

На правах рукописи

Гусарова Мария Александровна

**Мультипакторный разряд в элементах и узлах линейных
ускорителей**

01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Автор:



АВТОРЕФЕРАТ

**диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Москва 2009

Работа выполнена на кафедре электрофизических установок Московского инженерно-физического института (государственного университета).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Собенин Николай Павлович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Фещенко Александр Владимирович
доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Татаринова Нина Владимировна

Ведущая организация: Научно-исследовательский институт
ядерной физики имени Д.В. Скобельцина
Московского государственного
университета имени М.В. Ломоносова

Защита состоится “27” мая 2009 г. в 15 ч. 30 мин. в аудитории 401
главного корпуса на заседании диссертационного совета Д **212.130.01** при
Московском инженерно-физическом институте (государственном
университете) по адресу: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д.31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИФИ.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном
экземпляре, заверенном печатью организации, по адресу МИФИ.

Автореферат разослан “ ” апреля 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Щедрин И.С.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ

В настоящее время линейные ускорители широко применяются как в научных целях для исследования фундаментальных физических процессов и явлений, так и при решении конкретных прикладных задач в промышленности, медицине и других областях народного хозяйства. При конструировании сверхвысокочастотных (СВЧ) устройств, используемых в ускорителях заряженных частиц, важно, чтобы устройства были свободны от мультипакторного разряда. Возникновение мультипакторного разряда приводит к потерям СВЧ мощности, увеличению времени тренировки, нагреву структуры и в некоторых случаях к пробое. Особую опасность мультипакторный разряд представляет для сверхпроводящих структур, так как его возникновение может привести к квенчу, то есть к потере сверхпроводимости.

Впервые мультипакторный разряд был обнаружен в вакуумных зазорах СВЧ устройств линейных ускорителей электронов в 50-х годах прошлого столетия. С этого времени исследование мультипакторного разряда в ускорителях заряженных частиц направлено на его подавление. Эмпирически найденные методы предотвращения плазменных микроволновых разрядов в вакуумных системах, как правило, сводились к снижению уровня плотности потока СВЧ энергии, падающей на диэлектрики. Для подавления микроволновых разрядов на поверхности металлов и диэлектриков применялись также внешние электрические и магнитные поля и/или специальные покрытия, с помощью которых удавалось в ряде случаев предотвращать возникновение разряда. Выполненные в этом направлении работы привели к определенным положительным результатам. Однако, несмотря на достигнутые успехи, проблема повышения электрической прочности СВЧ устройств является актуальной и в настоящее время.

В связи с быстрыми темпами развития и широким применением линейных ускорителей становится актуальной проблема быстрой и

качественной оценки электрической прочности СВЧ устройств, используемых в ускорителях, и расчета мультипакторного разряда ещё на стадии проектирования устройства. Следует отметить, что проблема мультипакторного разряда касается не только линейных ускорителей, а всех ускорителей заряженных частиц.

ЦЕЛЬ

Целью работы является создание универсального подхода к анализу мультипакторного разряда, использование разработанных методик для исследования электрической прочности различных устройств и компонентов ускорителей заряженных частиц, выработка и реализация рекомендаций по повышению их электрической прочности. Основой методик служит созданная программа численного моделирования условий, приводящих к возникновению мультипакторного разряда в устройствах сложной конструкции.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА

Предложена новая универсальная методика расчета мультипакторного разряда в различных элементах и узлах СВЧ устройств ускорителей заряженных частиц. Универсальность методики позволяет использовать ее для анализа и оптимизации широкого класса устройств сложной (трехмерной) геометрии, работающих в режиме как бегущей, так и стоячей волны.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ И ЗНАЧИМОСТЬ

Создана программа численного моделирования мультипакторного разряда в СВЧ устройствах ускорителей заряженных частиц, позволяющая исследовать аксиально-симметричные и аксиально-несимметричные структуры с различным заполнением в режимах стоячей и бегущей волны, а также с учетом внешнего магнитного поля.

Практическая значимость работы заключается в том, что ряд рекомендаций и данных, предложенных автором, использованы при разработке и моделировании элементов ускорительных установок ISAC II (Isotope Separation and ACceleration facility, TRIUMF, Канада) и ERL (Energy Recovery Linac, Корнельский университет, США).

ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Созданная трехмерная программа расчета мультипакторного разряда в СВЧ устройствах ускорителей заряженных частиц в режимах стоячей и бегущей волн с учетом внешнего магнитного поля.
2. Результаты расчетов и экспериментального исследования сверхпроводящих четвертьволновых резонаторов ускорителей тяжелых ионов.
3. Результаты расчетов мультипакторного разряда в теплых и в сверхпроводящих резонаторах линейных ускорителей.
4. Результаты расчетов характеристик элементов высокочастотного инжектора с учетом внешнего магнитного поля.
5. Результаты расчетов мультипакторного разряда в разработанных вводах мощности в сверхпроводящие ускоряющие резонаторы.
6. Результаты оптимизации конструкции волноводных вводов прямоугольного сечения большой средней мощности.

СВЯЗЬ РАБОТЫ С НАУЧНЫМИ ПРОГРАММАМИ

Работа выполнена в рамках проекта аналитической ведомственной программы Федерального агентства по образованию “Развитие научного потенциала высшей школы” (2006-2009 г.г.) и при поддержке гранта Российского Фонда Фундаментальных Исследований (2008-2009 г.г.).

