

На правах рукописи



Арсентьева Мария Васильевна

Разработка структуры резонаторов W-диапазона

1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск — 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

ЛЕВИЧЕВ
Алексей Евгеньевич – кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

КУЛЕВОЙ
Тимур Вячеславович – доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, заместитель директора по научной работе по ускорительному направлению.

ШВЕДУНОВ
Василий Иванович – доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына, г. Москва, главный научный сотрудник.

**ВЕДУЩАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ** – Международная межправительственная организация «Объединённый институт ядерных исследований», г. Дубна.

Защита диссертации состоится «09» декабря 2022 г. в «14:00» часов на заседании диссертационного совета 24.1.162.02 при ИЯФ СО РАН по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯФ СО РАН и на сайте https://inp.nsk.su/images/Arsentyeva_disser.pdf.

Автореферат разослан «27» октября 2022 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук



Багрянский Петр Андреевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы. С начала развития ускорительной техники получение пучков заряженных частиц высокой энергии является ключевой задачей при создании новых установок. По этой причине повышение темпа ускорения является одной из приоритетных задач, так как физический размер установок при проектировании обычно ограничен, а их стоимость напрямую зависит от габаритов. Действующие и проектируемые линейные резонансные ускорители имеют габариты в широком диапазоне — от нескольких метров для ускорителей различных промышленных приложений [1] до десятков километров в случае возможно будущих линейных коллайдеров [2]. При этом в науке и технике существует запрос на создание компактных линейных ускорителей на диапазон энергий масштаба десятков мегаэлектронвольт. Существенным препятствием в получении высоких темпов ускорения является возникновение высокочастотных (ВЧ) пробоев в ускоряющих структурах при достижении определенного уровня входной мощности. Имеется несколько теорий механизма возникновения ВЧ пробоев [3–5], однако они применимы лишь при определенных условиях эксперимента, поэтому не являются в полной мере подтвержденными. Тем не менее, проведенные исследования отражают общую тенденцию к увеличению предельной амплитуды электрического поля с ростом рабочей частоты ускоряющего напряжения. Одни из первых исследований связи рабочей частоты и максимального электрического поля отражены в работе У. Килпатрика [6], эмпирически выведенная им формула имеет вид

$$E(\text{МВ/м})e^{-4,25/E} = 24,4 \cdot [f(\text{ГГц})]^{1/2}, \quad (1)$$

где E — максимальное электрическое поле, f — рабочая частота. В этой работе также сделаны попытки объяснить процесс возникновения ВЧ пробоев, не позволяющих далее повышать значение электрического поля выше порогового. При этом автором установлено, что при более качественной обработке поверхности электродов возможно некоторое дополнительное повышение амплитуды порогового поля пробоя. В последующих исследованиях, направленные на улучшение качества поверхности технологические разработки привели к существенному увеличению достигнутых значений амплитуды электрических полей, и, соответственно, возможных темпов ускорения. Так, в 1997 г. была предложена другая эмпирическая формула [7]:

$$E(\text{МВ/м}) = 220 [f(\text{ГГц})]^{1/3}. \quad (2)$$

Однако и эта зависимость, подобно (1), не учитывает длительность ВЧ импульсов, что, судя по проведенным в этой области исследованиям, необходимо принимать во внимание в изучении возникновения ВЧ пробоев. Несмотря на то, что предложенные формулы в полной мере не были

подтверждены, был сделан вывод о том, что повышение частоты все же позволяет работать при более высоких ускоряющих градиентах. Это привело к росту числа исследований в области ускоряющих структур с более высоким значением рабочей частоты. Помимо повышения рабочей частоты в металлических ускоряющих структурах, другим перспективным направлением, безусловно, является развитие новых методов ускорения, таких как кильватерное ускорение в плазме и в диэлектрических структурах [8]. Эти методы являются относительно новыми и в текущих условиях сложно реализуемыми экспериментально в ИЯФ СО РАН, в то время как на базе имеющего опыта работы с металлическими СВЧ (сверхвысокие частоты) структурами возможна реализация экспериментов с повышенными значениями рабочих частот. Так, в 1978 г. на базе ИЯФ СО РАН были проведены эксперименты, в которых было показано, что качественно обработанная медная поверхность резонатора на частоте 5,6 ГГц выдерживает напряженность электрического поля до 200 МВ/м, что с учетом коэффициента перенапряжения обеспечивает темп ускорения около 100 МэВ/м [9].

Спектр частот от 75 ГГц до 110 ГГц называется «W-диапазоном» согласно номенклатуре IEEE (*англ.* Institute of Electrical and Electronics Engineers — Институт инженеров электротехники и электроники). В некоторых источниках упоминается спектр миллиметровых волн, которому соответствуют границы 40 ГГц и 300 ГГц. По этой причине при описании структур с частотой около 100 ГГц можно встретить как термин «миллиметровые волны», так и термин «W-диапазон».

