

ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ТЕСТИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ РЕЗОНАТОРОВ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

*М. В. Арсентьева^{а, б, в, 1}, А. Е. Левичев^{а, б, в}, Е. В. Лидер^а,
О. И. Мешков^{а, в}, Д. А. Никифоров^{а, б}*

^а Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

^б Центр коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов»
Института катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Кольцово, Россия

^в Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

В Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера продолжается разработка ускоряющих структур миллиметрового диапазона длин волн, также называемых миллиметровыми структурами. Дано подробное описание дизайна структуры миллиметрового диапазона, состоящей из отдельных резонаторов с рабочей частотой около 85 ГГц. Приводится описание технологических особенностей производства такой структуры от этапа изготовления резонаторов до пайки. Представлены результаты первого эксперимента по проведению ускоренного электронного пучка через миллиметровую структуру, реализованного на стенде линейного ускорителя инжектора СКИФ. Полученные результаты отражают функциональность миллиметровой структуры разработанного дизайна для дальнейших экспериментов с пучками заряженных частиц.

Development of the millimeter wavelength accelerating structures, also called millimeter structures, is under progress at the Budker Institute of Nuclear Physics. The paper provides a detailed description of the design of a millimeter wavelength structure consisting of individual resonators with an operating frequency of about 85 GHz. A description of the production technological features of such a structure from the stage of cavity manufacturing up to soldering is given. Presented are the results of the first experiment with an accelerated electron beam through this millimeter structure, implemented on the SKIF linear accelerator injector stand. The obtained results demonstrate the functionality of the millimeter structure of this design for the further experiments with charged particle beams.

PACS: 29.27.—a

ВВЕДЕНИЕ

Неотъемлемой частью любого линейного ускорителя пучков заряженных частиц являются ускоряющие структуры, при пролете через которые эти пучки набирают энергию. Одним из ключевых параметров любой ускоряющей структуры является темп ускорения — энергия, приобретаемая заряженными частицами на единицу длины при движении в электрическом поле. Повышение темпа ускорения является одной

¹E-mail: M.V.Arsentyeva@inp.nsk.su

из приоритетных задач, поскольку не всегда представляется возможным повышать энергию заряженных частиц путем увеличения длины ускорителей. Особый интерес приобретают ускоряющие структуры, в которых будет возможно получать более высокие темпы ускорения, что позволит повысить энергию пучков заряженных частиц при сохранении (или даже уменьшении) длины линейного ускорителя.

В работе резонансных линейных ускорителей существенным препятствием в получении высоких темпов ускорения является возникновение сверхвысокочастотных (СВЧ) пробоев в структурах при достижении определенного уровня входной мощности. Имеется несколько теорий механизма возникновения. Согласно одной из гипотез пробой могут быть следствием перегрева поверхности металла под действием поверхностных токов [1]. По данным других исследований [2, 3] пробой могут быть вызваны перегревом микровыступов на поверхности металла, что, в свою очередь, приводит к значительному росту электрического поля в этой области и появлению темновых токов. Также существует предположение о возникновении пробоев из-за приповерхностных пустот в металле [4]. Согласно этой гипотезе растягивающее напряжение, оказываемое на металлическую поверхность с некоторой полостью вблизи поверхности, может вызвать массоперенос в объеме металла, который затем приводит к росту микровыступов и усилению поля вблизи них. Несмотря на то, что нет общепринятой теории о природе СВЧ-пробоев, проведенные исследования отражают общую тенденцию к увеличению предельной амплитуды электрического поля с ростом рабочей частоты электромагнитных колебаний. Таким образом, одним из способов повысить максимальный темп ускорения является использование структур с более высокой рабочей частотой: так, если для стабильно работающих сейчас структур S-диапазона (2–4 ГГц) и C-диапазона (4–8 ГГц) характерные амплитуды поля составляют десятки МВ/м, то для структур W-диапазона в отдельных экспериментах получены амплитуды электрического поля 300–400 МВ/м [5].

Для возбуждения электромагнитных колебаний в структурах миллиметрового диапазона могут быть использованы как внешние источники питания [6], так и пучки заряженных частиц [5]. Каждый из этих способов обладает как своими преимуществами, так и недостатками. Так, при использовании внешних генераторов СВЧ-мощности получаемые амплитуды поля достигают больших значений, и нет необходимости в контроле динамики возбуждающего пучка при пролете через структуру. Однако на сами источники СВЧ-мощности накладываются жесткие требования к стабильности частоты, а в возбуждаемой структуре должны быть предусмотрены СВЧ-вводы. В случае возбуждения пучком заряженных частиц таких требований не возникает, но необходимо контролировать поперечную динамику возбуждающего пучка при его проведении через структуру. Важным преимуществом выбора такого способа возбуждения является возможность единовременной проверки жесткости разработанной структуры и, как следствие, соосности ее отдельных резонаторов.

