчета максимально допустимого (без развития разряда) значения коэффициента вторичной эмиссии при прочих заданных параметрах системы.

Для мультипакторного разряда между параллельными электродами определены положения соответствующих стадии насыщения уровней плотности электронов при различных режимах развития разряда.

Разработан пакет программ для численного моделирования двустороннего мультипакторного разряда в плоско-параллельной системе в поле произвольного числа волн различных амплитуд, частот и начальных фаз, в том числе с учетом фазового модулирования сигналов.

Предложен новый статистический подход к описанию начальной стадии нерезонансного одностороннего мультипакторного разряда на поверхности диэлектрического окна при наличии постоянного возвращающего электрического поля, позволяющий изучать непосредственно эволюцию функции распределения электронов во времени.

Для одностороннего мультипакторного разряда на диэлектрической поверхности, развивающегося под действием поля частично отраженной плоской электромагнитной волны круговой поляризации в отсутствие постоянных электрических и магнитных полей, определена зависимость максимально допустимого (без развития разряда) значения плотности потока передаваемой энергии от коэффициента отражения волны.

Апробация работы

По теме диссертации опубликованы **6** статей в ведущих российских и зарубежных научных журналах, входящих в список ВАК, **16** докладов в трудах отечественных и международных конференций, **2** тезиса докладов. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на научных семинарах Института прикладной физики РАН, российских и международных конференциях и научных совещаниях: 29th European Physical Society Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion (17-21 июня 2002 г., Montreux, Швейцария), 5th International Workshop "Strong Microwaves in Plasmas" (2-8 августа 2002 г., Нижний Новгород, Россия), 4th International Workshop on Multipactor, Corona and Passive Intermodulation in Space RF Hardware (MULCOPIM'03) (8-11 сентября 2003 г., Noordwijk, Нидерланды), NATO Advanced Research Workshop on Quasi-Optical Control of Intense Micro-wave Transmission (17-20 февраля 2004 г., Нижний Новгород, Россия), IX Нижегородская сессия молодых ученых (апрель 2004 г., Дзержинск, Россия), International Workshop On Microwave Filters (13-15 сентября 2004 г., Toulouse, Франция), 5th International Workshop on Multipactor, Corona and Passive Intermodulation in Space RF Hardware (MULCOPIM'05) (12-14 сентября 2005г., Noordwijk, Нидерланды), XII Научно-техническая конференция "Вакуумная наука и техника" (сентябрь 2005 г., Судак, Россия), 6th International Workshop "Strong Microwaves in Plasmas" (25 июля - 1 августа 2005 г., Нижний Новгород, Россия), Всероссийский семинар по физике миллиметровых и субмиллиметровых волн (март 2007 г., Нижний Новгород, Россия), XIV Научно-техническая конференция "Вакуумная наука и техника" (сентябрь 2007 г., Сочи, Россия), 7th International Workshop "Strong Microwaves: Sources and Applications" (27 июля - 2 августа 2008 г., г.Нижний Новгород, Россия), 6th International Workshop on Multipactor, Corona and Passive Intermodulation in Space RF Hardware (MULCOPIM'08) (24-26 сентября 2008 г., Valencia, Испания).

Основу диссертации составили работы [1А–24А], посвященные теоретическим исследованиям и компьютерному моделированию мультипакторного разряда в различных условиях. Эти работы содержат материалы исследований, выполненных в ИПФ РАН в рамках инициативных тем, международных грантов и грантов РФФИ. Автор являлся непосредственным участником проводимых исследований. Опубликованные работы написаны в соавторстве с сотрудниками, принимавшими участие в выполнении исследований.

Автор является единственным разработчиком программного обеспечения Multipactor Development Simulator, предназначенного для численного моделирования двустороннего мультипакторного разряда в плоскопараллельной системе. Автору принадлежат все численные расчеты, проведенные с помощью Multipactor Development Simulator и опубликованные в работах [3А, 6А, 9А, 20А-24А], а также их интерпретация и сопоставление с теоретическими оценками и результатами других методов исследований (совместно с научным руководителем В.Е. Семеновым и соавтором А.Г. Сазонтовым). Автором внесен основной вклад в теоретические исследования условий возникновения и характеристик гибридных мод двустороннего мультипакторного разряда в работах [1А, 2А, 5А], а также в теоретическое исследование развития одностороннего мультипакторного разряда на диэлектрической поверхности в поле плоских волн круговой поляризации [17А-19А]. Кроме того, автору принадлежат результаты исследований мультифазных мод двустороннего мультипакторного разряда в работе [13А]. Работы [7А] и [16А] выполнены совместно с научным руководителем. В работах [10А, 12А, 15А] результаты получены совместно с научным руководителем и соавторами А.Г. Сазонтовым и В.Е. Нечаевым. В работах [4А, 8А, 11А, 14А] вклад всех соавторов равноценен.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 215 страниц, включая 101 рисунок. Список литературы содержит 108 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении определены предмет исследования и задачи диссертационной работы, обоснована актуальность темы, а также приведены данные по апробации и публикациям включенных в диссертацию материалов.

В первой главе диссертационной работы дан обзор основных направлений исследования и моделей мультипакторного разряда.

В разделе 1.1 описаны представления о вторичной электронной эмиссии, используемые в большинстве исследований (в частности, [4]).

В разделе 1.2 рассмотрены задачи о двустороннем мультипакторном разряде между параллельными металлическими поверхностями, который развивается под действием нормального к поверхностям эмиссии СВЧ электрического поля [5-13].