Степень разработанности темы. Для работы в W-диапазоне была предложена планарная геометрия ускоряющих структур, позволяющая варьировать значение рабочей частоты. Эта структура открытого типа состоит из двух равнозначных половин, общий вид одной из них представлен на рисунке 1 [10].

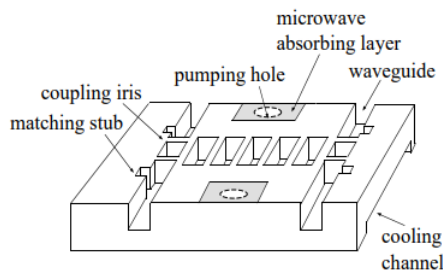


Рис. 1 — Половина планарной структуры с открытой геометрией

Полости резонаторов при рабочих частотах в W-диапазоне имеют характерный размер около 1 мм и могут быть изготовлены с использованием рентгеновской литографии, иначе называемой LIGA [11]. Предполагалось,

что такие структуры должны работать на бегущей волне с типом колебаний $2\pi/3$. В первых публикациях по данной тематике особое внимание уделено проработке технологии изготовления таких ускоряющих структур, а также расчету их электродинамических характеристик и подбору геометрии. Другой проблемой для работы со структурами в W-диапазоне частот является отсутствие источников СВЧ мощности. Помимо этого, существуют также сложности в передаче СВЧ мощности при частотах 100 ГГц и выше. Альтернативный вариант возбуждения таких структур основан на их нагрузке полем пучков заряженных частиц, что и было реализовано в экспериментах в Национальной ускорительной лаборатории SLAC (Стэнфорд, США). В SLAC были изготовлены прототипы структур с рабочими частотами в диапазоне 90–140 ГГц (рисунок 2, [12]), причем исследовались свойства таких структур из нескольких материалов: из чистой меди и из сплава меди с серебром.

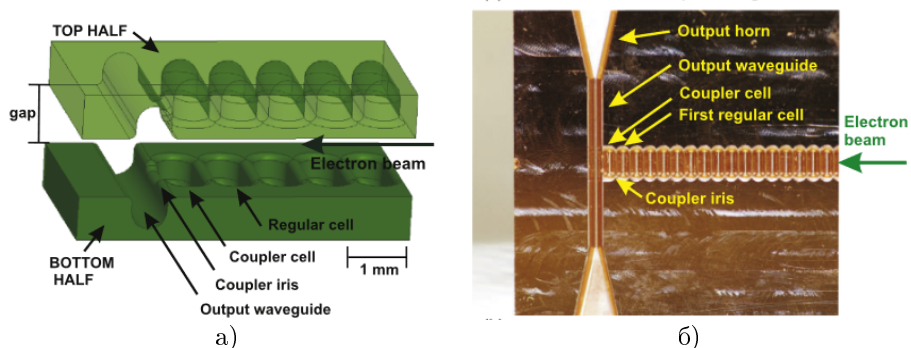


Рис. 2 — Планарная структура с открытой геометрией на частоту 100 ГГц (SLAC)

Статистическое исследование ВЧ пробоев в этих структурах показало, что пороговое поле действительно растет с рабочей частотой. Характерное поле пробоя на частоте 120 ГГц составило 0,44 ГВ/м для структуры из чистой меди и 0,42 ГВ/м для структуры из сплава меди с серебром; такие значения достигнуты при длительности импульсов около 2 нс и темпе пробоев не хуже 10^{-3} . При таком темпе ВЧ пробой происходит не чаще, чем в одном импульсе из тысячи. Однако как и во многих предыдущих исследованиях по достижению максимально возможных градиентов, авторы допускают повышение предела по полю при помощи улучшения вакуума и тренировки поверхности.

Как уже упоминалось, разработка структур с характерным размером 1 мм требует серьезной технологической проработки. Помимо успешного опыта по созданию и работе структур с рабочей частотой

около 2856 МГц [13], в ИЯФ СО РАН имеется успешный опыт по созданию ускоряющих структур на частоту 14 ГГц [14], однако разработка структур W-диапазона требует новых конструкторских решений, а в их изготовлении возникают значительные технологические нюансы, которые необходимо учитывать при отработке технологии производства. Для начала работы в ИЯФ СО РАН по данной тематике была выбрана структура, состоящая из независимых резонаторов, изготавливаемых индивидуально, в отличие, например, от структур на бегущей волне, как в работе [12]. Во-первых, такая концепция позволяет проводить расчет возбуждения всех резонаторов структуры индивидуально, так как связь по электромагнитному полю отсутствует либо достаточно мала. Во-вторых, изготовление такой структуры можно осуществить на Экспериментальном производстве ИЯФ СО РАН с имеющимся оборудованием. В-третьих, при работе с высокими градиентами ускорения в будущих экспериментах возможно возникновение ВЧ пробоя в отдельно взятых резонаторах, что в случае отсутствия связи между ними не повлияет на соседние ячейки. Этот аспект будет иметь значение при проведении экспериментов с ускорением пучков в уже возбужденной структуре W-диапазона: при возникновении пробоя работа структуры в целом не будет нарушена, хотя значение энергии ускоренного пучка, безусловно, уменьшится.