Предлагаемая в данной работе конструкция миллиметровой структуры предполагает индивидуальное изготовление медных ячеек с резонаторными полостями, которые затем при помощи пайки собираются в единую структуру. Такой способ изготовления, в отличие от использованной в других экспериментах технологии LIGA [5], допускает контроль размеров выполненных ячеек по отдельности. Это позволяет провести анализ влияния отклонения реальных параметров резонаторов от проектных значений на взаимодействие структуры с пучками заряженных частиц [7].

Первый прототип структуры независимых резонаторов W-диапазона был изготовлен в ИЯФ СО РАН в 2018 г. [8]. Стоит отметить, что он изначально не предполагался для дальнейшей работы с ускоренным пучком: конструкция не предусматривала наличие вакуумных фланцев с целью использования в реальном эксперименте. Также не были подробно исследованы отдельные ячейки резонаторов после изготовления, а именно их геометрические параметры и качество поверхности. При изготовлении первого прототипа стояла задача начать отрабатывать технологии по производству отдельных ячеек, которые ранее не были задействованы в ИЯФ СО РАН. Помимо изготовления отдельных ячеек, также было необходимо разработать технологию пайки и изучить свойства паяного изделия. Отдельные резонаторы были успешно изготовлены, однако паяная структура не обладала нужной жесткостью. Это привело к искривлению ее оси в процессе пайки, нарушению соосности отдельных резонаторов и, как следствие, невозможности тестирования первого прототипа структуры с ускоренным пучком.

Таким образом, была поставлена задача разработать следующий прототип миллиметровой структуры, параметры которого будут допускать его тестирование на ускорительном стенде. В данной статье описываются технологические особенности производства такой миллиметровой структуры, резонаторы которой изготавливаются независимо. Приводятся результаты измерений геометрических параметров отдельных ячеек перед их дальнейшей сборкой. Также показаны результаты первых экспериментов по проведению электронного пучка через миллиметровую структуру на действующей ускорительной установке.

КОНСТРУКЦИЯ МИЛЛИМЕТРОВОЙ СТРУКТУРЫ

Конструкция структуры предполагает ее сборку в несколько этапов, причем полное изделие состоит из двух идентичных половин, одна из которых представлена на рис. 1. При изготовлении каждой из них в первую очередь производится пайка

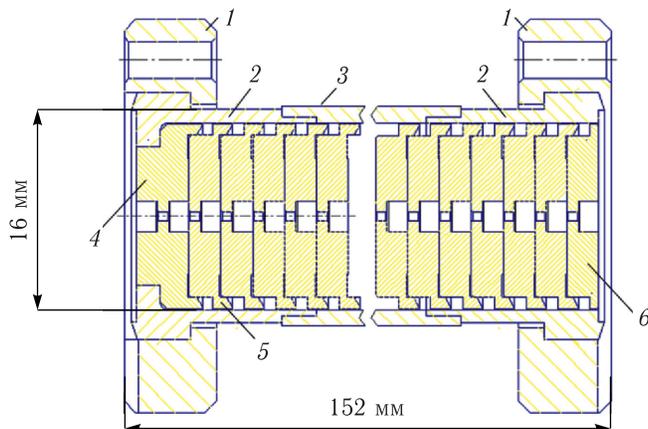


Рис. 1. Эскиз сборки миллиметровой структуры: 1 — накидные фланцы; 2 — опорные фланцы; 3 — труба из нержавеющей стали; 4 — двойная боковая ячейка; 5 — регулярная ячейка; 6 — одинарная боковая ячейка

44 ячеек, из которых 42 ячейки являются одинаковыми (регулярными), а две другие отличаются (боковые ячейки). Для сборки внешнего корпуса к опорным фланцам из нержавеющей стали приваривается труба из того же материала с внутренним диаметром 16,6 мм, по краям которой дополнительно расточены углубления (до 17,2 мм) для вставки опорных фланцев. Использование корпуса такой конфигурации обеспечивает структуре дополнительную жесткость при проведении экспериментов с ней на ускорительном стенде. Паяная структура вставляется в трубу с правого конца, а накидные фланцы надеваются на опорные, после чего две половины соединяются по типу ConFlat.