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ

Основные результаты и положения диссертации были представлены на российских и международных конференциях, в частности:

- XXIV International Linac Conference, LINAC08, Victoria, Canada, 2008;
- XX International Workshop on Charged Particle Accelerators, Alushta, Ukraine, 2007;
- XXI Российская конференция по ускорителям заряженных частиц, RuPAC-2008, Zvenigorod, Russia, 2008;
- Научная Сессия МИФИ (МИФИ – 2006, МИФИ – 2007, МИФИ – 2008, МИФИ – 2009);

ПУБЛИКАЦИИ

Основные результаты диссертации опубликованы в 8 печатных трудах.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Объем диссертации составляет 118 страниц. Список литературы включает 78 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность и прикладное значение диссертации. Сформулирована цель и задачи исследований.

Первая глава “Мультипакторный разряд в устройствах сверхвысоких частот” посвящена общим сведениям о мультипакторном разряде в высокочастотных устройствах ускорителей заряженных частиц и обзору известных методов исследования и подавления мультипакторного разряда.

Вторая глава “Разработка и тестирование программы расчета мультипакторного разряда в СВЧ устройствах ускорителей заряженных частиц” посвящена описанию созданной программы численного

моделирования мультипакторного разряда в высокочастотных устройствах ускорителей заряженных частиц. Описаны возможности программы и представлены результаты тестирования.

На рис. 1 представлена предложенная схема методики расчета мультипакторного разряда в СВЧ устройствах ускорителей заряженных частиц, которая лежит в основе созданной программы.



Рис.1. Схема методики расчета мультипакторного разряда в СВЧ устройствах ускорителей заряженных частиц.

Программа включает в себя модуль создания геометрии, модуль экспорта распределения электромагнитного поля, модуль расчета. При расчете учитываются характеристики материалов исследуемой структуры. Для частиц задаются: начальные скорости, углы вылета и падения, фазы

вылета. Расчет включает в себя три этапа: выявление опасных уровней напряженности поля, при которых возможно возникновение мультипакторного разряда, определение опасных областей конструкции и исследование отдельных траекторий движения электронов. В результате расчета оценивается возможность существования резонансных траекторий в структуре и параметры соударения электронов со стенками структуры. Полученные в ходе расчета результаты дают возможность сделать заключение о возможности возникновения мультипакторного разряда в устройстве с предложенной конструкцией. Критерием возможности возникновения мультипакторного разряда является обнаружение стабильных траекторий движения электронов с такими энергиями соударения, при которых коэффициент вторичной электронной эмиссии для заданного материала превышает единицу, а, следовательно, возможно возникновение лавины.

Программа протестирована посредством расчета структур, для которых возможен аналитический расчет, и реальных структур, для которых проводились экспериментальные исследования мультипакторного разряда.

Проведен расчет зауженных прямоугольных волноводов, мультипакторный разряд в которых является аналогом мультипакторного разряда между двумя металлическими поверхностями, для которого можно провести аналитический расчет. Показано, что расхождение результатов аналитического расчета и расчета с помощью разработанной программы для зауженных волноводов составляет менее 1%.

Проведен расчет сверхпроводящих ускоряющих резонаторов эллиптической формы ускорителя SNS (Spallation Neutron Source, США). Для резонатора SNS-hi ($\beta=0,81$) расчет предсказывает возникновение мультипакторного разряда в области экватора ускоряющей ячейки при уровнях напряженности поля от 5 до 15 МВ/м, что согласуются с результатами экспериментов представленных в различных работах.

Совместно с Канадской Национальной Лабораторией Ядерной Физики TRIUMF проведено исследование сверхпроводящих четвертьволновых

резонаторов ускорителя ISAC II (Isotope Separation and ACceleration facility, TRIUMF, Канада), рассчитанных на частоту 141,4 МГц (рис. 2).

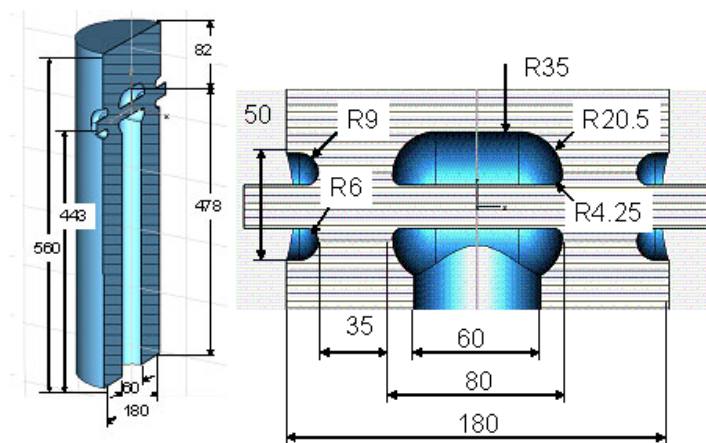


Рис. 2. Конструкция четвертьволнового резонатора ускорителя ISAC II.