В разделе 1.3 описаны исследования резонансного одностороннего мультипакторного разряда на металлической поверхности, развивающегося под действием нормального к поверхности эмиссии СВЧ электрического поля при наличии дополнительных постоянных электрических или магнитных полей, возвращающих электроны к поверхности эмиссии [14-19]. Разряды описанных в разделах 1.2 и 1.3 типов могут возникать в металлических волноводах и резонаторах.

В разделе 1.4 представлены задачи о развитии нерезонансного одностороннего мультипакторного разряда на диэлектрической поверхности под действием СВЧ электрического поля, параллельного поверхности эмиссии [8, 20-26]. Такой разряд может возникать на поверхности диэлектрического выходного окна мощного СВЧ устройства. В данном разделе описаны как исследования разряда, развивающегося в присутствии постоянных возвращающих электрических или магнитных полей [20-23], так и исследования разряда, реализующегося в пространственно-неоднородном СВЧ электрическом поле в отсутствие дополнительных статических полей [8, 26].

В разделе 1.5 рассмотрены некоторые вопросы о возникновении мультипакторного разряда в системах космической связи, для которых характерно одновременное использование большого числа СВЧ сигналов с различными амплитудами напряженности электрического поля, частотами и начальными фазами [27-28], а также о развитии разряда в двумерных и трехмерных системах (в частности, в волноводах различного сечения) [29-33].

В разделе 1.6 дан обзор методов численного моделирования, применяющихся для исследования различных моделей мультипакторного разряда (например, [11-12, 20, 31]), и существующего на данный момент специального программного обеспечения. Численные методы позволяют составить достаточно подробную картину условий развития и свойств мультипактор-

ного разряда с учетом как отдельного, так и совместного влияния факторов различной природы.

Во второй главе диссертационной работы рассмотрены условия возникновения и свойства двустороннего мультипакторного разряда между параллельными плоскими электродами.

В разделе 2.1 дано описание одномерной плоскопараллельной модели и используемых переменных.

В разделе 2.2 подробно проанализированы условия возникновения и устойчивости резонанса с СВЧ электрическим полем для известных ранее «классических» режимов развития мультипакторного разряда (1):

$$\lambda = \pi k \cos \varphi + 2 \sin \varphi + v_1 \pi k, \quad k = 2p - 1, \quad p \in N, \quad (1)$$

где $\lambda = \omega L / V_\omega$, $V_\omega = eE / m\omega$, L – расстояние между электродами, E – амплитуда напряженности, ω – частота СВЧ поля, $v_1 = V_1 / V_\omega$ – нормированная начальная скорость электрона, $\tau = \omega \Delta t = \pi k$ – нормированное время пролета электрона между электродами.

Показано, что высокая вторичная эмиссия эффективно расширяет интервалы значений параметров, при которых возможно развитие разряда, за счет компенсации потерь электронов, вышедших из резонанса с СВЧ полем. Приведена аналитическая оценка влияния уровня вторичной эмиссии на ширину классических зон.

В разделе 2.3 описаны неизвестные до недавнего времени «комплексные» моды двустороннего мультипакторного разряда. Показано, что при реализации комплексных резонансных мод повторение условий эмиссии (старт новых электронов в тех же значениях фазы СВЧ поля φ и пролет их между электродами за то же время) наступает только через несколько пролетов поколений электронов между поверхностями эмиссии (2):

$$\begin{cases} \varphi_1 \rightarrow \varphi_2 \rightarrow \dots \rightarrow \varphi_n \} \rightarrow \{ \varphi_1 \rightarrow \varphi_2 \rightarrow \dots \rightarrow \varphi_n \} \rightarrow \dots; \\ \tau_1 \rightarrow \tau_2 \rightarrow \dots \rightarrow \tau_n \} \rightarrow \{ \tau_1 \rightarrow \tau_2 \rightarrow \dots \rightarrow \tau_n \} \rightarrow \dots \end{cases} \quad (2)$$

Нормированные времена пролета электрона τ_i при реализации комплексных мод отличаются от нечетного числа полупериодов поля (оставаясь по-прежнему более близкими к некоторым значениям πk_i , также повторяющимся через несколько пролетов). Резонансные условия для фаз эмиссии и времен пролета представлены соотношениями (3):

$$\begin{cases} \lambda = (\varphi_{i+1} - \varphi_i + \pi k_i)(\cos \varphi_i + v_i) + \sin \varphi_i + \sin \varphi_{i+1}, \quad i = 1, \dots, n-1, \\ \lambda = (\varphi_1 - \varphi_n + \pi k_n)(\cos \varphi_n + v_n) + \sin \varphi_n + \sin \varphi_1; \\ \sum_{i=1}^n \Delta \tau_i = \pi m, \quad m \in N. \end{cases} \quad (3)$$

Показано, что новые комплексные режимы можно разделить на две группы: гибридные и мультифазные режимы. Первые являются самостоя-

тельными резонансными модами и реализуются при произвольных значениях начальной скорости электронов; режим движения электронов при этом носит сложный характер, сходный с комбинацией режимов движения, соответствующих различным классическим модам. Исследовано расположение зон гибридных мод на общей карте мультипакторных зон и показано, что учет этих мод существенно расширяет области параметров, при которых возможно развитие разряда (рис. 1). Проанализированы свойства устойчивости гибридных резонансов, в том числе с учетом влияния уровня вторичной эмиссии.