Отличительной чертой описываемой структуры является ее способ изготовления. Все резонаторы изготавливаются независимо, что позволяет провести их индивидуальный измерительный контроль, в результате которого часть ячеек отбраковывается, а остальные собираются в структуру для последующей пайки.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЯЧЕЕК СТРУКТУРЫ

Разработан дизайн ячеек резонаторов трех типов: регулярная чашка (рис. 2) и два типа боковых чашек. Первый тип боковой чашки (рис. 3) представляет собой двоянную ячейку (т.е. включает в себя две резонаторных полости), второй тип боковой чашки имеет одну резонаторную полость (рис. 4). Конструкция чашек учитывает

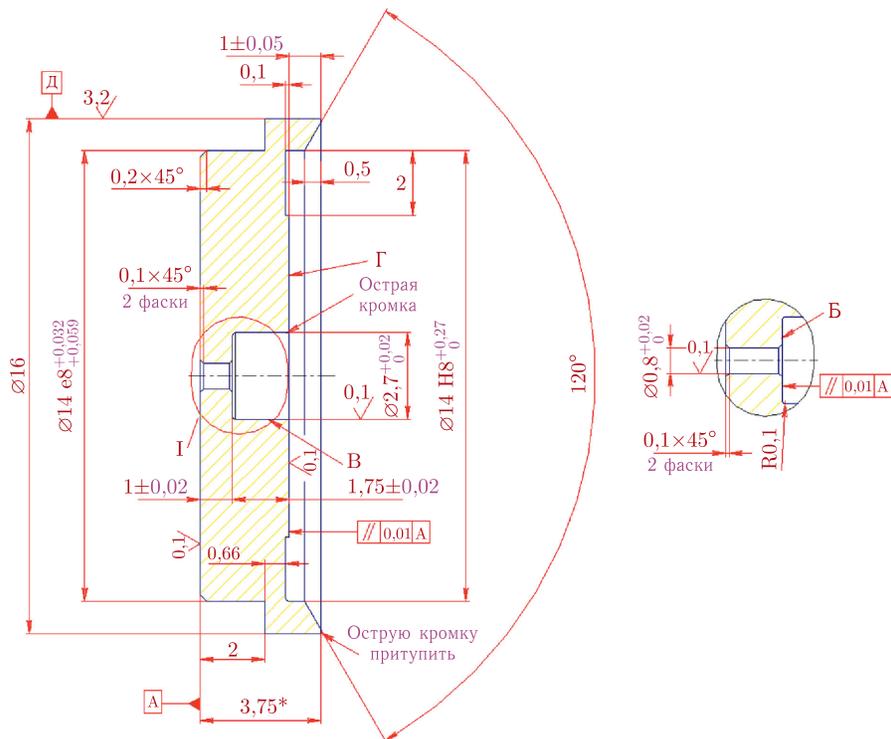


Рис. 2. Регулярная ячейка структуры

направление распространения припоя при его плавлении: в процессе пайки в вертикальном положении структуры боковая сдвоенная чашка является нижней, одинарная боковая чашка — верхней. Дизайн боковых чашек также учитывает дальнейшую сборку паяной структуры с фланцами без задействования пайки.

Геометрические размеры резонаторов подобраны для соответствия собственной частоте 85 ГГц. При изготовлении резонаторов сначала проводится первичная токарная обработка, в ходе которой обеспечиваются внешние размеры цилиндрических заготовок. На втором этапе производства для получения центрального отверстия (0,8 мм) в ячейках используется сверло соответствующего диаметра, а резонаторная полость также вытачивается. Было изготовлено два набора ячеек с одним отличием в процессе производства: в первой партии перед вторым этапом был проведен рекристаллизационный отжиг цилиндрических заготовок, а во второй партии отжиг проведен не был. Такой шаг был предпринят как с целью определения влияния этапа отжига на параметры ячеек, так и для оценки необходимости отжига в целом с точки зрения качества последующей сборки полной миллиметровой структуры.

На рис. 5 изображены отдельные резонаторы структуры, изготовленные по описанной выше технологии.



Рис. 5. Изготовленные регулярные ячейки структуры

Безусловно, корректность изготовления ячеек важна с точки зрения всех геометрических параметров, указанных на рис. 2–4, однако для дальнейшей работы с ускоренным пучком на установке несколько геометрических параметров резонаторов представляют наибольший интерес. К таким параметрам можно отнести диаметр центрального отверстия, неконцентричность этого отверстия по базе D , непараллельность поверхностей A и Γ . При изготовлении центральной апертуры 0,8 мм возможны отклонения как в большую, так и в меньшую сторону. В первом случае ошибки изготовления влекут появление большей связи между соседними резонаторами, однако при ошибке даже порядка 20 мкм связь увеличивается не более, чем на 3%. В том случае, если центральное отверстие изготовлено с ошибкой в меньшую сторону, это может привести к потерям частиц возбуждающего пучка при его прохождении. Неконцентричность центральной апертуры ячеек относительно их внешнего диаметра влечет уменьшение общей апертуры структуры, а этим параметром ограничивается максимально возможный диаметр пучка, который можно пропустить через такую структуру, и как следствие, его заряд. Для сборки и пайки ячеек, их соосности в структуре и ее вакуумной герметичности наряду с непараллельностью поверхностей важен параметр неплоскостности боковых поверхностей A и Γ . С точки зрения

