

На правах рукописи

ЛЕВИЧЕВ Алексей Евгеньевич

**УСКОРЯЮЩАЯ СТРУКТУРА
С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СВЯЗЬЮ С ВОЛНОВОДНЫМ
ВОЗБУЖДАЮЩИМ РЕЗОНАТОРОМ**

**01.04.20 - физика пучков заряженных частиц
и ускорительная техника**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

НОВОСИБИРСК – 2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

ЛОГАЧЕВ
Павел Владимирович – доктор физико-математических наук,
Учреждение Российской академии наук
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

БУРДАКОВ
Александр Владимирович – доктор физико-математических наук,
Учреждение Российской академии наук
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
Сибирского отделения РАН,
г. Новосибирск.

ЛАЛАЯН
Михаил Владимирович – кандидат технических наук,
Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ», г. Москва.

ВЕДУЩАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ – Объединенный институт ядерных
исследований, г. Дубна.

Защита диссертации состоится « _____ » _____ 2011 г.
в « _____ » часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.03
Учреждения Российской академии наук Института ядерной физики
им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН.

Адрес: 630090, г. Новосибирск,
проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения
Российской академии наук Института ядерной физики имени Г.И. Будкера
Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

А.А. Иванов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Ускорители электронов на малые энергии (2 – 10 МэВ) широко применяются для научных и технологических целей: ускорительная техника; техника СВЧ; радиационная химия; физика твердого тела; медицина; обработка пищевых продуктов и отходов; полимерных материалов; стерилизация инструментов; дефектоскопия; таможенный досмотр. Необходимая средняя мощность ускоренного пучка зависит от конкретной цели и лежит в диапазоне 0,1 – 100 кВт.

Можно отметить, что к настоящему времени в ускорительной технике научные разработки во многих направлениях практически завершены и развитие идет только по совершенствованию ранее предложенных технических решений. Используются и совершенствуются структуры двух типов – бегущих и стоячих волн. Оба эти типа – структуры с последовательной связью.

В этой связи является актуальной разработка ускоряющих структур нового типа на основе новых принципов и идей. Одной из таких структур является ускоряющая структура с параллельной связью. В ней передача СВЧ мощности от генератора происходит сначала в возбуждающий резонатор, от которого параллельным образом питаются ускоряющие резонаторы.

Особенностями ускоряющей структуры с параллельной связью с возбуждающим волноводным резонатором, нагруженным реактивными штырями, являются следующие положения. СВЧ мощность подводится к каждому ускоряющему резонатору индивидуально через свою диафрагму связи. Это приводит к возможности получать любое распределение мощности вдоль структуры, варьируя отверстия связи ускоряющих резонаторов. В итоге, в начале ускоряющей структуры можно уменьшить амплитуду ускоряющего электрического поля, что приводит к уменьшению пробоев. Кроме этого, можно производить ускорение пучка с нерелятивистской энергией без значительного ухудшения его свойств. При пробое в одном из резонаторов структуры выделяется запасенная СВЧ энергия только этого резонатора. При этом работа структуры не нарушается. Центральное отверстие в ускоряющей структуре не используется для передачи СВЧ мощности, поэтому диаметр канала для пролета пучка может быть выбран настолько малым, насколько позволяют возможности фокусировки и динамики пучка. С уменьшением диаметра пролетного отверстия в центре резонатора уменьшается коэффициент перенапряжения. Ускоряющая структура с параллельной связью с возбуждающим волноводным резонатором конструктивно позволяет сформировать значительное магнитное поле постоянными магнитами, которое создается только вблизи оси пучка, что приводит к существенному снижению веса фокусирующей магнитной системы. Связь между резонаторами по

электромагнитному полю отсутствует, благодаря этому можно рассчитывать резонаторы каждый в отдельности, без учета влияния других резонаторов, в том числе и на наличие высших типов мод колебаний. По всем остальным показателям, таким как градиент ускорения, возможность охлаждения и др. ускоряющая структура с параллельной связью с возбуждающим волноводным резонатором не отличается от структур с последовательным способом передачи мощности.

Таким образом, как с точки зрения развития ускорительной техники, так и с точки зрения создания линейных ускорителей электронов с новыми возможностями и свойствами, задача по созданию представляемой ускоряющей структуры является актуальной.