Первый прототип структуры из резонаторов на частоту 96 ГГц был изготовлен [A1] с целью определения возможностей экспериментального производства ИЯФ СО РАН и начала отработки технологии. Однако конструкция структуры изначально не предусматривала наличие вакуумных фланцев, а также после пайки не обладала необходимой жесткостью, в результате чего ее невозможно было тестировать на ускорительной установке с электронным пучком. Однако на том этапе было показано, что отдельные ячейки могут быть изготовлены; этот позитивный опыт дал продолжение работе по разработке структур W-диапазона в ИЯФ СО РАН. Для последующих экспериментов было решено разработать и изготовить структуру резонаторов с частотой около 86 ГГц.

Целью данной работы является определение электродинамических параметров структур W-диапазона на основе независимых резонаторов при их взаимодействии с пучком заряженных частиц, разработка и изготовление структуры, конструкция которой позволит проведение дальнейших экспериментов по возбуждению структуры пучком заряженных частиц, а также анализ возможности проведения таких экспериментов на действующих и проектируемых установках в ИЯФ СО РАН.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. При помощи теоретического анализа определить влияние параметров пучка заряженных частиц на возбуждение им волн в резонаторах структуры W-диапазона. На основе проведенного

- анализа необходимо подобрать параметры структуры и возбуждающего пучка, при которых достигается наиболее эффективное возбуждение структуры.
2. Провести полный цикл моделирования структуры на основе независимых резонаторов W -диапазона, а именно: моделирование с анализом электродинамических характеристик отдельных резонаторов и структуры в целом, моделирование возбуждения структуры пучком заряженных частиц.
 3. Разработать требования к технологическому процессу для производства структуры с выбранными параметрами, оценить возможности изготовления такой структуры на Экспериментальном производстве ИЯФ СО РАН.
 4. Определить требования к параметрам ускорительной установки для тестирования структуры W -диапазона, в том числе к фокусирующей системе для проводки возбуждающего пучка через структуру. Провести моделирование динамики пучка с учетом параметров выбранного ускорителя, а также разработать стенд, на котором будет возможна реализация экспериментов по возбуждению структуры W -диапазона.
 5. Изготовить структуру на основе независимых резонаторов W -диапазона, конструкция и свойства которой позволят ее дальнейшее тестирование в экспериментах с возбуждением в ней электрических полей при взаимодействии с пучком заряженных частиц.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Показана возможность получения значительного ускоряющего градиента при возбуждении пучком заряженных частиц электромагнитных волн поля в структуре W -диапазона, состоящей из независимых резонаторов.
2. Предложен дизайн структуры W -диапазона с ослабленной связью между резонаторами, изготавливаемыми по отдельности, в отличие от ранее реализованных вариантов структур W -диапазона. Разработанный дизайн допускает проведение измерений геометрических размеров индивидуальных резонаторов, в том числе для оценки их возбуждения последовательностью сгустков заряженных частиц.
3. Изготовлена структура W -диапазона, состоящая из отдельных резонаторов, с требуемым качеством, характеристики которой позволяют ее дальнейшее тестирование на ускорительном стенде.
4. Показана возможность проведения экспериментов по возбуждению структуры W -диапазона электронным пучком на ускорительных установках в ИЯФ СО РАН, проведено моделирование, сделаны численные расчеты ожидаемых эффектов.

Теоретическая и практическая значимость. Проведенные аналитические расчеты параметров возбуждения резонаторов пучком заряженных частиц позволяют оценить взаимодействие пучка со структурой в целом, в том числе при возбуждении многосгустковым пучком. Определены критерии для параметров электронного пучка, при котором наиболее эффективно происходит возбуждение волн в структуре W-диапазона. Разработан технологический процесс для создания структур миллиметрового диапазона длин волн. Спроектирована и изготовлена структура W-диапазона на основе независимых резонаторов, конструкция которой позволяет ее тестирование в будущих экспериментах по возбуждению пучком заряженных частиц. Опыт, полученный в ходе разработки структуры W-диапазона, может быть использован для проектирования в ИЯФ СО РАН новых компактных линейных ускорителей с высокими градиентами ускорения. Первые эксперименты по возбуждению изготовленной структуры W-диапазона пучком заряженных частиц могут быть проведены в ИЯФ СО РАН.