спектра возбуждаемых пучком электромагнитных колебаний важно выдерживание внутреннего диаметра резонаторов, что понадобится в будущем для последующих экспериментов. Для контроля геометрических размеров изготовленных ячеек использовалась координатно-измерительная машина (КИМ) Zeiss Contura [9]. Погрешность измерения такого прибора определяется выражением

$$\Delta = 1,9 + L/300 \text{ [мкм]},$$

где L — характерный размер тестового образца в мм. Соосность центрального отверстия, внутреннего диаметра и внешнего диаметра резонаторов определялась также с помощью КИМ при той же погрешности измерений. Исходя из характерных размеров отдельных ячеек погрешность в проведенных измерениях составляет около 2 мкм. Статистические характеристики упомянутых параметров приведены в табл. 1 для двух изготовленных наборов ячеек.

Существенных различий в измеренных параметрах двух наборов ячеек не имеется, разница по величине близка к погрешности измерения. Небольшое отличие наблюдается в параметре неплоскостности боковых поверхностей, однако такое различие ожидаемо: вследствие отжига медь становится мягче, и в ходе сверления и токарной обработки продавливается под действием инструментов. Тем не менее данный аспект не повлиял на вакуумную герметичность паяных структур из обоих наборов.

Сборка резонаторов в структуру с закладкой припоя проводится поэтапно: в каждую ячейку закладывается кольцо из припоя толщиной 0,8 мм и внутренним диаметром 14 мм таким образом, чтобы при пайке в вертикальном состоянии припой распространялся вглубь ячеек, заполняя цилиндрическую канавку, но не затекая в резонаторную полость (рис. 6). Далее сверху располагается следующая ячейка, в которую по этой же схеме закладывается то же количество припоя. Такое расположение припоя и его количество подобраны из следующих соображений: необходимо, с одной сторо-

Таблица 1. Статистические характеристики измеренных геометрических размеров резонаторных ячеек

Параметр	С отжигом		Без отжига	
	Среднее значение, мм	Отклонение RMS, мм	Среднее значение, мм	Отклонение RMS, мм
Диаметр центрального отверстия, мм	0,806	0,005	0,798	0,003
Неконцентричность центрального отверстия относительно внешнего диаметра	0,019	0,010	0,013	0,006
Внутренний диаметр резонаторов, мм	2,718	0,003	2,714	0,006
Непараллельность поверхностей А и Г	0,008	0,002	0,005	0,003
Неплоскостность поверхностей А и Г	0,009	0,002	0,005	0,002



Рис. 6. Отдельные ячейки структуры перед пайкой, стрелкой показано место расположения припоя в одной из ячеек

ны, чтобы излишний припой не затекал внутрь резонаторных полостей, а с другой стороны, должна быть обеспечена вакуумная герметичность структуры.

В процессе пайки для поддержания жесткости структуры используется внешняя графитовая оснастка, при которой ячейки жестко фиксируются в течение всего процесса пайки, что обеспечивает их соосность.

На следующем этапе сборки паяная структура вставляется в трубу из нержавеющей стали, к которой приварены фланцы. Таким образом, в разработанной схеме сборки и изготовления не производится пайка фланцев и внешней трубы с уже спаянными резонаторами, что является важным преимуществом. Отсутствие пайки элементов из разных материалов — нержавеющей стали и меди — позволяет не учитывать их различные свойства при нагреве, в частности, тепловое расширение. На рис. 7 показана одна из двух паяных миллиметровых структур, состоящая из 42 регулярных ячеек и 2 боковых ячеек (не до конца вставленных в оснастку из нержавеющей стали), и второй комплект элементов оснастки.

На рис. 8 показан масс-спектр собранной миллиметровой структуры после двух суток откачивания при помощи магниторазрядного насоса в лабораторных условиях.



Рис. 7. Паяная миллиметровая структура, состоящая из 42 регулярных ячеек и 2 боковых ячеек, и второй комплект оснастки из нержавеющей стали

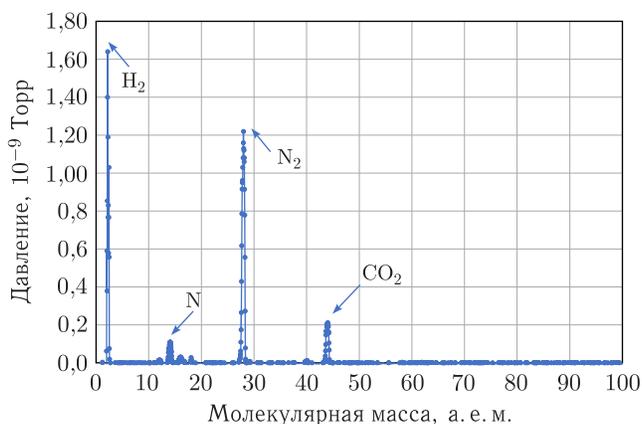


Рис. 8. Масс-спектр структуры резонаторов спустя 2 сут после откачки магниторазрядным насосом

