

На правах рукописи



Ситников Алексей Леонидович

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ФОРМИРОВАТЕЛЬ
КВАЗИТРУБЧАТОГО ПУЧКА ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2013.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Государственном научном центре Российской Федерации – Институте теоретической и экспериментальной физики» (ФГБУ «ГНЦ РФ – ИТЭФ»).

Научные руководители:

доктор физико-математических наук, Голубев Александр Александрович

кандидат технических наук, Минаев Сергей Александрович

Официальные оппоненты:

Парамонов Валентин Витальевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Институт ядерных исследований Российской Академии Наук", ведущий научный сотрудник, отдел ускорительного комплекса

Лалаян Михаил Владимирович, кандидат технических наук, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», доцент, кафедра «Электрофизические установки»

Ведущая организация:

Открытое акционерное общество "Московский радиотехнический институт Российской Академии Наук"

Защита состоится "04" декабря 2013 г. в 14.30 на заседании диссертационного совета Д 212.130.01 в аудитории К-608 НИЯУ МИФИ по адресу: г. Москва, Каширское шоссе, д. 31,

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

Просим принять участие в работе диссертационного совета или прислать отзыв в двух экземплярах, заверенный печатью организации.

Автореферат разослан "01" ноября 2013г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Щедрин И.С.

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Исследование экстремального состояния вещества является одной из наиболее интересных и трудоемких задач современной физики. Во-первых, исследование плазмы с сильным межчастичным взаимодействием расширяет фундаментальное представление о веществе. Во-вторых, интерес к сверхплотному состоянию вещества обусловлен рядом современных проблем планетарной геофизики, таких как определение параметров экзопланет и планет солнечной системы. Ключевой задачей данных экспериментов является генерация в лабораторных условиях состояний вещества с точно измеряемыми термодинамическими параметрами. И, наконец, актуальность работы определяется чрезвычайно важными прикладными задачами, такими как управляемый термоядерный синтез (УТС), безопасность ядерных реакторов, синтез сверхпрочных материалов и др.

Эксперименты по генерации экстремального состояния вещества с помощью пучков заряженных частиц в настоящее время проводятся в Институте теоретической и экспериментальной физики (ИТЭФ), в рамках проекта ИТЭФ-ТВН (ТерраВаттный Накопитель) (Россия), и будут проводиться в рамках проекта FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) [9-11].

В рамках проекта FAIR предполагается проведение экспериментов по физике высокой плотности энергии в веществе в рамках коллаборации HEDgeNOB. Одним из экспериментов в рамках коллаборации HEDgeNOB является генерация экстремального состояния вещества с помощью цилиндрической имплозии. Этот эксперимент получил название LAPLAS – Laboratory PLANetary Sciences [1, 7, 10]. В этом эксперименте полый интенсивный пучок ионов нагревает тяжелую внешнюю оболочку. При этом происходит цилиндрическое сжатие (кумуляция) исследуемого образца, находящегося в центральной области мишени. Цель эксперимента – это получение состояния вещества при мегабарных давлениях и

сравнительно низких температурах, т.е. параметрах, характерных для проблем изучения металлизации водорода, определения свойств ядер газовых планет, таких как Юпитер и Сатурн. Создание высокоэнергетичного интенсивного кольцевого пучка с высокой контрастностью является ключевой задачей данного эксперимента.

Цель работы.

Целью работы является разработка, создание и исследование системы формирования квазитрубчатого пучка тяжелых ионов высокой энергии для проекта ИТЭФ-ТВН.

Одним из способов получения кольцевого пучка является вращение пучка со скоростью, которая, с учетом инерционности процесса на мишени, позволит считать его квазитрубчатым [6]. Как показано в работе [7], за длительность импульса пучок должен совершить не менее 10 оборотов вокруг продольной оси мишени за время не превышающее ~ 100 нс, что соответствует частоте вращения не менее 100 МГц. На практике вращение пучка может осуществляться при помощи двух высокочастотных дефлекторов, отклоняющих пучок во взаимно перпендикулярных направлениях с соответствующим сдвигом по фазе. Система формирования квазитрубчатого пучка может устанавливаться в линии транспортировки пучка от ускорительно-накопительного комплекса до мишени.

При разработке формирователя квазитрубчатого пучка тяжелых ионов высокой энергии необходимо решить ряд проблем, связанных как с формированием требуемого пучка тяжелых ионов, так и с его фокусировкой на мишень. При расчете системы формирования квазитрубчатого пучка необходимо учитывать тот факт, что система фокусировки и величины отклонения пучка в ВЧ¹ дефлекторе взаимосвязаны. Тем не менее, для

¹ Согласно ГОСТ 24375-80 рабочая частота данного дефлектора относится к области очень высоких частот (ОВЧ), но для простоты изложения здесь и далее будет использован термин ВЧ.