Показано, что при потере устойчивости классического или гибридного резонанса при определенных условиях возможно появление других комплексных резонансных мод, названных мультифазными, сопровождаемое последовательными удвоениями периода моды и заменой каждого значения фазы эмиссии на два различных значения при сохранении близких времен пролета. Проанализированы условия последовательных трансформаций исходной моды в мультифазные режимы различных порядков; определено, что трансформации завершаются переходом к неперiodическому режиму, при котором значения фаз эмиссии и времен пролета по-прежнему лежат внутри ограниченных интервалов. Показано, что развитие мультипакторного разряда остается возможным, несмотря на сложный характер движения электронов, при определенном согласовании параметров СВЧ поля и характеристик вторичной эмиссии. Определено расположение зон мультифазных мод на общей схеме зон двустороннего разряда; эти зоны также заметно расширяют области параметров, при которых возможно развитие разряда (рис. 1).

Для выполнения численных экспериментов в рамках данной работы был подготовлен специальный пакет программ, предназначенный для расчета развития мультипакторного разряда в плоскопараллельной одномерной модели по методу частиц в ячейке: Multipactor Development Simulator (MDS). Его возможности подробно описаны в [разделе 2.4](#).

[Раздел 2.5](#) посвящен изучению свойств двустороннего мультипакторного разряда и расположения его зон в зависимости от величины скорости электронов в момент эмиссии. Показано, что при фиксированной начальной скорости, равной для всех электронов, зоны соседних мод мультипакторного разряда не перекрываются. Однако, в реальных условиях начальная скорость электрона является случайной величиной с некоторым вероятностным распределением. Показано, что наличие ненулевого разброса по начальным скоростям изменяет свойства устойчивости каждого резонанса и способно приводить к перекрыванию зон соседних мод. Этот эффект реализуется при высокой вторичной эмиссии, компенсирующей потерю вышедших из резонанса электронов и особенно важен в случае, когда характерное время пролета электрона превышает период СВЧ поля (что соответствует классическим модам $k \geq 3$ и близким к ним комплексным модам). Прове-

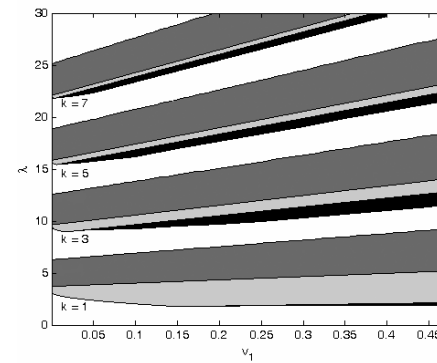


Рис. 1 Зоны двустороннего мультипакторного разряда. Светло-серым показаны зоны классических резонансных мод, соответствующих нормированным временам пролета электрона pk . Темно-серые области заполнены зонами гибридных резонансных мод и зонами возникших при удвоении их периода мультифазных мод. Черным цветом показаны области, где расположены зоны мультифазных мод, возникших при удвоении периода соответствующей классической моды.

монстрирован переход от резонансного режима развития мультипакторного разряда к полифазному режиму [8, 13]. Исследования проведены с применением численного моделирования (с использованием пакета программ MDS). Предложена схема численного определения максимально допустимого (без развития мультипакторного разряда) значения коэффициента вторичной эмиссии для различных комбинаций прочих параметров системы (рис. 2).

Пакет программ MDS также был применен при исследовании мультипакторного разряда в монохроматическом внешнем поле (см. [раздел 2.6](#)). В [подразделе 2.6.1](#) исследовано развитие двустороннего мультипакторного разряда между параллельными электродами в суммарном поле нескольких СВЧ сигналов различных амплитуд, частот и начальных фаз. В [подразделе 2.6.2](#) исследован тот же тип разряда в СВЧ электрическом поле с фазовой модуляцией, имитирующей квадратурное фазовое модулирование. Продемонстрировано, что мультипакторный разряд чувствителен к заданию характеристик каждой компоненты сигнала и их сочетанию с распределением электронов по начальным скоростям и параметрами вторичной эмиссии; в случае исследованного фазового модулирования сигнала развитие разряда также зависит от моментов переключения фазы и интервала между переключениями. Установлено, что при малом изменении части параметров может проявиться как подавление развития разряда из-за нарушения резонансных соотношений, так и устойчивое развитие лавины в среднем. Показано, что для получения надежных результатов моделирования необходим учет разброса электронов по начальным скоростям и подробное исследование параметров вторичной эмиссии, характерных для используемых материалов.

В [подразделе 2.6.3](#) исследована задача о нелинейной стадии развития мультипакторного разряда между параллельными электродами, на которой созданные самими электронами лавины кулоновские поля заметно влияют

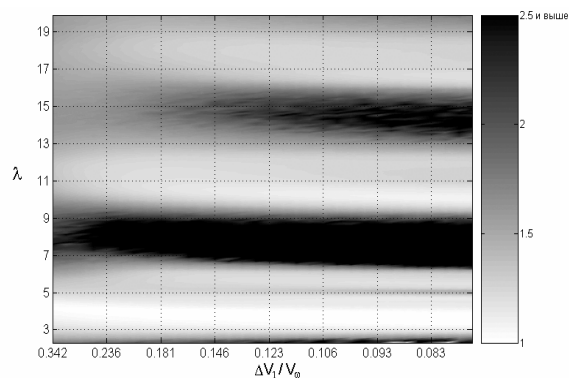


Рис. 2 Пример расчета максимально допустимого (без развития двустороннего мультипакторного разряда) значения коэффициента вторичной эмиссии (показанного цветом) в зависимости от разброса электронов по скоростям $\Delta V_1/V_0$ и нормированного расстояния между электродами λ .