На протяжении дальнейшего процесса откачивания спектр оставался неизменным. Согласно этому спектру в структуре присутствуют наиболее распространенные газы, такие как водород, атомарный азот, молекулярный азот и углекислый газ, однако их количество незначительно. Это говорит о достаточной вакуумной герметичности структуры для ее дальнейшего тестирования в ускорителе с пучком.

ЭКСПЕРИМЕНТ СО СТРУКТУРОЙ НА СТЕНДЕ СКИФ

Для экспериментов по проведению электронного пучка через миллиметровую структуру был выбран стенд линейного ускорителя инжектора СКИФ [10], на котором получены параметры электронного пучка, приведенные в табл. 2.

Электронный пучок с параметрами, указанными в табл. 2, не является в полной мере оптимальным с точки зрения возбуждения максимально возможных амплитуд поля в миллиметровой структуре. Так, значение поперечного эмиттанса достаточно велико, и при энергии 35 МэВ невозможно согласовать весь пучок со входом структуры, удерживая его сфокусированным на всей длине без применения фокусирующей системы на всей длине миллиметровой структуры [8]. Другими словами, значимая часть пучка потеряется на входе структуры и внутри нее. Тем не менее с таким пучком возможно протестировать работоспособность описываемой миллиметровой структуры в нескольких аспектах. Прежде всего важно проверить ее вакуумные свойства

Таблица 2. Параметры электронного пучка для возбуждения миллиметровой структуры

Параметр	Значение
Энергия, МэВ	35
RMS относительный энергетический разброс, %	1
Длительность (ПШПВ), пс	20
Поперечный эмиттанс, мм · мрад	40
Заряд сгустка, нКл	0,2

в сборке на действующей установке. Внутренняя апертура миллиметровой структуры достаточно мала (0,8 мм), к тому же имеются зазоры между ячейками и внешней трубой (см. рис. 1). Это является потенциальным источником виртуальной течи [11] и может привести к существенному увеличению времени откачки, а также к трудностям с получением необходимого уровня вакуума для работы с пучком. Помимо проверки вакуумных свойств, необходимо убедиться в общей состоятельности разработанной структуры: если жесткость конструкции (см. рис. 1) будет недостаточна, это приведет к значительному нарушению соосности отдельных ячеек, что, в свою очередь, сделает невозможным проведение пучка.

Таким образом, в рамках работы на действующем линейном ускорителе успешное проведение пучка через миллиметровую структуру будет свидетельствовать как о ее достаточных вакуумных характеристиках, так и о ее конструктивных качествах (жесткость, соосность ячеек). Помимо этого, представляет интерес определение условий для наилучшего согласования пучка с апертурой миллиметровой структуры при помощи магнитной системы, описание которой приводится ниже.

На рис. 9 показана схема эксперимента с миллиметровой структурой на стенде линейного ускорителя инжектора СКИФ [10, 12]. Электронный пучок набирает в ускоряющей структуре с частотой 2856 МГц [13] энергию в несколько десятков мегаэлектронвольт, а для его последующего согласования со входом миллиметровой структуры возможно использование двух дипольных двухкоординатных корректоров и триплета квадрупольных линз, параметры которых приведены в табл. 3 [14]. Такая конфигурация магнитной системы является штатной для стенда линейного ускорителя СКИФ, и было предложено использовать ее для экспериментов по проведению пучка через миллиметровую структуру.

Вход миллиметровой структуры расположен внутри третьей квадрупольной линзы. После миллиметровой структуры пучок попадает на люминофорный датчик [15], где определяются его положение и размер, и продолжает движение до цилиндра Фарадея, с помощью которого определяется заряд прошедшего пучка. Люминофорный датчик расположен на расстоянии 350 мм от конца миллиметровой структуры. Датчик