Цель диссертационной работы

Целью настоящей работы являлось:

Разработка метода расчета электродинамических характеристик ускоряющей структуры нового типа, в которой связь генератора СВЧ мощности с ускоряющими резонаторами осуществляется через общий проходной волноводный резонатор, нагруженный реактивными штырями.

Разработка конструкции структуры с параллельной связью с возбуждающим волноводным резонатором.

Настройка и исследование структуры на низком уровне мощности.

Настройка и исследование структуры на высоком уровне мощности.

Разработка макета ускорителя электронов с использованием структуры с параллельной связью с возбуждающим волноводным резонатором.

Экспериментальная проверка параметров структуры с параллельной связью с возбуждающим волноводным резонатором с пучком электронов в режиме запасенной энергии.

Личный вклад автора

Личное участие автора в получении результатов, составляющих основу диссертации, является определяющим. Им непосредственно разработана теоретическая модель ускоряющей структуры. Рассчитаны электродинамические параметры системы. Спроектирована ускоряющая структура. Произведена настройка на низком и высоком уровне СВЧ мощности. Автор принимал активное и ключевое участие в создании СВЧ стенда и получении электронного пучка на выходе ускорителя.

Научная новизна

Впервые разработана модель структуры с параллельной связью нового типа, в которой подвод СВЧ мощности к ускоряющим резонаторам осуществляется через общий проходной объемный волноводный резонатор, нагруженный реактивными штырями.

Впервые расчетным и экспериментальным путем исследована ускоряющая структура с параллельной связью нового типа.

Впервые предложен и применен для экспериментальных исследований способ измерения межрезонаторного коэффициента связи системы двух связанных резонаторов без необходимости определения частот π - и 0 -мод колебаний в резонаторах.

Впервые с помощью ускоряющей структуры с параллельной связью с возбуждающим волноводным резонатором, нагруженным реактивными штырями, работающей в режиме запасенной энергии, получен ускоренный электронный пучок с параметрами: энергией электронов до 4 МэВ; импульсным током до 0,3 А; длительностью импульсов тока – 2,5 нс.

Научная и практическая ценность

На основе теоретического описания модели связанных резонаторов получено выражение, позволяющее измерять коэффициент связи между связанными резонаторами, которое может использоваться для построения частотных фильтров, ускоряющих структур и т.п. Создан макет ускоряющей структуры нового типа, на основе которого можно разрабатывать прототип электронного линейного ускорителя как для научных, так и для промышленных целей. Создан ускорительный стенд, включающий ускоряющую структуру, который предполагается применить для радиационно-химических исследований в Учреждении Российской академии наук Институте катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения РАН.

Основные положения, выносимые на защиту

Метод расчета электродинамических характеристик ускоряющей структуры с параллельной связью.

Способ измерения межрезонаторного коэффициента связи системы двух связанных резонаторов.

Конструкция ускоряющей структуры с параллельной связью.

Результаты настройки и исследования ускоряющей структуры на низком уровне СВЧ мощности, результаты сравнения измеренных данных с расчетными параметрами.

Результаты тестирования ускоряющей структуры при высоком СВЧ уровне мощности до 2,5 МВт, а также результаты тестирования с пучком электронов.

Результаты сопоставления расчетных и экспериментальных данных при ускорении пучка электронов.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы неоднократно докладывались и обсуждались на семинаре в Учреждении Российской

академии наук Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН (г. Новосибирск), на Российских и Международных научных конференциях: Russian Particle Accelerator Conference, RUPAC'06 (Novosibirsk, Russia, 2006); European Particle Accelerator Conference, EPAC'08 (Genoa, Italy, 2008); International Particle Accelerator Conference, IPAC'10 (Kyoto, Japan, 2010). Кроме этого, результаты диссертационной работы содержатся в статьях в 2 реферируемых научных журналах и одном патенте.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы из 31 наименования, изложена на 110 страницах машинописного текста, содержит 63 рисунка и 4 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведены недостатки существующих ускоряющих структур. Описаны преимущества ускоряющей структуры с параллельным способом питания ускоряющих резонаторов, а также сделан краткий исторический обзор развития таких структур. Рассмотрена в общем виде разработанная ускоряющая структура с параллельной связью с возбуждающим волноводным резонатором, нагруженным реактивными штырями. Сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрена система из N -связанных резонаторов, получены выражения для амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик резонаторов в общем виде. На основе этого более подробно рассмотрен одиночный резонатор и система из двух связанных резонаторов. Получены выражения для запасенных энергий внутри пары резонаторов. Рассмотрена проблема связи между резонаторами, режимы «пересвязи» и «недосвязи» с внешним СВЧ-волноводом. Описан коэффициент связи между резонаторами и способ его измерения. Приводится обоснование применения данной концепции для расчета ускоряющей структуры с параллельной связью с волноводным возбуждающим резонатором, нагруженным реактивными штырями.