Методология и методы исследования. В основе исследования возбуждения структуры W-диапазона лежит теоретический анализ взаимодействия отдельных резонаторов при их нагрузке током пучка заряженных частиц, анализ процессов динамики возбуждающего пучка в электромагнитных полях на основе уравнений и с применением численного моделирования, а также анализ свойств изготовленной структуры при помощи методов вероятностного анализа на основе измерений геометрических параметров.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. При прохождении через резонаторы структуры W-диапазона с возбуждением в них электромагнитных волн возможно получение значительных ускоряющих градиентов при определенных параметрах резонаторов и возбуждающего пучка.
2. Увеличение амплитуды наведенного поля может быть достигнуто путем возбуждения структуры W-диапазона последовательностью сгустков заряженных частиц. При этом максимальный получаемый градиент зависит как от электродинамических размеров структуры, так и от параметров последовательности сгустков.
3. На разработанном стенде линейного ускорителя Сибирского кольцевого источника фотонов (СКИФ) возможно получение электронных пучков, в том числе состоящих из последовательности сгустков, которые могут быть использованы для проведения экспериментов по возбуждению структуры W-диапазона.
4. Изготовленные на основе разработанной технологии структуры W-диапазона обладают свойствами, необходимыми для их дальнейшего тестирования в экспериментах по возбуждению пучком заряженных частиц.

Достоверность представленных результатов обеспечивается совпадением аналитических оценок параметров возбуждения структуры пучком заряженных частиц и моделирования возбуждения с применением программных пакетов CST Studio [15]; полученные в ходе теоретического анализа параметры динамики возбуждающего пучка электронов подтверждаются моделированием в программном пакете ASTRA [16].

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях:

- Ultrafast beams and applications 2017 (UBA17), Армения, Ереван, 2017 г.
- Международная научная студенческая конференция 2018 (МНСК-2018), Россия, Новосибирск, 2018 г.
- Linear accelerator conference 2018 (LINAC2018), Китай, Пекин, 2018 г.
- European advanced accelerator concepts workshop 2019 (EAAC2019), Италия, Портоферрайо, 2019 г.
- Russian particle accelerator conference 2021 (RuPAC2021), Россия, Алушта, 2021 г.

Личный вклад. Автор полностью выполнил все этапы расчета структуры W-диапазона и определил параметры электронного пучка, наиболее подходящие для эффективного возбуждения структуры. При ключевом участии автора проведена конструкторская разработка дизайна структуры W-диапазона, автор сформулировал требования к технологическому процессу производства. Автор принимал непосредственное участие в анализе и разработке элементов стенда линейного ускорителя, на котором могут быть проведены эксперименты по возбуждению структуры W-диапазона. Автор провел моделирование динамики электронного пучка на линейном ускорителе и показал возможность получения параметров пучка, подходящих для будущих экспериментов по возбуждению структуры W-диапазона. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в проделанную работу.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 9 печатных изданиях, 6 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК [A1–A6], 3 статьи опубликованы в сборниках трудов конференций, рецензируемых международной базой данных Scopus [A7–A9]. Большая часть результатов работы вошла в научно-квалификационную работу аспиранта [A10], которая успешно защищена в 2022 г., содержание некоторых разделов Главы 1 и Главы 2 вошло в магистерскую диссертацию автора [A11], защищенную в 2018 г.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Полный объем диссертации составляет 100 страниц, включая 57 рисунков и 15 таблиц. Список литературы содержит 51 наименование.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы, а также представлены выносимые на защиту положения.

Первая глава посвящена теоретическому анализу возбуждения структуры независимых резонаторов W-диапазона густками заряженных частиц. Приводятся аналитические оценки амплитуды наведенного поля на собственной моде E_{010} в случае возбуждения резонатора одиночным густком (**раздел 1.1**), определяется влияние параметров густка и самого резонатора на спектр возбуждения. Так как амплитуда продольной компоненты электрического поля на возбужденной моде резонатора E_{010}

$$E_z \propto f^2 e^{-2\pi^2 f^2 \sigma_t^2} \quad (3)$$

существенно убывает с ростом RMS (среднеквадратичной) длительности густка σ_t , то именно короткие густки являются наиболее предпочтительным источником возбуждения поля в резонаторах структуры. В **разделе 1.2** рассмотрен режим возбуждения резонаторов последовательностью густков заряженных частиц. Введенный коэффициент возбуждения отражает, насколько эффективнее последующие густки взаимодействуют с резонатором по сравнению с первым. Показано, что в таком случае можно добиться значительного увеличения амплитуды наведенного поля, причем начиная с некоторого номера густка наступает режим «насыщения» (рисунок 3, а)); однако для этого необходимо выполнение условия кратности собственной частоты резонаторы f частоте следования густков f_b

$$f/f_b = N, \quad (4)$$

где N — натуральное число. В общем случае вводится понятие расстройки частоты δ , при которой

$$f/f_b = N + \delta. \quad (5)$$

С увеличением расстройки максимальный коэффициент возбуждения уменьшается, а при $\delta = 0.5$ наблюдается наименее эффективное возбуждение большей частью густков последовательности (рисунок 3, б)).