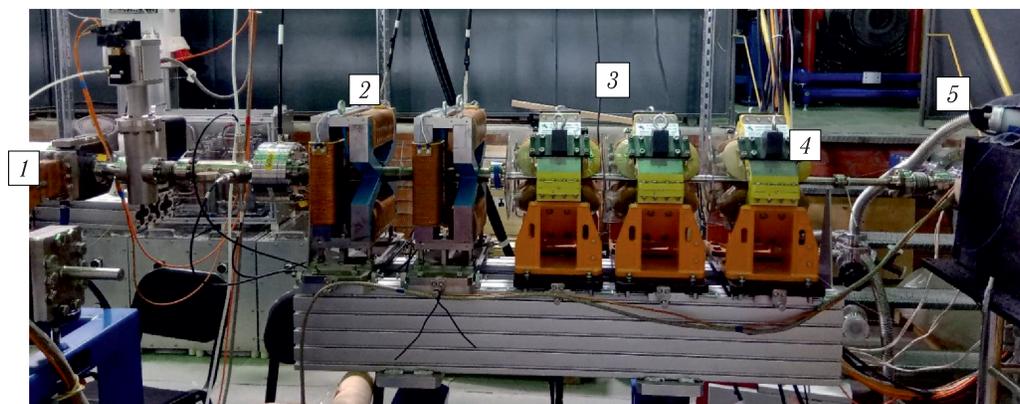


Рис. 9. Миллиметровая структура на стенде линейного ускорителя: 1 — ускоряющая структура 2856 МГц; 2 — двухкоординатные дипольные корректоры; 3 — квадрупольные линзы; 4 — миллиметровая структура; 5 — люминофорный датчик (на фото закрыт защитным экраном)

Таблица 3. Параметры магнитных линз

Дипольный корректор		Квадрупольная линза	
Параметр	Значение	Параметр	Значение
Ток максимальный, А	3,75	Ток максимальный, А	6
Максимальная индукция магнитного поля в центре, Гс	495	Максимальный градиент индукции магнитного поля в центре, Тл/м	6
Максимальный интеграл магнитного поля, Тл · мм	4,69	Интеграл градиента в центре линзы, Тл	0,62
Эффективная длина, мм	94	Эффективная длина, мм	115

находится внутри крестовидной вакуумной камеры, на одном из патрубков которой установлен магниторазрядный насос. Этот насос является ближайшим к миллиметровой структуре; согласно его показаниям после установки миллиметровой структуры на стенд линейного ускорителя необходимый для дальнейшей работы уровень вакуума 10^{-8} Торр был достигнут спустя 5 сут. Заметим, что в варианте сборки линейного ускорителя до установки миллиметровой структуры наблюдался уровень вакуума того же порядка. Ранее при этих условиях на описываемом стенде линейного ускорителя были проведены успешные работы по ускорению электронного пучка [10]. Таким образом, при установке миллиметровой структуры на действующем ускорителе со своей распределенной вакуумной системой была показана возможность получения необходимого уровня вакуума.

Как упоминалось выше, провести полный пучок с параметрами согласно табл. 2 через всю длину миллиметровой структуры не представляется возможным; тем не менее имеет смысл получить предварительную оценку токопрохождения, которого можно добиться со штатной магнитной системой стенда линейного ускорителя. С этой целью было проведено моделирование динамики электронного пучка, начиная от высокочастотной пушки [16].

Жесткости квадрупольных линз были оптимизированы для наилучшего токопрохождения через миллиметровую структуру, при моделировании с помощью кода ASTRA [17] подобраны следующие значения градиентов: 3,16, 5,7, 3,7 Тл/м. На выходе регулярной ускоряющей структуры 2856 Мц электронный пучок имеет заряд 0,2 нКл, энергию 35 МэВ и нормализованный эмиттанс 18 мм · мрад. Соответствующая огибающая пучка приведена на рис. 10 от выхода регулярной ускоряющей структуры 2856 МГц до конца миллиметровой структуры. Наибольшие потери частиц наблюдаются на входе в миллиметровую структуру, после чего еще доля частиц теряется внутри, а итоговая доля прошедших частиц составляет 26%. Отметим, что при энергии электронного пучка 35 МэВ наибольший вклад в поперечную динамику вносит расталкивание, обусловленное конечным эмиттансом, в то время как силами пространственного заряда можно пренебречь [18]. Поэтому полученное в моделировании значение токопрохождения может быть использовано в качестве оценки ожидаемого в эксперименте при условии получения эмиттанса не хуже смоделированного значения 18 мм · мрад.