на режим движения частиц. Нелинейная стадия, как правило, завершается переходом к стадии насыщения, на которой лавинообразное увеличение числа электронов прекращается. Для практических приложений весьма важным является вопрос о плотности электронов в системе на стадии насыщения и о переносе ими энергии на внутренние поверхности устройства при соударениях. Было обнаружено, что на стадии насыщения свойства мультипакторного разряда между параллельными электродами существенным образом зависят от величины коэффициента вторичной электронной эмиссии. С ростом коэффициента вторичной эмиссии качественно меняется характер разряда: вблизи стадии насыщения наряду с исходным двусторонним режимом мультипакторного разряда становятся возможны односторонние режимы. При коэффициенте вторичной эмиссии, превышающем некоторое пороговое значение, односторонние режимы оказываются доминирующими при достижении стадии насыщения. Смена характера разряда сопровождается резким повышением соответствующих стадии насыщения уровней плотности электронов и мощности переноса электронами энергии на электроды (рис. 3). Построенные для различных режимов разряда аналитические оценки уровней плотности электронов на стадии насыщения хорошо согласуются с результатами численного моделирования.

В третьей главе диссертационной работы исследованы различные случаи возникновения нерезонансного одностороннего мультипакторного разряда на диэлектрической поверхности.

В [разделе 3.1](#) рассмотрена модель разряда, развивающегося в присутствии постоянного возвращающего электрического поля. Для анализа мультипакторного разряда применен статистический метод, описывающий развитие разряда с помощью функции распределения по фазам эмиссии и вре-

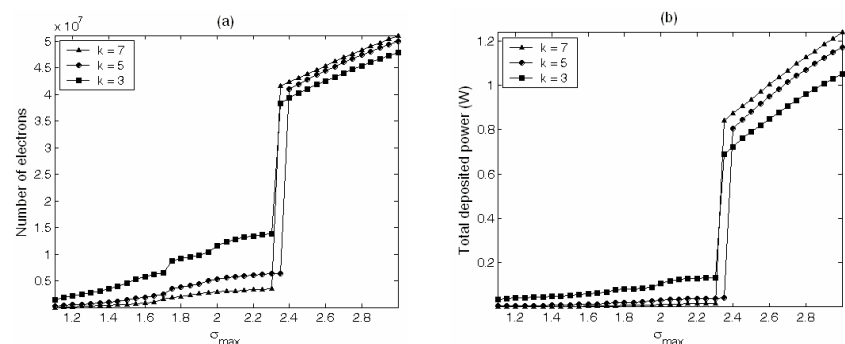


Рис. 3 Мультипакторный разряд между металлическими электродами: пример численного расчета уровней насыщения числа электронов (а) и мощности переноса энергии на поверхности эмиссии (б) в зависимости от величины коэффициента вторичной эмиссии в максимуме. Расчет проведен для нескольких классических резонансных мод, соответствующих различным значениям безразмерного времени пролета электрона πk и нормированного расстояния между электродами λ при одинаковых прочих параметрах задачи.

менам пролета в зависимости от номера пролета электрона (аналог описанного в [11]), а также модифицированный вариант этого метода, позволяющий исследовать непосредственно эволюцию распределений электронов по указанным параметрам во времени. Определены максимально допустимое (без развития разряда) значение коэффициента вторичной эмиссии и реализующаяся функция распределения электронов по фазам эмиссии. Показано, что оба подхода дают одинаковую оценку порога мультипакторного разряда, однако расходятся при описании стадии стабильного роста лавины, где модифицированный метод дает более точные результаты.

В [разделе 3.2](#) продемонстрировано, что развитие одностороннего нерезонансного мультипакторного разряда на диэлектрической поверхности также возможно в отсутствие статических электрических или магнитных полей. Исследование разряда, развивающегося в поле нормально падающих на диэлектрик плоских линейно-поляризованных (см. [подраздел 3.2.1](#)) и циркулярно-поляризованных (см. [подраздел 3.2.2](#)) волн, показало, что развитие разряда зависит не только от амплитуды электрического поля непосредственно на поверхности окна, но и от наличия интерференционной структуры поля вблизи этой поверхности. Так, возвращение электронов к поверхности возможно за счет пондеромоторной силы, выталкивающей электроны из области более сильного СВЧ электрического поля над поверхностью диэлектрика. Кроме того, показано, что, благодаря СВЧ магнитному полю волны, возникновение мультипакторного разряда возможно даже в режиме чисто бегущей волны, если ее амплитуда превышает опре-

деленное пороговое значение. В задаче о развитии разряда под действием частично отраженной волны круговой поляризации определена зависимость максимально допустимого (без развития разряда) значения нормированной плотности потока передаваемой энергии α (4) от коэффициента отражения волны R (рис. 4).

$$S = cE_{\omega}^2(1 - R^2)/4\pi = mc^3N_c\alpha, \quad N_c = m\omega^2/4\pi e^2 \quad (4)$$

В диссертационной работе также исследованы характеристики развития данного типа разряда (время возвращения электрона к поверхности эмиссии, энергия удара) при различных сочетаниях параметров задачи, в том числе, при различных значениях энергии удара электрона о поверхность эмиссии W_1 и W_2 , в интервале между которыми коэффициент вторичной эмиссии превышает 1. Установлено, что в представляющем практический интерес интервале значений коэффициента отражения ($0.1 < R < 0.9$) порог возникновения мультипакторного разряда особенно низок при выполнении специфических соотношений между плотностью потока передаваемой энергии и коэффициентом отражения.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

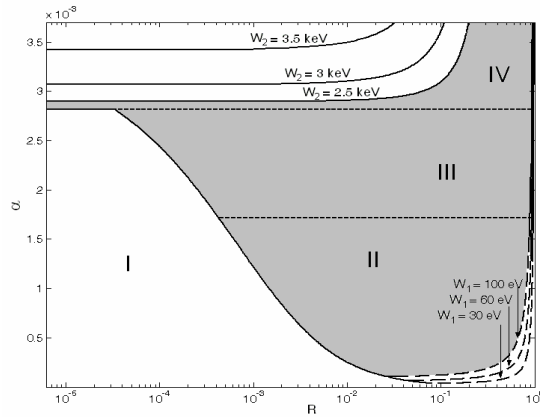


Рис. 4 Область возникновения одностороннего разряда на диэлектрике под действием частично отраженной волны круговой поляризации при различных значениях коэффициента отражения R , нормированной плотности потока энергии α , а также при различных значениях энергии удара электрона W_1 и W_2 . В области высоких значений R нижняя граница зоны имеет более сложный вид, штриховой линией показана ее огибающая.