В ходе расчета были определены уровни напряженности ускоряющего поля (от 3кВ/м до 2МВ/м), при которых возможно возникновение мультипакторного разряда и обнаружены резонансные траектории в четырех областях структуры. В области пролетной трубки, в области между бобышкой и дном резонатора, в области дна резонатора и в коаксиальной области. На рис. 3. приведены примеры резонансных траекторий в различных областях

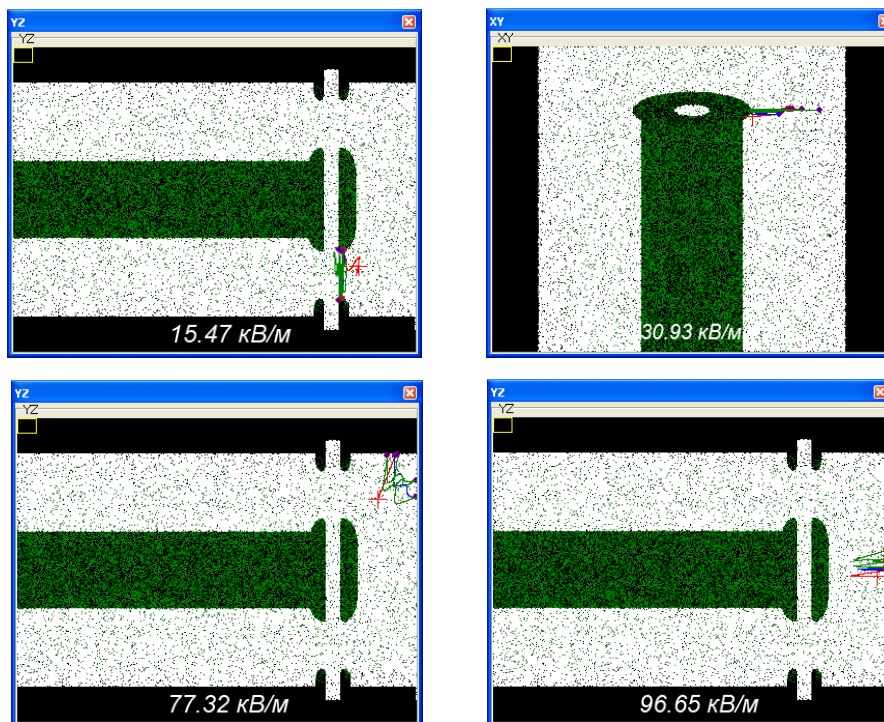


Рис. 3. Примеры резонансных траекторий в четвертьволновом резонаторе ускорителя ISAC II.

При уровнях напряженности поля порядка 25 кВ/м резонансные траектории наблюдались сразу в двух областях структуры: в области пролетной трубки и в области между бобышкой и внешним проводником. Было выявлено, что большее число обнаруженных траекторий медленно, но затухают, а энергия соударения электронов с поверхностью близка к крайним границам энергий, при которых коэффициент вторичной электронной эмиссии больше единицы, а, следовательно, обнаруженный мультипакторный разряд может быть погашен путем тренировки резонатора. В Канадской Национальной Лаборатории Ядерной Физики TRIUMF проведено экспериментальное исследование резонаторов, в ходе которого были зафиксированы предсказанные уровни мультипакторного разряда, с некоторыми отклонениями, что напрямую связано с характеристиками каждого конкретного резонатора. На рис. 4 представлены обобщенные экспериментальные результаты.

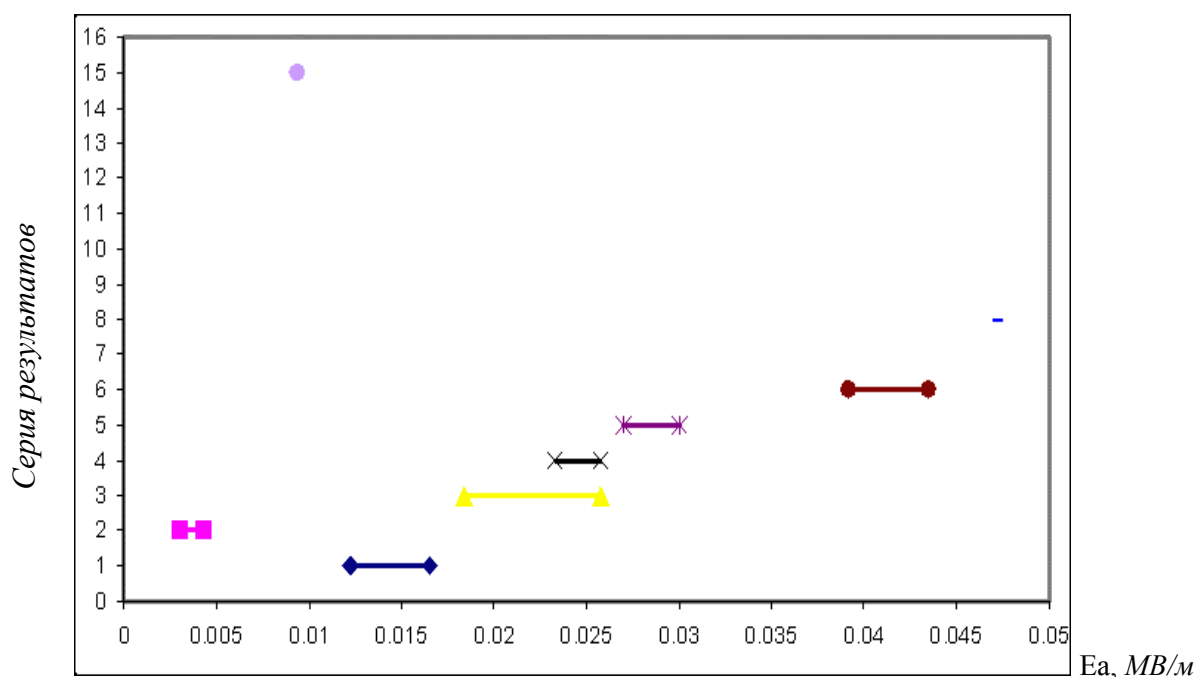


Рис. 4. Экспериментально зафиксированные уровни ускоряющего поля, при которых наблюдался мультипакторный разряд. Теплый режим измерений.