В эксперименте на стенде линейного ускорителя наилучшее токопрохождение электронного пучка получено при следующих градиентах полей квадрупольных линз: 2,9, 4,8, 2,6 Тл/м. При этом для настройки траектории пучка перед квадрупольными

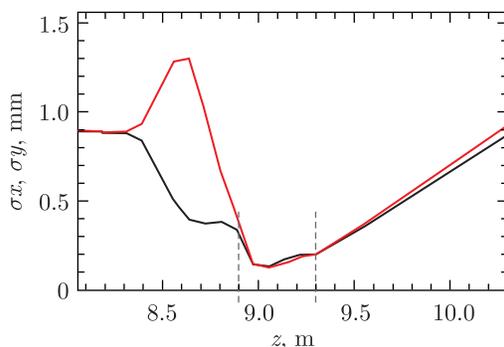


Рис. 10. Огибающая электронного пучка в поперечных направлениях при его прохождении через триплет квадруполов и миллиметровую структуру, штриховыми линиями показаны начало и конец миллиметровой структуры

была использована только горизонтальная коррекция во втором дипольном магните при индукции магнитного поля 120 Гс. Согласно измерениям поперечного профиля пучка на люминофорном экране (рис. 11) его поперечный диаметр составляет около 2 мм (ширина на полувысоте). Заряд проведенного пучка определен при помощи цилиндра Фарадея и по калибровке полученного сигнала (рис. 12) составил 30 пКл, что соответствует доле 15% от начального заряда пучка.

Заметим, что измеренное в эксперименте значение нормализованного эмиттанса более чем в два раза превышает значение, полученное в результате моделирования, что может быть связано с особенностями катодно-сеточного узла электронной пушки [16]. В этой связи измеренное токопрохождение при проведении пучка через миллиметровую структуру меньше смоделированной величины: в эксперименте получено значение 15% против смоделированного значения 26%. Несмотря на такое различие, оно ожидаемо и допустимо при такой разнице в значениях эмиттанса пучка в моделировании и в эксперименте. Таким образом, полученный результат является свидетельством работоспособности миллиметровой структуры в эксперименте на действующем линейном ускорителе.

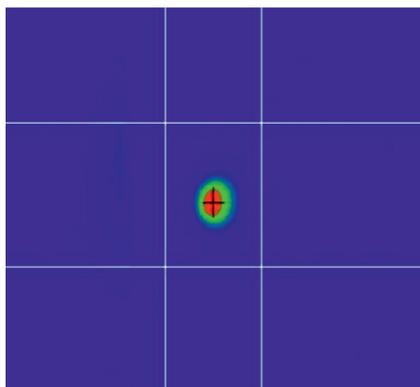


Рис. 11. Изображение пучка после прохождения миллиметровой структуры

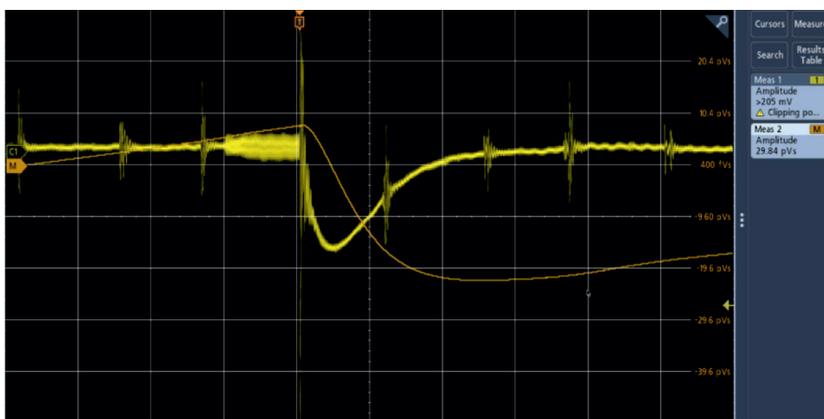


Рис. 12. Сигнал с цилиндра Фарадея с измеренным зарядом прошедшего пучка 30 пКл

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ИЯФ СО РАН продолжается разработка ускоряющих структур миллиметрового диапазона длин волн. Разработана структура, дизайн которой предполагает индивидуальное изготовление резонаторных ячеек и их последующую сборку в единую структуру при помощи пайки. Такой способ изготовления обладает важным преимуществом, а именно, позволяет проводить измерения геометрических параметров ячеек по отдельности для их дальнейшей сортировки перед сборкой и пайкой. Разработана технология сборки и пайки структуры, достигнута необходимая жесткость структуры как целого. Изготовленная структура вместе с оснасткой и фланцами, необходимыми для ее установки на действующем ускорителе, обладают вакуумной герметичностью.

После установки миллиметровой структуры на стенде линейного ускорителя со своей распределенной вакуумной системой был достигнут необходимый уровень вакуума, при котором молекулы остаточного газа не препятствуют проведению пучка через миллиметровую структуру. Это сделало возможным реализацию первого эксперимента по проведению пучка заряженных частиц через разработанную миллиметровую структуру. Измерен заряд прошедшего пучка, причем полученные данные согласуются с предварительными оценками из моделирования.

Таким образом, в ИЯФ СО РАН была изготовлена миллиметровая структура на основе индивидуальных резонаторов, а в рамках первых экспериментов с электронным пучком на стенде линейного ускорителя продемонстрирована ее работоспособность.