В области I разряд невозможен. В областях II и III разряд развивается медленно, возвращение электронов происходит в основном благодаря действию ponderomotorной силы со стороны неоднородного СВЧ электрического поля; время пролета электрона существенно больше периода поля (в области II – непрерывно уменьшается с ростом α , в области III – кусочно-непрерывно). В области IV темп развития разряда высок; возвращение электронов обусловлено действием СВЧ магнитного поля волны и происходит за время меньше периода поля.

Основные результаты диссертационной работы

1. В рамках плоско-параллельной модели двустороннего мультипакторного разряда найдены два новых класса резонансных режимов. Показано, что новым режимам отвечают последовательности различных значений времени пролета электрона между поверхностями эмиссии, повторяющиеся через несколько пролетов электронов. Каждое из значений времени пролета может заметно отличаться от нечетного числа полупериодов высокочастотного поля. Установлено, что некоторые новые режимы представляют собой независимые резонансные моды, а другие возникают в результате удвоения периода при потере устойчивости прочих резонансных мод. Исследованы условия устойчивости новых режимов, в том числе с учетом влияния уровня вторичной электронной эмиссии. Определено расположение зон новых мод на общей схеме зон двустороннего мультипакторного разряда. Показано, что реализация новых режимов приводит к существенному расширению областей параметров, где возможно развитие разряда.
2. Показано, что разброс вторичных электронов по начальным скоростям может существенно влиять на развитие электронной лавины, способствуя как подавлению резонансных режимов мультипакторного разряда при малой величине коэффициента вторичной электронной эмиссии, так и к перекрыванию в пространстве параметров зон, отвечающих различным резонансам, если коэффициент вторичной электронной эмиссии превышает определенное пороговое значение. Оценки порогов возникновения мультипакторного разряда некорректны без учета разброса вторичных электронов по начальным скоростям.
3. Разработан пакет программ для численного моделирования двустороннего мультипакторного разряда в плоско-параллельной системе в поле произвольного числа волн различных амплитуд, частот и начальных фаз, в том числе с учетом фазового модулирования сигналов. Показано, что фазовая модуляция сигналов, используемая для цифровой передачи информации, не может подавить рост электронной лавины при реалистических значениях разброса вторичных электронов по начальным скоростям и характерных для используемых материалов параметрах вторичной эмиссии.
4. Установлено, что на стадии насыщения свойства мультипакторного разряда между параллельными электродами существенным образом зависят от величины коэффициента вторичной электронной эмиссии. При относительно небольших значениях коэффициента вторичной эмиссии разряд на стадии насыщения остается двусторонним. Увеличение коэффициента вторичной эмиссии сопровождается ростом поля пространственного заряда и повышением уровня насыщения плотности электронов. Вследствие воздействия поля пространственного заряда

- при достаточно высоких значениях коэффициента вторичной эмиссии становятся возможны односторонние резонансные режимы. При коэффициенте вторичной эмиссии, превышающем некоторое пороговое значение, односторонние режимы оказываются доминирующими на стадии насыщения. Смена характера разряда сопровождается резким повышением соответствующих стадии насыщения уровней плотности электронов и мощности переноса электронами энергии на электроды.
5. Предложен новый статистический подход к описанию начальной стадии нерезонансного одностороннего мультипакторного разряда на поверхности диэлектрического окна с учетом разброса вторичных электронов по скоростям. В отличие от традиционной статистической теории, базирующейся на вероятностном описании распределения электронов по начальным фазам в зависимости от номера их пролета, новый подход позволяет изучать непосредственно эволюцию функции распределения электронов во времени, что способствует более корректному описанию скорости роста электронной лавины.
 6. Показано, что развитие одностороннего мультипакторного разряда на диэлектрической поверхности под действием частично отраженной электромагнитной волны возможно и при отсутствии постоянных электрических или магнитных полей. Определены условия возникновения и темп роста электронной лавины, которые зависят не только от амплитуды электрического поля непосредственно на поверхности окна, но и от наличия интерференционной структуры поля вблизи этой поверхности. Показано, что возникновение мультипакторного разряда возможно даже в режиме чисто бегущей волны, если ее амплитуда превышает определенное пороговое значение.