В третьей главе “Анализ электрической прочности “теплых” ускоряющих структур, предназначенных для использования в линейных ускорителях” представлены результаты расчета мультипакторного разряда в “теплых” ускоряющих структурах, предназначенных для использования в линейных ускорителях. Рассмотрены два вида конструкций бипериодических ускоряющих структур и резонатор фотоинжектора. По результатам расчета предложены методы подавления.

При создании компактных линейных ускорителей электронов наиболее широко используются структуры с ячейками связи на оси. Особую опасность для таких структур представляет мультипакторный разряд в ячейках связи. Проведен расчет бипериодической ускоряющей структуры с ячейками связи на оси, рассчитанной на частоту 5712 МГц. Показано, что в такой структуре возможно возникновение мультипакторного разряда в ячейке связи при уровнях напряженности электрического поля от 2 до 75 МВ/м. На рис. 5 представлен пример резонансной траектории в ячейке связи.

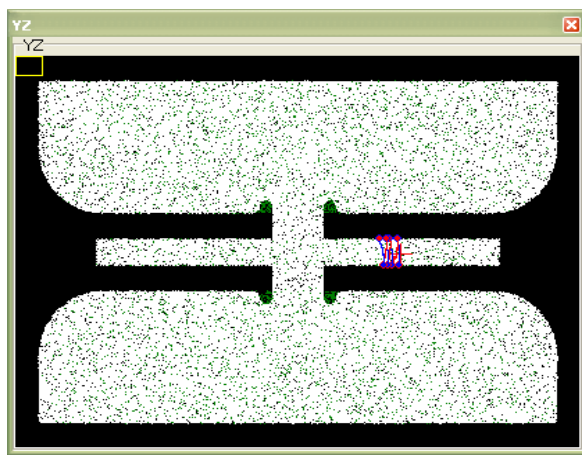


Рис. 5. Примеры резонансной траекторий в ячейке связи.

Для бипериодической ускоряющей структуры с шайбами и диафрагмами, рассчитанной на частоту 910 МГц, определены опасные уровни напряженности электрического поля и области возможного возникновения мультипакторного разряда (рис.6).

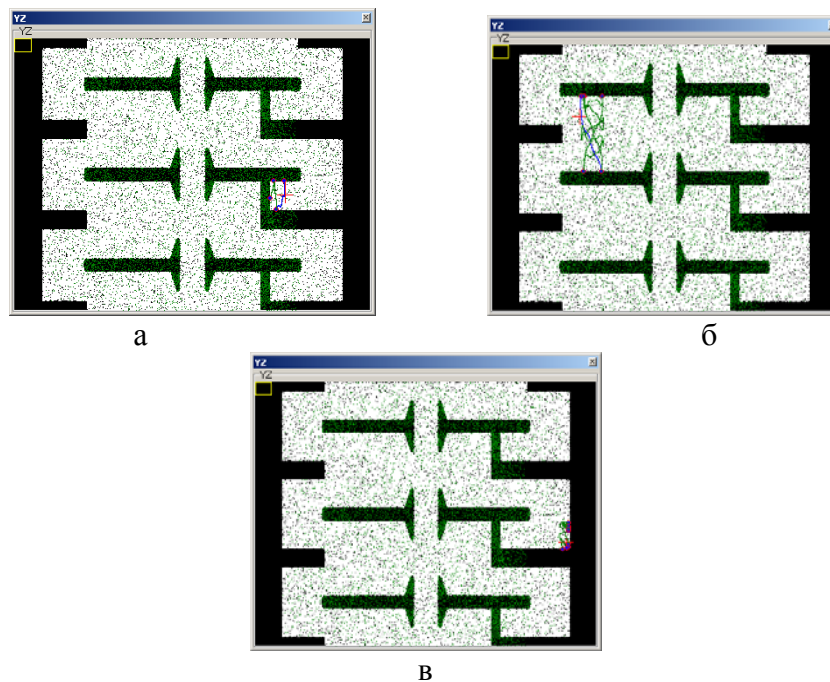


Рис. 6. Области возникновения мультипакторного разряда в УСШД:
а – 3 МВ/м, б – 7 МВ/м, в – 38 МВ/м.

Показано, что для использования структуры при уровнях напряженности электрического поля на оси структуры до 7 МВ/м конструкция требует изменения геометрии штанги, а для использования при уровнях напряженности выше 35 МВ/м изменения формы ускоряющего резонатора, так как в этих областях возможно возникновение стабильного мультипакторного разряда. Траектории, полученные при уровне напряженности поля 7 МВ/м (между шайбами), указывают на мультипакторный разряд высокого порядка. Порядком мультипакторного разряда называется число периодов СВЧ поля, за которое электрон возвращается к поверхности. Помимо этого траектории не обладают высокой стабильностью, а, следовательно, мультипакторный разряд в этой области может быть подавлен в ходе тренировки резонатора.

Для филиала лаборатории DESY Zeuthen (Германия) проведен расчет, отражающий влияние внешнего магнитного поля на развитие мультипакторного разряда в фотоинжекторе PITZ (Photo Injector Test Facility, Zeuthen), рассчитанном на частоту 1300 МГц и предназначенном для использования в установках лазеров на свободных электронах и линейных

коллайдерах (см. рис. 7). Для расчета используется разработанный модуль наложения внешнего магнитного поля.