Во второй главе описаны отверстия связи между двумя связанными резонаторами. Получены выражения для оценки геометрических размеров отверстий связи в зависимости от значения коэффициента связи между резонаторами. Рассмотрена возможность применения данных выражений конкретно для ускоряющей структуры с параллельной связью с учетом влияния реактивных штырей в общем возбуждающем резонаторе.

В третьей главе на основе полученной амплитудно-частотной характеристики и преобразования Лапласа для пары связанных резонаторов приводится описание переходного процесса отраженного от резонаторов сигнала. Показано различие между переходным процессом в одиночном

возбуждающем резонаторе и системой связанных резонаторов. С помощью полученных результатов дана оценка времени установления колебаний в ускоряющей структуре с параллельной связью.

Четвертая глава посвящена непосредственному расчету ускоряющей структуры с параллельной связью с возбуждающим волноводным резонатором на энергию до 5 МэВ с помощью разработанного метода, основанного на двух связанных резонаторах. Структура состоит из пяти ускоряющих резонаторов и одного волноводного возбуждающего резонатора, нагруженного реактивными штырями. Первые два, по ходу пучка, ускоряющие резонаторы имеют переменную геометрию, что необходимо для фазирования электронного пучка с энергией инжекции 50 кэВ с ускоряющим электрическим полем.

Приводятся рассчитанные параметры всех резонаторов системы, включая высоту реактивных штырей возбуждающего волноводного резонатора. Из анализа динамики частиц определены наиболее оптимальные значения амплитуд электрических полей в резонаторах для достижения энергии 5 МэВ. Исходя из этого, подобраны коэффициенты связи между возбуждающим и ускоряющими резонаторами, а также с подводящим СВЧ волноводом. При выбранных значениях коэффициентов связи 13% мощности генератора должно поглощаться в возбуждающем, а 87% – в ускоряющих резонаторах.

Оценены геометрические размеры для отверстий связи между ускоряющими резонаторами и возбуждающим резонатором. Получена зависимость амплитуды отраженной волны от структуры при переходном процессе. Описана конструкция фокусирующей системы с использованием постоянных магнитов с радиальной намагниченностью. Приводится распределение магнитного поля на оси ускоряющих резонаторов. Амплитудное значение магнитного поля не превышает 0,77 ГГс.

В пятой главе описано изготовление и настройка ускоряющей структуры. Показаны составные части устройства с геометрическими размерами. Описан способ крепления их между собой с помощью индиевого уплотнения. Продемонстрирована изготовленная ускоряющая структура с параллельной связью на проектную энергию 5 МэВ.

Описана процедура настройки и измерения параметров резонаторов. Приведены ее результаты в виде таблицы с собственными добротностями, частотами и коэффициентами связи резонаторов, а также амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики. Отличие проектного значения суммарного коэффициента связи возбуждающего резонатора с ускоряющими от измеренного равно 15%. Разность расчетных собственных добротностей ускоряющих резонаторов от полученных – 12%. Частоты ускоряющих резонаторов отличаются не более чем на 20 кГц, за исключением первого, по ходу пучка, резонатора, который является самым низкодобротным. Отличие его частоты равно 52 кГц. Максимальная разность частот возбуждающего и ускоряющих резонаторов – 83 кГц. Рабочая частота ускоряющей структуры

составила 2454,706 МГц. Коэффициент связи с подводным волноводом равен 0,86, что меньше проектного значения на 14%. На рабочей частоте сдвиг фаз между ускоряющими резонаторами отличается от π не более чем на $\pm 6\%$.