Список публикаций по теме диссертации

- 1A. *Kryazhev, A.* Influence of finite velocity spread on hybrid-resonance modes of two-sided multipactor / A. Kryazhev, M. Buyanova, V. Semenov, D. Anderson, M. Lisak, J. Puech, L. Lapiere, J. Sombrin // 29th EPS Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion (17-21 June 2002). Montreux, Switzerland, 2002. V. 26B, P. 1.022-1-4.
- 2A. *Kryazhev, A.* Hybrid resonant modes of two-sided multipactor and transition to the polyphase regime / A. Kryazhev, M. Buyanova, V. Semenov, D. Anderson, M. Lisak, J. Puech, L. Lapiere, J. Sombrin // Phys. Plasmas. 2002. V. 9, № 11. P. 4736-4743.
- 3A. *Sazontov, A.* Simulations of multipactor zones taking into account realistic properties of secondary emission / A. Sazontov, N. Vdovicheva, M. Buyanova, V. Semenov, J. Puech, D. Anderson, M. Lisak, L. Lapiere // 4th International Workshop on Multipactor, Corona and Passive Intermodulation in Space RF Hardware (8-11 September 2003). ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 2003.
- 4A. *Puech, J.* Microwave discharge research activities within the context of the Chalmers University (Sweden)/Institute of Applied Physics (Russia) / CNES (France) Project / J. Puech, D. Anderson, M. Buyanova, D. Dorozhkina, U. Jordan, L. Lapiere, M. Lisak, V. Semenov, J. Sombrin, R. Udiljak // 4th International Workshop on Multipactor, Corona and Passive Intermodulation in Space RF Hardware (8-11 September 2003). ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 2003.
- 5A. *Kryazhev, A.* Hybrid resonances in multipactor discharges / A. Kryazhev, M. Buyanova, V. Semenov, D. Anderson, M. Lisak, J. Puech, L. Lapiere, J. Sombrin // Proceedings of the 5th International Workshop «Strong Microwaves in Plasmas», Ed. A.G. Litvak. Nizhny Novgorod, Russia, 2003. V. 2, P. 678-683.
- 6A. *Puech, J.* Multipactor threshold in waveguides: theory and experiment / J. Puech, L. Lapiere, J. Sombrin, V. Semenov, A. Sazontov, N. Vdovicheva, M. Buyanova, U. Jordan, R. Udiljak, D. Anderson, M. Lisak. // Quasi-Optical Control of Intense Microwave Transmission, NATO Advanced Research Workshop (17-20 February 2004). Nizhny Novgorod, Russia, 2004. P. 305 – 325.
- 7A. *Буянова, М.Н.* Условия возникновения двустороннего мультипакторного разряда / М.Н. Буянова, В.Е. Семенов // Тезисы докладов IX Нижегородской сессии молодых ученых (25 – 30 апреля 2004). «Голубая Ока», Дзержинск, 2004.
- 8A. *Buyanova, M.* Microwave discharge research activities within the context of the Chalmers University (Sweden)/Institute of Applied Physics (Russia) / CNES (France) project / M. Buyanova, D. Anderson, D. Belot,

- D. Dorozhkina, U. Jordan, L. Lapierre, M. Lisak, J. Puech, V. Semenov, A. Sazontov, J. Sombrin, R. Udiljak, I. Nefedov, I. Shereshevskii // International Workshop On Microwave Filters (13-15 September 2004). Toulouse, France, 2004.
- 9A. *Sazontov, A.* Effect of emission velocity spread of secondary electrons in two-sided multipactor / A. Sazontov, M. Buyanova, V. Semenov, E. Rakova, N. Vdovicheva, D. Anderson, M. Lisak, J. Puech, L. Lapierre. // Phys. Plasmas. 2005. V. 12, P. 053102-1-8.
- 10A. *Sazontov, A.* Multipactor discharge on a dielectric surface: statistical theory and simulation results / A. Sazontov, V. Semenov, M. Buyanova, N. Vdovicheva, D. Anderson, M. Lisak, J. Puech, L. Lapierre // Phys. Plasmas. 2005. V. 12, P. 093501-1-7.
- 11A. *Puech, J.* Summary of research activities on microwave discharge phenomena involving Chalmers (Sweden), Institute of Applied Physics (Russia) and CNES (France) / J. Puech, D. Anderson, M. Buyanova, D. Dorozhkina, U. Jordan, L. Lapierre, M. Lisak, V. Semenov, J. Sombrin, R. Udiljak // Proceedings of the 5th International Workshop on Multipactor, Corona and Passive Intermodulation in Space RF Hardware (12-14 September 2005). ESA/ESTEC, Noordwijk, the Netherlands, 2005. P. 235-242.
- 12A. *Semenov, V.* Electron Multipacting on rf windows in the absence of static electric and magnetic fields / V. Semenov, M. Buyanova, V. Nechaev, D. Anderson, M. Lisak, J. Puech, L. Lapierre // Proceedings of the 5th International Workshop on Multipactor, Corona and Passive Intermodulation in Space RF Hardware (12-14 September 2005). ESA/ESTEC, Noordwijk, the Netherlands, 2005. P. 119-125.
- 13A. *Buyanova, M.* Multi-phase regimes of multipactor breakdown / M. Buyanova, V. Nechaev, E. Rakova, V. Semenov, N. Zharova, D. Anderson, M. Lisak, J. Puech, L. Lapierre // Proceedings of the 5th International Workshop on Multipactor, Corona and Passive Intermodulation in Space RF Hardware (12-14 September 2005). ESA/ESTEC, Noordwijk, the Netherlands, 2005. P. 135-142.
- 14A. *Puech, J.* Summary of research activities on multipactor phenomenon with dielectric materials within INTAS project / J. Puech, D. Anderson, M. Buyanova, I. Kossyi, L. Lapierre, M. Lisak, E. Rakova, A. Sazontov, V. Semenov, I. Shereshevskii, J. Sombrin, R. Udiljak, N. Vdovicheva // Proceedings of the 5th International Workshop on Multipactor, Corona and Passive Intermodulation in Space RF Hardware (12-14 September 2005). ESA/ESTEC, Noordwijk, the Netherlands, 2005. P. 161-167.
- 15A. *Буянова, М.Н.* Развитие мультипакторного СВЧ разряда в вакууме у поверхности диэлектрика / М.Н. Буянова, В.Е. Нечаев, В.Е. Семенов // Труды XII Научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника». Судак, 2005. С. 109-113.
- 16A. *Buyanova, M.N.* Two approaches to the problem of multipactor discharge on a dielectric rf-window / M.N. Buyanova, V.E. Semenov // Proceedings of the 6th International Workshop «Strong Microwaves in Plasmas», Ed. A.G. Litvak. Nizhny Novgorod, Russia, 2006. V. 2, P. 805-810.
- 17A. *Буянова, М.Н.* Мультипакторный СВЧ разряд в вакууме на поверхности диэлектрика в поле плоских волн круговой поляризации / М.Н. Буянова, В.Е. Нечаев, В.Е. Семенов // Труды XIV Научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника». Сочи, 2007. С. 255-260.
- 18A. *Буянова, М.Н.* Мультипакторный разряд на выходном окне мощных СВЧ-приборов / М.Н. Буянова, В.Е. Нечаев, В.Е. Семенов // Тезисы докладов Всероссийского семинара по физике миллиметровых и субмиллиметровых волн (1 – 7 марта 2007). Нижний Новгород, 2007. С. 69.
- 19A. *Буянова, М.Н.* Мультипакторный разряд на поверхности диэлектрика в поле плоских волн круговой поляризации / М.Н. Буянова, В.Е. Нечаев, В.Е. Семенов // Известия ВУЗов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 10-11. С. 988-1003.
- 20A. *Buyanova, M.* Influence of secondary emission yield on the saturation of two-surface multipactor / M. Buyanova, V. Semenov, D. Anderson, M. Lisak, J. Puech // Proceedings of the 6th International Workshop on Multipactor, Corona and Passive Intermodulation in Space RF Hardware (24-26 September 2008). Valencia, Spain, 2008.
- 21A. *Semenov, V.* Multipactor in QPSK-modulated carriers / V. Semenov, M. Buyanova, D. Anderson, M. Lisak, R. Udiljak, J. Puech // Proceedings of the 6th International Workshop on Multipactor, Corona and Passive Intermodulation in Space RF Hardware (24-26 September 2008). Valencia, Spain, 2008.
- 22A. *Buyanova, M.N.* Different saturation regimes of multipactor between two parallel metal plates / M.N. Buyanova, V.E. Semenov, D. Anderson, M. Lisak, J. Puech // Proceedings of the 7th International Workshop «Strong Microwaves: Sources and Applications», Ed. A.G. Litvak. Nizhny Novgorod, Russia, 2009. V. 2. P. 645-650.
- 23A. *Semenov, V.* Multipactor in microwave transmission systems using Quadrature Phase Shift Keying / V. Semenov, M. Buyanova, D. Anderson, M. Lisak, R. Udiljak, J. Puech // IEEE Trans. Plasma Sci. 2010. V. 38, № 4. P. 915-922.
- 24A. *Buyanova, M.N.* Influence of secondary emission yield on saturation of multipactor between two parallel metal plates / M.N. Buyanova, V.E. Semenov, D. Anderson, M. Lisak, J. Puech // Phys. Plasmas. 2010. V. 17. P. 043504-1-12.