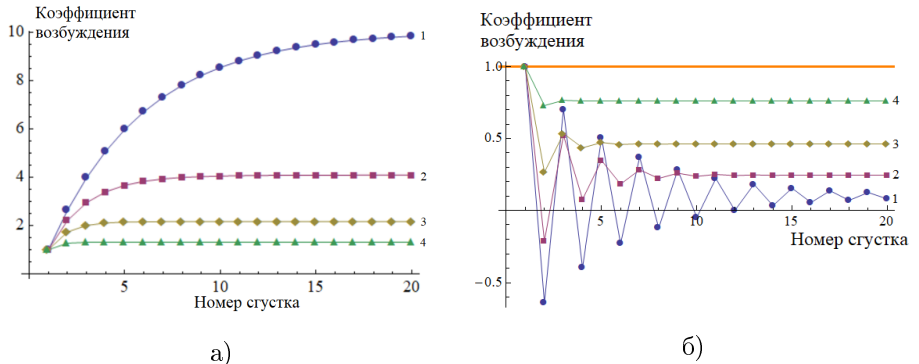


Рис. 3 — Зависимость коэффициента возбуждения от номера сгустка последовательности при различных значениях декремента: 1) $\Delta T/T_c = 0,2$, 2) $\Delta T/T_c = 0,5$, 3) $\Delta T/T_c = 1$, 4) $\Delta T/T_c = 2$, где ΔT — период следования сгустков, T_c — характерное время затухания поля в резонаторе; а) $\delta = 0$, б) $\delta = 0.5$

С учетом проведенного анализа, а также с точки зрения конструктивных характеристик и обеспечения слабой связи между резонаторами в разделе 1.3 выбираются параметры структуры (таблица 1).

Таблица 1 — Параметры структуры W-диапазона

Параметр	Значение
Длина резонатора L , мм	1,75
Длина межрезонаторного промежутка g , мм	1
Внутренний диаметр резонатора $2R$, мм	2,7
Центральная апертура $2a$, мм	0,8
Внешний радиус резонатора $2b$, мм	8
Число резонаторов в структуре N_c	90

Отмечается, что в предельном случае малой длительности возбуждающего сгустка (так называемого «точечного» сгустка) амплитуда наведенного поля на моде E_{010} принимает максимальное значение. Однако при выборе параметров возбуждающего сгустка необходимо принимать во внимание, что множитель в виде форм-фактора $e^{-2\pi^2 f^2 \sigma_t^2}$ возникает в выражениях для амплитуды поля высших мод; поэтому за счет «правильного» выбора длительности пучка возможно возбуждение основной моды, в то время как высшие моды значительно подавляются. Если в

эксперименте стоит задача получать максимально возможные при данных условиях амплитуды полей (например, для исследования прочности резонаторов с точки зрения ВЧ пробоев), то следует выбирать $\sigma_t \ll 1$ пс; если же необходимо возбуждать преимущественно моду E_{010} , то следует выбирать большее значение длительности возбуждающего сгустка. Так, при $\sigma_t = 2$ пс вклад высших мод составляет на несколько порядков меньше (рисунок 4), что подтверждается моделированием возбуждения резонаторов электронным сгустком в **разделе 1.4**.

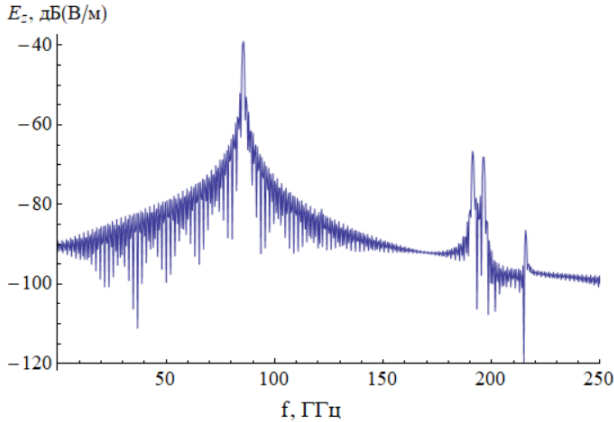


Рис. 4 — Спектр продольной компоненты электрического поля, возбужденного в резонаторе структуре при длительности сгустка $\sigma_t = 2$ пс

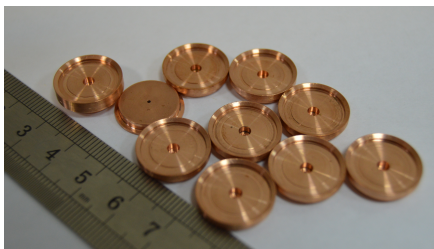
Вторая глава посвящена анализу возможности получения пучка с параметрами, необходимыми для проведения первых экспериментов по возбуждению структуры W-диапазона. В качестве возможной ускорительной установки для подобных экспериментов предложен стенд линейного ускорителя СКИФ, находящийся на стадии проектирования в ИЯФ СО РАН, на данном стенде предполагается получение электронных пучков с зарядом до 1 нКл. В **разделе 2.1** приведено описание ключевых элементов стенда, а именно, пушки, группирующего резонатора, предускорителя-группирователя, ускоряющей секции, магнитной системы и системы диагностики. В **разделе 2.2** подробно описана динамика электронного пучка на разработанном стенде: приводятся результаты моделирования динамики, в том числе, при наличии ошибок выставки элементов, а также проводится анализ поперечной динамики пучка при его движении через малую апертуру структуры W-диапазона. В таблице 2 приведены параметры электронного пучка, который предполагается использовать в экспериментах по возбуждению структуры W-диапазона на стенде линейного ускорителя СКИФ.