На основе измеренных коэффициентов связи между возбуждающим резонатором и ускоряющими сделан вывод о мощностях потерь в системе: 19% мощности генератора теряется в возбуждающем резонаторе; 80% – в ускоряющих; 1% – отражается от структуры. Кроме этого, с учетом все тех же измеренных коэффициентов связи получены значения амплитуд электрического поля в ускоряющих резонаторах. В связи с этим произведен расчет динамики пучка в режиме π - и 2π -инжекции. При входной мощности 2,5 МВт энергия пучка составляет 4,7 МэВ, разброс по энергиям менее 1%, захват 100% при использовании группирующего резонатора и π -инжекции. В случае 2π -инжекции средняя энергия составляет 4,1 МэВ, разброс по энергиям около 30%, захват пучка в районе 50%.

Приводится результат измерения магнитного поля фокусирующей системы ускоряющей структуры на основе постоянных магнитов с радиальной намагниченностью. Рассчитанная амплитуда магнитного поля на оси резонаторов от измеренной отличается не более чем на 13%.

В шестой главе приводится описание стенда ускорителя с клистроном КИУ-111 и инжектором электронов. Параметры клистрона: импульсная мощность 5 МВт, средняя – 5 кВт, рабочая частота 2450 МГц. Волноводный тракт включает в себя ферритовый вентиль с коэффициентом ослабления –20 дБ, волноводное вакуумное окно и два волноводно-коаксиальных ответвителя. Коэффициенты ответвления и направленности ответвителей: для падающей волны –76 дБ и 23 дБ соответственно, для отраженной волны –75,6 дБ и 26 дБ соответственно.

Инжекционная система содержит трехэлектродную пушку, группирующий резонатор, магнитную линзу, вакуумный тракт транспортировки пучка, систему подачи СВЧ сигнала на пушку. Рабочие параметры системы: напряжение до 60 кВ; импульсный ток 1 А; средний ток до 1 мА.

В данной главе также приводятся результаты тренировки ускоряющей структуры с параллельной связью при больших значениях СВЧ мощности до 2,6 МВт. В конце главы описаны зависимость выходного тока электронов длительностью 2,5 нс (2π -инжекция) от мощности клистрона, измеренная энергия и поперечный профиль пучка. Получено значение средней энергии 4 МэВ при 2,5 МВт мощности генератора, захват пучка близкий к 50%, который слабо зависит от энергии частиц.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. A.E. Levichev, Yu.D. Chernousov. The prototype's characteristics of the cavity for excitation of parallel RF accelerating structure. - Proceedings of RuPAC 2006, JACoW publication, p.197-199.
2. A.E. Levichev, V.M. Pavlov, V.I. Ivannikov, I.V. Shebolaev, Yu.D. Chernousov. Prototype of Parallel Coupled Accelerating Structure. - Proceedings of EPAC 2008, JACoW publication, p. 2737-2739.
3. Черноусов Ю.Д., Иванников В.И., Шеболаев И.В., Левичев А.Е, Павлов В.М. Способ определения коэффициента межрезонаторной связи системы двух связанных резонаторов. - Патент на изобретение, №2368986, Б.И. 2009, №27, с.1.
4. A.E. Levichev, V.M. Pavlov, V.I. Ivannikov, I.V. Shebolaev, Yu.D. Chernousov. Characteristics of the Parallel Coupled Accelerating Structure. - Proceedings of IPAC 2010, JACoW publication, p.3765-3767.
5. Ю.Д. Черноусов, В.И. Иванников, И.В. Шеболаев, А.Е. Левичев, В.М. Павлов. Полосовые характеристики связанных резонаторов. // Р.Э., 2010, том 55, № 7, с.1-7.
6. Ю.Д. Черноусов, А.Е. Левичев, В.М. Павлов, Г.К. Шамуилов. Тонкая диафрагма в прямоугольном волноводе. // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2011, том 6, выпуск 1, с.44-49.

ЛЕВИЧЕВ Алексей Евгеньевич

**Ускоряющая структура
с параллельной связью с волноводным
возбуждающим резонатором**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор 25.04. 2011 г.

Подписано в печать 26.04. 2011 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 0.6 печ.л., 0.5 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 12

Обработано на ПК и отпечатано
на ротапринтере «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11