удобства расчета системы формирования квазитрубчатого пучка целесообразно разбить эти задачи на две условно-независимые (расчет ВЧ дефлектора и системы фокусировки) и объединить их лишь при расчете динамики пучка в целой системе.

Расчет дефлектора также может быть разбит на две независимые задачи: первая – поиск геометрических параметров элементов резонатора, для обеспечения равномерности отклонения пучка по поперечному сечению; вторая – расчет количества ячеек резонатора и вводимой мощности, необходимых для достаточного отклонения пучка при минимальных габаритах формирователя.

При расчете равномерности отклоняющего поля должен быть учтен вклад в динамику пучка как электрической, так и магнитной компоненты поля, а также влияние геометрических размеров резонатора на его электродинамические характеристики (ЭДХ).

Система фокусировки пучка должна удовлетворять следующим требованиям: сфокусировать цилиндрический пучок так, чтобы толщина кольца была равна $\sim 1,5$ мм, внешний диаметр кольца – ~ 3 мм (параметры, необходимые для проведения эксперимента LAPLAS, см. Рис. 1), при отсутствии геометрических aberrаций. Кроме того, система фокусировки вместе с отклоняющими резонаторами должна вписываться в геометрические размеры экспериментального зала.

После отдельно проведенных расчетов, как формирователя (ВЧ дефлектора), так и системы фокусировки, должно быть проведено численное моделирование динамики частиц во всей системе с учетом начальных параметров пучка и влияния кулоновского взаимодействия частиц пучка.

Научная новизна.

Научная новизна заключается в разработке ВЧ системы формирования квазитрубчатого пучка тяжелых ионов для генерации экстремального состояния вещества в рамках коллаборации HEDgeNOB (проект FAIR) и

проекта ИТЭФ-ТВН. Кроме того, предложен метод оптимизации форм отклоняющих электродов, при которых достигается наиболее однородное отклонение всех частиц пучка.

Практическая ценность. Результаты диссертационной работы будут использованы для исследования по физике высокой плотности энергии в веществе, в рамках коллаборации HEDgeHOV (проект FAIR) и проекта ИТЭФ-ТВН.

На защиту выносятся следующие результаты:

1. Метод формирования квазитрубчатого пучка тяжелых ионов;
2. Результаты моделирования ВЧ характеристик формирователя.
3. Конструкция ВЧ формирователя.
4. Результаты измерения ЭДХ одной отклоняющей ячейки и ВЧ формирователя квазитрубчатого пучка тяжелых ионов, состоящего из двух отклоняющих 4-х ячеечных резонаторов.

Достоверность полученных результатов, представленных в диссертации, достигается использованием известных и общепринятых для решения подобных задач программ численного моделирования, применением различных методов как аналитических, так и численных. Экспериментальные результаты получены с помощью современного, поверенного измерительного оборудования.

Апробация работы. Основные результаты и выводы, включенные в диссертацию, многократно докладывались и обсуждались на российских и международных конференциях по ускорителям заряженных частиц, в том числе лично автором на семинаре проекта FAIR (ИТЭФ, Москва, 6-7 апреля, 2010), конференции IPAC`10 (Киото, Япония, май, 2010), конференции LINAC`10 (Цукуба, Япония, сентябрь, 2010), научной сессии НИЯУ

«МИФИ» (Москва, 1-5 февраля, 2011), первой Объединенной школе Ассоциации Гельмгольца и ГК «Росатом» (Хиршегг, Австрия, 12-17 февраля, 2011), конференции RAS`11 (Нью-Йорк, США, март, 2011), научной сессии НИЯУ «МИФИ» (Москва, 30 января – 4 февраля, 2012) и второй Объединенной школе Ассоциации Гельмгольца и ГК «Росатом» (Бекасово, Московская область, Россия, 19-26 февраля, 2012).

Результаты работы опубликованы в 7 печатных работах, 3 из которых опубликованы в реферируемых журналах. Получен патент на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и приложения. Объем диссертации составляет 128 страниц, 75 рисунков, 20 таблиц.

Содержание работы.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются основные цели исследования и определяется круг решаемых задач.

Первая глава посвящена описанию экстремального состояния вещества и способам его получения.

С помощью пучков заряженных частиц экстремальное состояние вещества может быть получено различными способами, в частности это эксперимент, получивший название LAPLAS проекта FAIR [12].

Эксперимент LAPLAS проекта FAIR нацелен на изучение квазиизохорического сжатия вещества. Наиболее простая мишень для проведения квазиизохорического эксперимента представляет собой цилиндр (см. Рис. 1а). Область расширения может быть ограничена путем заключения изучаемого материала в инертную оболочку, которая может быть заполнена каким-либо газом с различным начальным давлением. Для обеспечения требуемого удержания нагретого вещества прозрачным для рентгеновских

квантов материалом с малым Z оболочка также нагревается периферийной частью ионного пучка. При этом нагретый слой оболочки создает удерживающее противодействие для основного вещества материала мишени. Предполагаемая конфигурация мишени (см. Рис. 1б) и, в частности, абсорбера (области, облучаемой пучком) требует диаметра сфокусированного пучка не более 1,5 мм при среднем радиусе около 1,35 мм [13].