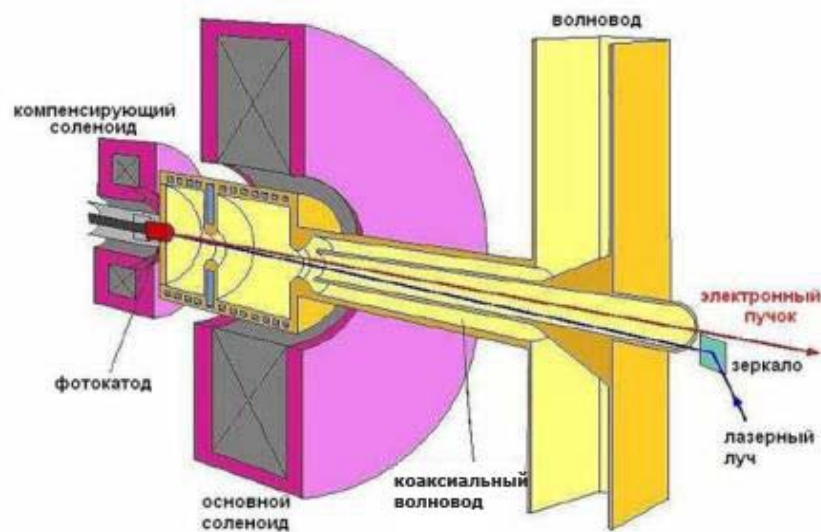


Рис. 7. Конструкция фотоинжектора PITZ.

Для структуры без учета внешнего магнитного поля обнаружены стабильные траектории в области ускоряющего резонатора при напряженности поля на оси ускоряющего резонатора до 20МВ/м и в области перехода между резонатором и коаксиальным волноводом при напряженности поля более 20МВ/м, рис. 8. Энергия соударения электронов с поверхностью лежит в пределах от 50 до 2500 эВ. При таких энергиях соударения коэффициент вторичной электронной эмиссии меди превышает единицу, а, следовательно, возможно образование лавины.

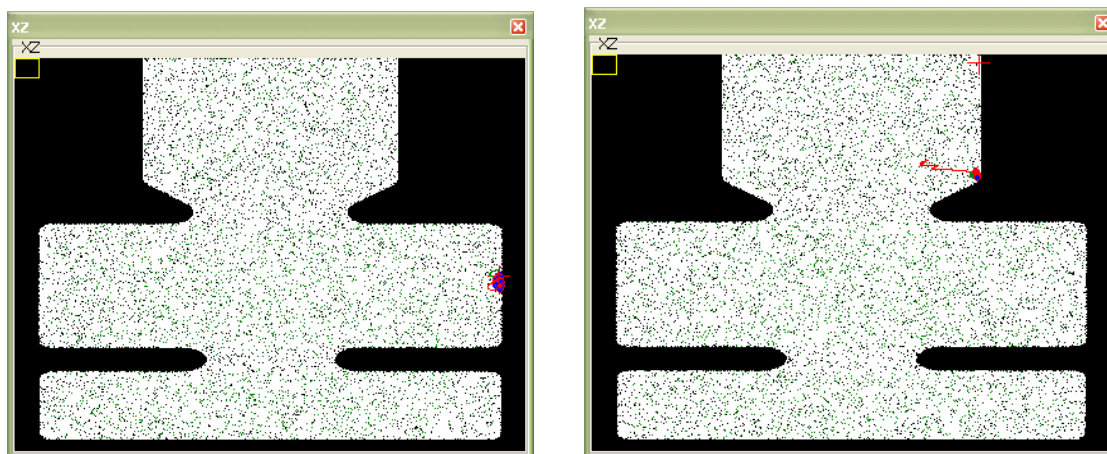


Рис. 8. Области возникновения мультипакторного разряда в фотоинжекторе PITZ.

Расчет с учетом сильного магнитного поля (0,16 Тл) в области коаксиального волновода показал, что сильное магнитное поле изменяет траекторию движения электронов в области перехода между резонатором и коаксиальным волноводом, закручивая её, и таким образом предотвращает возникновение мультипакторного разряда. На рис. 9 показан пример траектории в области перехода между резонатором и коаксиальным волноводом с учетом внешнего магнитного поля.

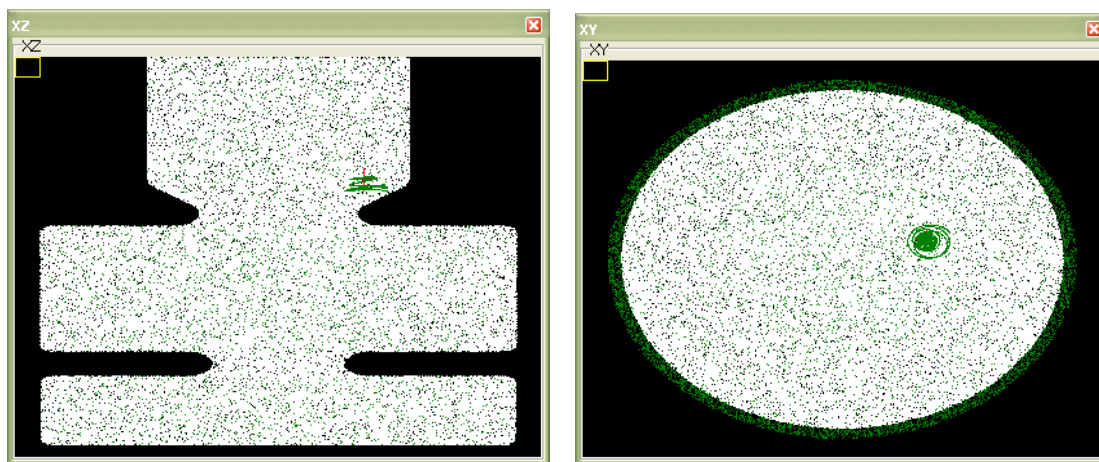


Рис. 9. Пример траектории движения электрона в области перехода между резонатором и коаксиальным волноводом фотоинжектора PITZ с внешним постоянным магнитом.