Список цитируемой литературы

1. *Farnsworth, P. T.* Television by electron image scanning / P.T. Farnsworth // J. Franklin Inst. 1934. V. 218. P. 411-444.
2. *Vaughan, J.R.M.* Multipactor / J.R.M. Vaughan // IEEE Trans. Electron Devices. 1988. V. 35, № 7. P. 1172-1180.
3. *Kishek, R.A.* Multipactor discharge on metals and dielectrics: historical review and recent theories / R.A. Kishek, Y.Y. Lau, L.K. Ang, A. Valfells, R.M. Gilgenbach // Phys. Plasmas. 1998. V. 5, № 5. P. 2120-2126.
4. *Vaughan, J.R.M.* A new formula for secondary emission yield / J.R.M. Vaughan // IEEE Trans. Electron Devices. 1989. V. 36, № 9. P. 1963-1967.
5. *Gill, E.W.B.* Starting potentials of high-frequency gas discharges at low pressure / E.W.B. Gill, A. von Engel // Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences. 1948. V. 192. P. 446-463.
6. *Hatch, A.J.* Multipacting modes of high-frequency gaseous breakdown / A.J. Hatch, H.B. Williams // Phys. Rev. 1958. V. 112, № 3. P. 681-685.
7. *Ганичев, Д.А.* Исследование резонансного разряда в сантиметровом диапазоне длин волн / Д.А. Ганичев, В.А. Станский, Б.В. Хрисанфов // ЖТФ. 1968. Т. 38, № 10. С. 1655-1659.
8. *Grishin, L.V.* A Study of secondary-emission microwave discharges with large electron transit angles / L.V. Grishin, A.A. Dorofeyuk, I.A. Kossyi, G.S. Luk'yanchikov, M.M. Savchenko // Lebedev Physics Institute Series (Consultants Bureau, New York). 1977. V. 92. P. 63-101.
9. *Gilardini, A.L.* New breakdown modes of the multipacting discharge / A.L. Gilardini // J. Appl. Phys. 1992. V. 71. P. 4629-4631.
10. *Riyopoulos, S.* Multipactor Saturation due to space-charge-induced debunching / S. Riyopoulos // Phys. Plasmas. 1997. V. 4. P. 1448-1462.
11. *Вдовичева, Н.К.* Статистическая теория двустороннего мультипакторного разряда / Н.К. Вдовичева, А.Г. Сазонтов, В.Е. Семенов // Известия ВУЗов. Радиофизика. 2004. Т. 47. P. 650-667.
12. *Verboncoeur, J.P.* Simultaneous potential and circuit solution for 1D bounded plasma particle simulation codes / J.P. Verboncoeur, M.V. Alves, V. Vahedi, C.K. Birdsall // J. Comp. Physics. 1993. V. 104. P. 321-328.
13. *Kossyi, I.A.* Polyphase (non-resonant) multipactor in rectangular waveguides / I.A. Kossyi, G.S. Lukiyanichikov, V.E. Semenov, E.I. Rakova, D. Anderson, M. Lisak, J. Puech // J. Phys. D: Appl. Phys. 2008. V. 41. P. 065203-1-8.
14. *Vance, E.F.* One-sided multipactor discharge modes / E.F. Vance // J. Appl. Phys. 1963. V. 34, № 11. P. 3237-3242.
15. *Ганичев, Д.А.* Экспериментальное исследование вторично-электронного резонансного разряда в скрещенных полях / Д.А. Ганичев,