Таблица 2 — Параметры пучка на стенде линейного ускорителя СКИФ

Параметр	Значение
Заряд	0,3 нКл
RMS вертикальный размер, мм	0,96
RMS горизонтальный размер, мм	0,96
Вертикальный нормализованный эмиттанс, $\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$	20
Горизонтальный нормализованный эмиттанс, $\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$	20
Средняя энергия, МэВ	48
Энергетический разброс, кэВ	220
RMS длительность, пс	1,8

Определены требования к магнитной системе для проведения возбуждающего пучка через структуру W-диапазона, показано токопрохождение около 50% при фокусировке триплетом квадруполей и дана оценка ожидаемым результатам эксперимента.

Третья глава посвящена дизайну и изготовлению структуры W-диапазона. В **разделе 3.1** подробно описана конструкция трех типов отдельных ячеек (рисунок 5, а)) и последовательности их сборки для последующей пайки. Соосность ячеек обеспечивается их жесткой фиксацией в оснастке во время пайки (**раздел 3.2**); с учетом вакуумной герметичности структуры (рисунок 5, б)) обладает вакуумной герметичностью, что позволяет тестирование такой структуры на ускорительном стенде.



а)



б)

Рис. 5 — Структура W-диапазона: а) отдельные резонаторы, б) паяная структура

В разделе 3.3 приводится оценка эффективности взаимодействия последовательности электронных сгустков на стенде СКИФ с резонаторами структуры. Анализ проведен на основе измерений геометрических размеров отдельных ячеек: показано, что при имеющихся параметрах ячеек и проектных параметрах возбуждающего пучка в экспериментах не ожидается эффективного взаимодействия последовательности сгустков со структурой.

В заключении приведены основные результаты работы:

1. Проведен теоретический анализ возбуждения структуры W-диапазона на основе независимых сгустком заряженных частиц. Показано влияние параметров сгустка и электродинамических характеристик резонаторов на спектр возбуждаемых в резонаторах спектра даны электромагнитных мод. Приведены оценки значения амплитуды наведенного поля в резонаторах при прохождении через них одиночного сгустка заряженных частиц.
2. Показано, что с помощью последовательности сгустков возможно увеличение амплитуды наведенного поля по сравнению с режимом возбуждения одиночным сгустком. Для этих экспериментов необходимо обеспечить подходящее соотношение периода следования сгустков и времени затухания поля в резонаторах.
3. Определены требования к параметрам возбуждающего пучка на основе анализа возбуждения волн в резонаторах структуры. В качестве возможной установки, на котором может быть протестирована структура W-диапазона, рассмотрен стенд линейного ускорителя СКИФ.
4. Разработана схема стенда линейного ускорителя СКИФ, проведен полный цикл моделирования динамики пучка от ВЧ пушки до ускоряющей секции. Параметры пучка на ее выходе удовлетворяют критериям к параметрам возбуждающего пучка для первых возможных экспериментов со структурой W-диапазона.
5. Разработаны конструкторская документация и технология для производства структуры независимых резонаторов W-диапазона.
6. Индивидуальные резонаторы структуры изготовлены, измерены и спаяны в структуру, причем ее характеристики позволяют дальнейшее тестирование на ускорительном стенде.

Для дальнейших разработок в области структур W-диапазона, в том числе для последующих экспериментов с получением высоких ускоряющих градиентов, в ИЯФ СО РАН необходимо создание новых ускорительных установок с лучшими качествами электронных пучков. В качестве будущей такой установки может быть рассмотрен стенд с ультракороткими пучками электронов на основе фотопушки, так как в таком режиме генерации возможно получение пучков с большим зарядом, субпикосекундной длительностью и малым эмиттансом. Для того, чтобы получать максимально

возможные градиенты ускорения в структурах W-диапазона, необходимо реализовать эффективное их возбуждение последовательностью сгустков заряженных частиц. Это будет возможно при наличии возбуждающих пучков лучшего качества, при увеличенной частоте следования сгустков в последовательности и при улучшении свойств самих структур W-диапазона, а именно, при повышении класса точности в изготовлении отдельных резонаторов. При реализации вышеупомянутых условий в ИЯФ СО РАН возможно проведение экспериментов по получению высоких ускоряющих градиентов в структурах, в том числе, для изучения их устойчивости к высокочастотным пробоям.