Этот же метод может быть применен для подавления разряда в ускоряющей ячейке.

В четвертой главе “Анализ электрической прочности элементов и узлов инжектора ускорителя ERL” приведены результаты расчета мультипакторного разряда в элементах инжектора ускорителя с рекуперацией энергии ERL (Energy Recovery Linac, США), предназначенного для генерации мощного синхротронного излучения. Представлены результаты расчета мультипакторного разряда в ускоряющем резонаторе и в разработанных вводах мощности. По результатам расчета предложены методы подавления разряда.

В инжекторе ускорителя ERL предполагается использовать сверхпроводящие ускоряющие резонаторы, рассчитанные на частоту 1,3 ГГц, конструкции “Reentrant” (рис. 10).

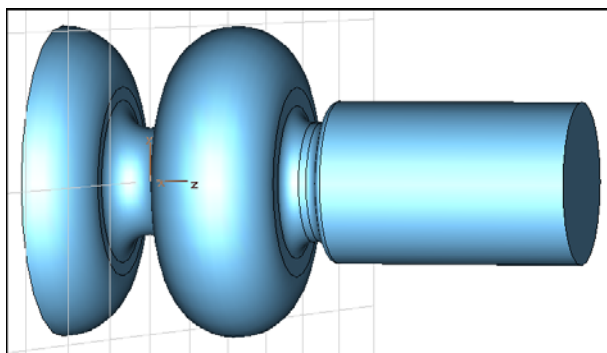


Рис. 10. Конструкция ускоряющего резонатора инжектора ускорителя ERL.

Расчет показал, что для ускоряющего резонатора конструкции “Reentrant” мультипакторный разряд не является ограничивающим фактором при достижении проектируемых ускоряющих градиентов, однако в области перехода между резонатором и пролетной трубкой возможно возникновение мультипакторного разряда при значениях напряженности электрического поля от 22 до 36 МВ/м. На рис. 11 показаны полученные резонансные траектории.

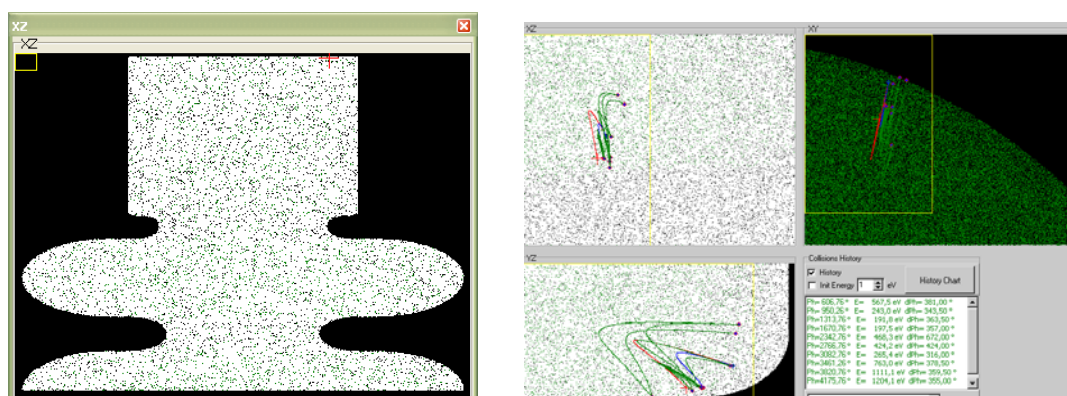


Рис. 11. Пример резонансной траектории в области перехода между резонатором и пролетной трубкой.

Для подавления мультипакторного разряда требуется изменение конструкции области перехода.

Лабораторией СВЧ МИФИ совместно с Лабораторией физики элементарных частиц Корнельского университета разработана конструкция коаксиального ввода средней мощности 75 кВт, а так же предложена конструкция волноводного ввода средней мощности 250кВт. Для

разработанных конструкций, наряду с другими исследованиями, проведен расчет мультипакторного разряда.

Для коаксиального ввода мощности (рис. 12) проведен расчет мультипакторного разряда в коаксиальных волноводах “теплой” и “холодной” части, а так же в области “холодного” керамического окна.

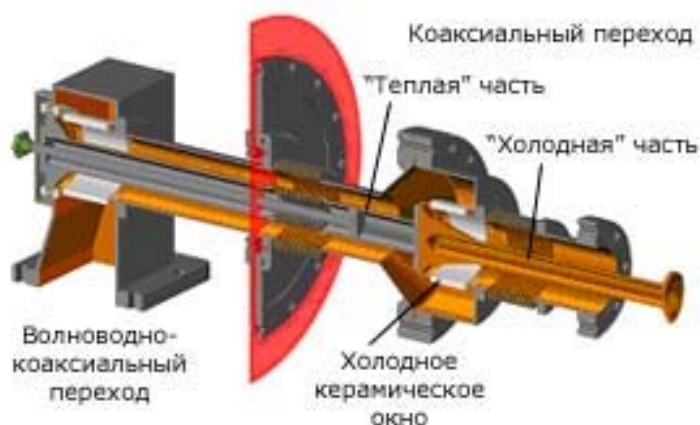


Рис. 12. Конструкция устройства ввода мощности коаксиального типа.