16. *Riyopoulos, S.* Theory of electron multipactor in crossed fields / S. Riyopoulos, D. Chernin, and D. Dialetis // Phys. Plasmas. 1995. V. 2. P. 3194-3213.
17. *Бляхман, Л.Г.* Насыщение одностороннего мультипактора в скрещенных полях / Л.Г. Бляхман, М.А. Горшкова, В.Е. Нечаев // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2000. Т. 43, № 11. С. 1004-1015.
18. *Semenov, V.* Multiphase regimes of single-surface multipactor / V. Semenov, V. Nechaev, E. Rakova, N. Zharova, D. Anderson, M. Lisak, J. Puech // Phys. Plasmas. 2005. T. 12. P. 073508-1-6.
19. *Wu, L.* Multipactor discharge in a dielectric-loaded accelerating structure / L. Wu, L.K. Ang // Phys. Plasmas. 2007. V. 14. P. 013105-1-11.
20. *Kishek, R.A.* Multipactor discharge on a dielectric / R.A. Kishek, Y.Y. Lau // Phys. Rev. Lett. 1998. V. 80. P. 193-196.
21. *Ang, L.K.* Power deposited on a dielectric by multipactor / L.K. Ang, Y.Y. Lau, R.A. Kishek, R.M. Gilgenbach // IEEE Trans. Plasma Sci. 1998. V. 26. P. 290-295.
22. *Вдовичева, Н.К.* Влияние внешнего магнитного поля на порог возникновения мультипакторного разряда на поверхности диэлектрика / Н.К. Вдовичева, А.Г. Сазонтов, В.А. Сазонтов // Известия вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 2. С. 118-133.
23. *Valfells, A.* Effects of an external magnetic field, and of oblique radio-frequency electric fields on multipactor discharge on a dielectric / A. Valfells, L.K. Ang, Y.Y. Lau, R.M. Gilgenbach // Phys. Plasmas. 2000. V. 7, № 2. P. 750-757.
24. *Saito, Y.* Surface breakdown phenomena in alumina rf windows / Y. Saito // IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation. 1995. V. 2, № 2. P. 243-250.
25. *Neuber, A.* Window breakdown caused by high-power microwaves / A. Neuber, J. Dickens, D. Hemmert, H. Krompholz, L.L. Hatfield, and M. Kristiansen // IEEE Trans. Plasma Sci. 1998. V. 26. P. 296-303.
26. *Лобаев, М.А.* Исследование влияния неоднородности СВЧ поля на порог мультипакторного разряда на диэлектрике / М.А. Лобаев, О.А. Иванов, В.А. Исаев, А.Л. Вихарев // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35, вып. 23. С. 9-16.
27. *Marrison, A.J.* A Study of multipaction in multicarrier rf components / A.J. Marrison, R. May, J.D. Sanders, A.D. Dyne, A.D. Rawlins, J. Petit // AEA Technology for ESTEC, AEA Ref. No. AEA/ТУКВ/31761/01/RP/05, Culham, UK, 1997. Issue 1.
28. *Semenov, V.* Multipactor suppression in amplitude modulated radio frequency fields / V. Semenov, A. Kryazhev, D. Anderson, M. Lisak // Phys. Plasmas. 2001. V. 8. № 11. P. 5034-1-6.

29. *Semenov, V.E.* Multipactor in rectangular waveguides / V.E. Semenov, E.I. Rakova, D. Anderson, M. Lisak, J. Puech // Phys. Plasmas. 2007. V. 14. P. 033501-1-8.
30. *Udiljak, R.* Multipactor in a coaxial transmission line. I. Analytical study / R. Udiljak, D. Anderson, M. Lisak, V.E. Semenov, J. Puech // Phys. Plasmas. 2007. V. 14. P. 033508-1-11.
31. *Semenov, V.E.* Multipactor in a coaxial transmission line. II. Particle-in-cell simulations / V.E. Semenov, N. Zharova, R. Udiljak, D. Anderson, M. Lisak, J. Puech // Phys. Plasmas. 2007. V. 14. P. 033509-1-7.
32. *Semenov, V.* Simulations of the multipactor effect in hollow waveguides with wedge-shaped cross section / V. Semenov, E. Rakova, N. Zharova, D. Anderson, M. Lisak, J. Puech // IEEE Trans. Plasma Sci. 2008. V. 36, № 2. P. 488-493.
33. *Udiljak, R.* Multipactor in a waveguide iris / R. Udiljak, D. Anderson, M. Lisak, J. Puech, V.E. Semenov // IEEE Trans. Plasma Sci. 2007. V. 35, № 2. P. 388-395.

БУЯНОВА Мария Николаевна

**АНАЛИЗ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
МУЛЬТИПАКТОРНОГО РАЗРЯДА**

Автореферат

Ответственный за выпуск

М. Н. Буянова