Публикации автора по теме диссертации

- A1. Development of the millimeter-wave accelerating structure / M. V. Arsentyeva, A. M. Barnyakov, A. E. Levichev, D. A. Nikiforov. – Текст : электронный // Physics of particles and nuclei letters. – 2019. – Vol 16, nr. 6. – P. 885–894. – URL: <https://doi.org/10.1134/S1547477119060037>. – Дата публикации: 24.12.2019.
- A2. Analysis of regular accelerating structures of a linear accelerator for the injector of Siberian photon ring source / K. A. Grishina, A. V. Andrianov, M. V. Arsentyeva [et al.]. – Текст : непосредственный // Physics of particles and nuclei letters. – 2020. – Vol 17, nr. 1. – P. 65–72. – URL: <https://doi.org/10.1134/S1547477120010082>. – Дата публикации: 27.02.2020.
- A3. Arsentyeva, M.V. Analysis of the particle longitudinal motion during the injection process into the disk loaded traveling wave accelerating structure / M. V. Arsentyeva, K. N. Berdnikov, A. E. Levichev. – Текст : электронный // Journal of Instrumentation. – 2020. – Vol. 15, nr. 10. – P. 10015. – URL: <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/15/10/P10015>. – Дата публикации: 16.10.2020.
- A4. Development of 200 MeV linac for the SKIF light source injector / A. Andrianov, M. Arsentyeva, A. Barnyakov [et al.]. – Текст : электронный // Journal of Instrumentation. – 2022. – Vol. 17, nr. 2. – P. T0200. – URL: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/02/T02009>. – Дата публикации: 28.02.2022.
- A5. Beam diagnostics for linear accelerator of SKIF synchrotron light source / M. Xiaochao, Yu. I. Maltseva, O. I. Meshkov [et al.]. – Текст : электронный // Journal of Instrumentation. – 2022. – Vol. 17, nr. 4. – P. T04001. – URL: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/04/T04001>. – Дата публикации: 05.04.22.

- A6. Arsentyeva, M. V. Excitation of the W-band structure of cavities by the charged particle train / M. V. Arsentyeva, A. E. Levichev. – Текст : электронный // Physics of particles and nuclei letters. – 2022. – Vol 19, nr. 4. – P. 306–313. – URL: <https://doi.org/10.1134/S1547477122040069>. – Дата публикации: 26.07.2022.
- A7. Excitation of Millimeter Wavelength Cavity Structure / M. Arsentyeva, A. Barnyakov, A. Levichev, D. Nikiforov. – Текст : электронный // Proceedings of the 29-th Linear Accelerator Conference (Beijing, 16–21 September 2018). – Geneva, 2018. – P. 543–545. – URL: <https://doi.org/10.18429/JACoW-LINAC> (дата обращения: 31.05.2022).
- A8. Arsentyeva, M. V. Simulations of the millimeter wavelength accelerating structure excitation / M. V. Arsentyeva, A. E. Levichev. – Текст : электронный // Journal of physics: conference series. – 2020. – Vol. 1596. – P. 012024. – URL: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1596/1/012024>. – Дата публикации: 18.09.2020.
- A9. 200 MeV linac development for the SKIF light source injector / A. Andrianov, M. Arsentyeva, A. Barnyakov, [et al.]. – Текст : электронный // Proceedings of the 27th Russian Particle Accelerator Conference RuPAC2021 (Alushta, 27 September – 1 October 2021). – Geneva, 2021. P. 68–70. – URL: <https://accelconf.web.cern.ch/rupac2021/papers/wea03.pdf>. – Дата публикации: 15.09.2021.
- A10. Арсентьева, М. В. Разработка структуры резонаторов W-диапазона: специальность 1.3.18 «Физика ускорителей и пучков заряженных частиц» : научно-квалификационная работа аспиранта / Арсентьева Мария Васильевна ; Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера. – Новосибирск, 2022. – 72 с. – Текст : непосредственный.
- A11. Арсентьева, М. В. Исследование возбуждения волн миллиметрового диапазона : специальность 03.04.02 «Физика» : выпускная квалификационная работа (диссертация магистра физики) / Арсентьева Мария Васильевна ; Новосибирский государственный университет. – Новосибирск, 2018. – 54 с. – Текст : непосредственный.

Список литературы

1. Куцаев, С. В. Перспективные технологии для прикладных резонансных ускорителей заряженных частиц и примеры их использования (Обзор) / С. В. Куцаев. – Текст : электронный // Журнал технической физики. – 2021. – Т. 91, вып. 2. – С. 173–206. – URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/50352>. – Дата публикации: 11.10.2020.