Расчет предсказывает возникновение мультипакторного разряда при уровнях передаваемой мощности от 65 до 1600 кВт в коаксиальном волноводе “теплой” части ввода мощности ($D = 62$ мм, $d = 28,8$ мм), при уровнях мощности от 75 до 2100 кВт в коаксиальном волноводе “холодной” части ($D = 62$ мм, $d = 22,8$ мм), и при уровнях мощности более 200 кВт в области керамического окна. На рис. 13 показаны примеры резонансных траекторий в различных областях.

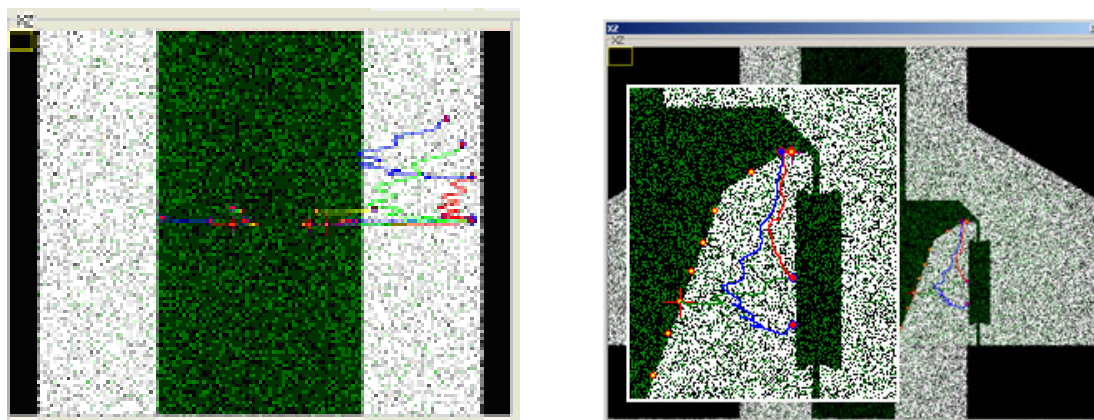


Рис. 13. Примеры резонансных траекторий в коаксиальном волноводе “теплой” части и в области керамического окна устройства ввода мощности инжектора ERL.

Исследование траекторий движения показало, что наиболее опасный мультипакторный разряд низких порядков (порядком мультипакторного разряда называется число периодов СВЧ поля, за которое электрон возвращается к поверхности), 4-ого и ниже, возникает при уровнях напряженности более 900 кВт. При уровнях передаваемой мощности до 250 кВт в устройстве ввода мощности возможно возникновение мультипакторного разряда, с порядком более 8-ого. Для его подавления можно использовать электрическое смещение.

Последние результаты тестирования прототипа данного ввода мощности действительно показывают длительное время тренировки устройства, что связывают с возникновением мультипакторного разряда.

На рис. 14 показана конструкция ввода мощности на основе прямоугольного волновода.

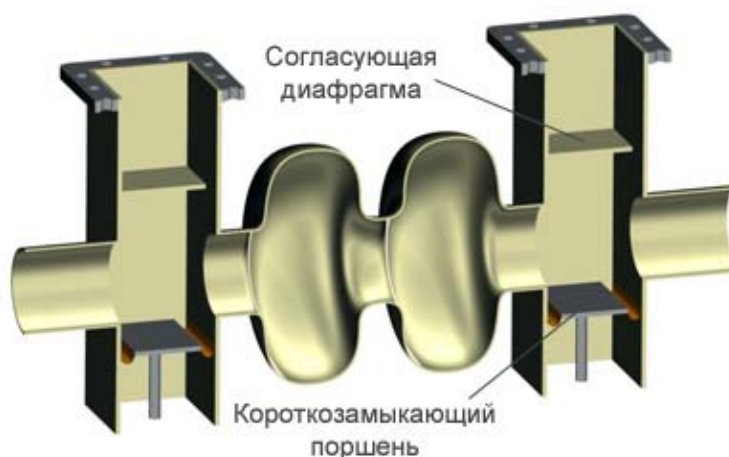


Рис. 14. Конструкция прямоугольного ввода мощности с подвижным короткозамыкающим поршнем.

Расчет показал, что в прямоугольном волноводе с поперечными размерами 165x85,5 мм возможно возникновение мультипакторного разряда при уровне передаваемой мощности более 180 кВт. Для подавления мультипакторного разряда предложена модифицированная конструкция с пазом вдоль широкой стенки. Показано, что подобное изменение конструкции позволяет повысить уровень передаваемой мощности без

опасности возникновения мультипакторного разряда до 300 кВт. На рис. 15 показаны картины распределения электронов в конструкциях с пазом и без него.