Работа частично выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания ЦКП «СКИФ» Института катализа СО РАН (FWUR-2025-0004).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Grudiev A., Calatroni S., Wuensch W.* New Local Field Quantity Describing the High Gradient Limit of Accelerating Structures // *Phys. Rev. ST. Accel. Beams.* 2009. V.12. P.102001.

2. *Nusinovich G., Kashyn D., Antonsen T. M., Jr.* Possible Role of Melted Microparticles on the Operation of High-Gradient Accelerating Structures // *Phys. Rev. ST. Accel. Beams.* 2009. V. 12. P. 101001.
3. *Keser A. C., Antonsen T. M., Nusinovich G. S., Kashyn D. G., Jensen K. L.* Heating of Microprotrusions in Accelerating Structures // *Phys. Rev. ST. Accel. Beams.* 2013. V. 16. P. 092001.
4. *Pohjonen A. S., Djurabekova F., Nordlund K., Kuronen A., Fitzgerald S. P.* Dislocation Nucleation from Near Surface Void under Static Tensile Stress on Surface in Cu // *J. Appl. Phys.* 2011. V. 110. P. 023509.
5. *Dal Forno M., Dolgashev V., Bowden G., Clarke C., Hogan M., McCormick D., Novokhatski A., O'Shea B., Spataro B. et al.* High Gradient Tests of Metallic mm-Wave Accelerating Structures // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2017. V. 864. P. 12.
6. *Othman M. A. K., Picard J., Schaub S., Dolgashev V. A., Lewis S. M., Neilson J., Haase A., Jawla S., Spataro B. et al.* Experimental Demonstration of Externally Driven Millimeter-Wave Particle Accelerator Structure // *Appl. Phys. Lett.* 2020. V. 117. P. 073502.
7. *Arsentyeva M. V., Levichev A. E.* Excitation of the W-band Structure of Cavities by the Charged Particle Train // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2022. V. 19. P. 384.
8. *Arsentyeva M. V., Barnyakov A. M., Levichev A. E., Nikiforov D. A.* Development of the Millimeter-Wave Accelerating Structure // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2019. V. 16. P. 885.
9. <https://www.zeiss.com/metrology/products/systems/coordinate-measuring-machines>
10. *Arsentyeva M. V., Levichev A. E., Batrakov A. M., Volkov V. N., Ma X. C., Meshkov O. I., Nikiforov D. A., Pavlenko A. V., Barnyakov A. M. et al.* Results of Operation of the Test Accelerator Facility for the SKIF Linear Accelerator // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2024. V. 21. P. 271.
11. ГОСТ Р 59286-2020. Контроль неразрушающий. Течеискание. Термины и определения.
12. *Andrianov A., Arsentyeva M., Barnyakov A., Chekmenev D., Levichev A., Meshkov O., Nikiforov D., Pavlov O., Pivovarov I. et al.* Development of 200 MeV Linac for the SKIF Light Source Injector // *J. Instrum.* 2022. V. 17. P. T02009.
13. *Levichev A., Grishina K., Samoilo S., Arsentieva M., Chekmenev D., Xiaochao M., Meshkov O., Pivovarov I., Nikiforov D. et al.* Results of Manufacturing and Operation of the First Accelerating Structures for the Linear Accelerator of the SKIF Injector Based on a Disk-Loaded Waveguide // *J. Instrum.* 2023. V. 18. P. T07001.
14. *Павлюченко В. А., Никифоров Д. А., Старостенко А. А., Жилев К. В., Молокоедов А. М., Пахомов А. Ю., Субаев Е. А., Чекмев Д. И., Ческидов В. Г.* Статус магнитных элементов инжектора SKIF // *Сиб. физ. журн.* 2024. Т. 19, № 1. С. 43–53.
15. *Xiaochao M., Maltseva Yu. I., Meshkov O. I., Arsentyeva M. V., Bekhtenev E. V., Cheskidov V. G., Borin V. M., Karpov G. N., Nikiforov D. A. et al.* Beam Diagnostics for Linear Accelerator of SKIF Synchrotron Light Source // *J. Instrum.* 2022. V. 17. P. T04001.
16. *Волков В. Н., Арсентьева М. В., Барняков А. М., Батраков А. М., Бехтенов Е. А., Васильева Н. Г., Гулов С. М., Карнаев С. Е., Кондаков А. А. и др.* Термокатодная высокочастотная пушка и группирующий резонатор для инжектора синхротрона SKIF // *ЖТФ.* 2024. Т. 94. С. 924.
17. ASTRA — A Space Charge Tracking Algorithm. <https://www.desy.de/mpyflo/>.
18. *Reiser M.* Theory and Design of Charged Particle Beams. New York: John Wiley and Sons, Inc., 2008. P. 193.

Получено 6 декабря 2024 г.