2. Heuer, R.-D. The International Linear Collider ILC – a Status Report / R.-D. Heuer. – Текст : электронный // Nuclear Physics B – Proceedings Supplements. – 2006. – Vol. 154, nr 1. – P. 131–136. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2006.01.054>. – Дата публикации: 23.02.2006.
3. Wuensch, W. High-gradient breakdown in normal-conducting RF cavities / W. Wuensch. – Текст : электронный // Proceedings of EPAC 2002. – 2002. – P. 134–138. – URL: <https://accelconf.web.cern.ch/e02/PAPERS/MOYGB003.pdf> (дата обращения: 31.05.2022).
4. Simakov, E. I. Advances in high gradient normal conducting accelerator structures / E. I. Simakov, V. A. Dolgashev, S. G. Tantawi. – Текст : электронный // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2018. – Vol. 907. – P. 221–230. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.02.085>. – Дата публикации: 09.03.2018.
5. Heating of microprotrusions in accelerating structures / A. C. Keser, T. M. Antonsen, G. S. Nusinovich [et al.]. – Текст : электронный // Physical review special topics—accelerators and beams. – 2013. – Vol. 16, nr 9. – P. 092001. – URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.16.092001>. – Дата публикации: 23.09.2013.
6. Kilpatrick, W. D. Criterion for Vacuum Sparking Designed to Include Both rf and dc / W. D. Kilpatrick. – Текст : электронный // Review of Scientific Instruments. – 1957. – Vol. 10, nr 28. – P. 824–826. – URL: <https://doi.org/10.1063/1.1715731> (дата обращения: 30.05.2022).
7. Wang, J. W. Field emission and RF breakdown in high gradient room temperature linac structures / J. W. Wang, G. A. Loew. – Текст : электронный // SLAC report. – 1997. – SLAC-PUB-7684. – URL: <https://www.slac.stanford.edu/pubs/slacpubs/7500/slac-pub-7684.pdf> (дата обращения: 30.05.2022).
8. Ferrario, M. Advanced Accelerator Concepts / M. Ferrario, R. Assmann. – Текст : электронный // Proceedings of the CERN–Accelerator–School: Introduction to Accelerator Physics. – 2019. – URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.10843> (дата обращения: 30.05.2022).
9. Accelerating structure of a colliding linear electron-positron beam (VLEPP). Investigation of the maximum attainable acceleration rate / V. E. Balakin, O. N. Brezhnev, A. V. Novokhatsky, Yu. I. Semenov. – Текст : электронный // SLAC report. – 1978. – SLAC-TRANS-0187.

- URL: <https://inspirehep.net/literature/132627> (дата обращения: 30.05.2022).
10. Millimeter-Wave Structures and Power Sources / P. J. Chou, G. B. Bowden, M. R. Copeland, H. Henke. – Текст : электронный // Proceedings of the 1997 Particle Accelerator Conference (Vancouver, Canada, 1998). – 1998. – P. 464–466. – URL: <https://inspirehep.net/literature/469720> (дата обращения: 30.05.2022).
 11. Fabrication of microstructures with high aspect ratios and great structural heights by synchrotron radiation lithography, galvanofarming, and plastic moulding (LIGA process) / E.W. Becker, W. Ehrfeld, P. Hagmann [et al.]. – Текст : электронный // Microelectronic Engineering. – 1986. – Vol. 4, nr 1. – P. 35–36. – URL: [https://doi.org/10.1016/0167-9317\(86\)90004-3](https://doi.org/10.1016/0167-9317(86)90004-3) (дата обращения: 30.05.2022).
 12. dal Forno, M. High gradient tests of metallic mm-wave accelerating structures / M. dal Forno, V. Dolgashev, G. Bowden [et al.]. – Текст : электронный // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. – 2017. – Vol. 864. – P. 12–28. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.05.014>. – Дата публикации: 21.08.2017.
 13. Test of accelerating section for VEPP 5 pre injector / M. S. Avilov, V. E. Akimov, A. V. Aleksandrov [et al.] – Текст : электронный // XX International Linac Conference (Monterey, 21–25 August 2000). – 2000. – P. 428–430. – URL: <https://accelconf.web.cern.ch/l00/papers/TUA21.pdf> (дата обращения: 31.05.2022).
 14. Авдыев, М. А. Ускоряющая секция ВЛЭПП на 14 ГГц / М. А. Авдыев, В. Е. Балакин, В. А. Долгашев. – Текст : электронный // Препринт ИЯФ. – 1993. – URL: https://www.inp.nsk.su/images/preprint/1993_007.pdf (дата обращения: 30.05.2022).
 15. CST Studio Suite electromagnetic field simulation software : [сайт]. – URL: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/> (дата обращения: 30.05.2022). – Яз. англ. – Текст : электронный.
 16. ASTRA – A Space Charge Tracking Algorithm : [сайт]. – URL: <https://www.desy.de/mrpyfo/> (дата обращения: 30.05.2022). – Яз. англ. – Текст : электронный.

Арсентьева Мария Васильевна

Разработка структуры резонаторов W-диапазона

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор 30.09.2022.
Подписано в печать 04.10.2022.
Формат бумаги 60×90 1/16. Объем 1.0 печ.л., 0.8 уч.-изд.л
Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ №8
Обработано на РС и отпечатано
на ротационном ИЯФ СО РАН
630090, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 11