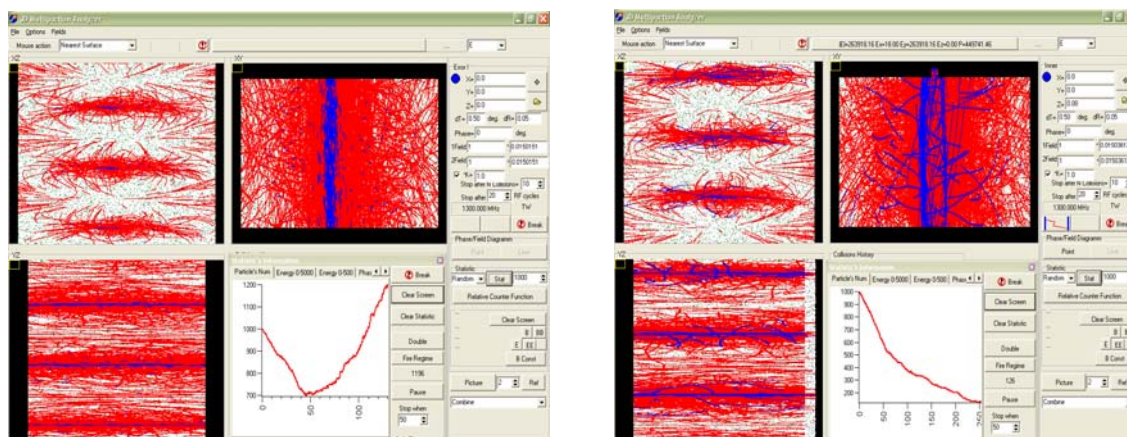


Рис. 15. Распределение электронов в прямоугольном волноводе:
а – конструкция без паза, б – конструкция с пазом.

Отчетливо видны изменения вносимые пазом в распределение электронов в структуре. Так же видно, что график зависимости числа частиц в структуре носит затухающий характер. Что говорит об отсутствии в структуре мультипакторного разряда.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

На основе разработанной методики создана программа численного моделирования мультипакторного разряда в СВЧ устройствах ускорителей заряженных частиц, позволяющая исследовать аксиально-симметричные и аксиально-несимметричные структуры с различным заполнением в режимах стоячей и бегущей волн, а также с учетом внешнего магнитного поля.

Проведены расчеты мультипакторного разряда в сверхпроводящих четвертьволновых ускоряющих резонаторах ускорителя ISAC II (Isotope Separation and Acceleration Facility, TRIUMF, Канада), в СВЧ узлах и элементах инжектора ускорителя с рекуперацией энергии ERL (Energy Recovery Linac, Корнельский университет, США), в бипериодической ускоряющей структуре с ячейками связи на оси и в ускоряющей структуре с шайбами и диафрагмами (УСЩД,

Институт

Ядерных

Исследований

РАН,

Россия). Выработаны рекомендации по подавлению мультипакторного разряда в резонаторе инжектора установки PITZ (Photo Injector Test Facility, DESY Zeuthen, Германия) наложением внешнего постоянного магнитного поля.

Результаты работы показывают, что поставленные цели по созданию универсального подхода к анализу электрической прочности СВЧ устройств и компонентов ускорителей заряженных частиц можно считать достигнутыми. Достоверность получаемых с его помощью результатов подтверждается сравнением ряда полученных результатов с аналитическими и известными экспериментальными данными.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. М.А. Гусарова, М.В. Лалаян, С.В. Куцаев, *Использование программы MultP для решения трехмерных задач*, Сборник научных трудов научной сессии МИФИ, V конференция научно-образовательного центра “Фундаментальные исследования материи в экстремальных состояниях”. Стр. 51-53, 2007.
2. Б.Ю. Богданович, М.А. Гусарова, А.А. Краснов, А.А. Завадцев, Д.А. Завадцев, В.И. Каминский, М.В. Лалаян, Н.П. Собенин, *Устройство ввода большой средней мощности в сверхпроводящие резонаторы ускорителей заряженных частиц*, Приборы и техника эксперимента. №1. Стр. 29-37, 2007.
3. М.А. Гусарова, Н.П. Собенин, М.В. Лалаян, *Расчет мультипакторного разряда в прямоугольных волноводах с продольными пазами в стенках*, Сборник научных трудов научной сессии МИФИ, VI конференция научно-образовательного центра “Фундаментальные исследования материи в экстремальных состояниях”. Стр. 38-40, 2008.
4. М.А. Гусарова, В.И. Каминский, С.В. Куцаев, М.В. Лалаян, *Расчет мультипакторного разряда в вводах мощности в сверхпроводящие резонаторы*, Сборник научных трудов научной сессии МИФИ, VI

конференция научно-образовательного центра “Фундаментальные исследования материи в экстремальных состояниях”. Стр. 40-42, 2008.

5. M.A. Gusarova, V.I. Kaminskiy, L.V. Kravchuk, S.V. Kutsaev, M.V. Lalayan, N.P. Sobenin, S.G. Tarasov, *Evolution of 3D simulation multipacting code MultP*, Problems of atomic sciences and technology, Series “Nuclear Physics Investigations”(49). №3. P. 123-127, 2008.
6. M.A. Gusarova, V.I. Kaminsky, S.V. Kutsaev, M.V. Lalayan, N.P. Sobenin, L.V. Kravchuk, S.G. Tarasov, *Multipacting simulation in rf structures*, Proceedings of LINAC08, Victoria, BC, Canada. P. 265-267, 2008.
7. M.A. Gusarova, I.V. Isaev, S.V. Kutsaev, V.I. Kaminsky, M.V. Lalayan, N.P. Sobenin, L.V. Kravchuk, *Multipactor simulations in axisymmetric and non-axisymmetric radio frequency structures*, Proceedings of RuPAC 2008, Zvenigorod, Russia. P. 215-217, 2008.
8. M.A. Gusarova, S.V. Kutsaev, V.I. Kaminsky, M.V. Lalayan, N.P. Sobenin, L.V. Kravchuk, S.G. Tarasov, *Multipacting simulation in accelerator RF structure*, Nuclear Instrument and Methods in Physics Research A, 599. P. 100-105, 2009.