Во второй главе представлены физические основы работы формирователя квазитрубчатого пучка тяжелых ионов высокой энергии.

Одним их способов получения кольцевого пучка является вращение пучка со скоростью, которая, с учетом инерционности процесса на мишени, позволит считать его квазитрубчатым [6]. Как показано в работе [7], за длительность импульса пучок должен совершить не менее 10 оборотов вокруг продольной оси мишени за время не превышающее ~ 100 нс, что соответствует частоте вращения не менее 100 МГц.

На практике вращение пучка может осуществляться при помощи двух высокочастотных дефлекторов, отклоняющих пучок во взаимно перпендикулярных направлениях с соответствующим сдвигом по фазе.

Наиболее простой пример устройства формирования квазитрубчатого пучка – электронно-лучевая трубка, в которой, меняя напряжение и разность фаз между отклоняющими пластинами, можно добиться, чтобы пучок описывал фигуры Лиссажу [14], частным случаем которых является круг. Известна также система магнитных дефлекторов в Lawrence Berkeley National Laboratory (LBL, USA) [15, 16]. Данное устройство состоит из двух электромагнитов, отклоняющих пучок в вертикальной и горизонтальной плоскостях, и способно создать квазитрубчатый пучок тяжелых ионов диаметром до 30 см и частотой до 60 Гц.

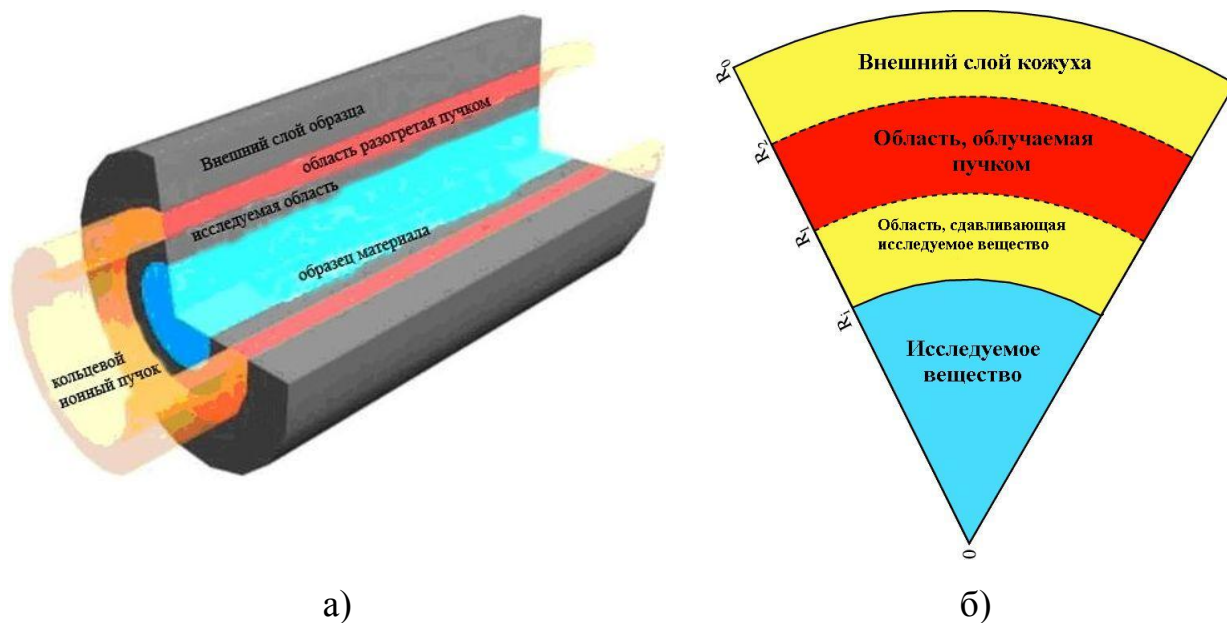


Рис. 1. Мишень и сечение мишени для эксперимента LAPLAS,
 где $R_0 = 0,4$ мм, $R_1 = 0,6$ мм, $R_2 = 2,1$ мм, $R_3 = 3,3$ мм.

Максимальное отклонение частицы достигается, если время ее пролета через дефлектор соответствует половине периода высокочастотных колебаний $D = \frac{\beta_z c}{2f}$, где f – частота отклоняющего поля. Тогда угол отклонения можно вычислить по следующей формуле:

$$\alpha = \frac{e}{m} \frac{E_m}{\beta_z^2 c^2} \frac{2}{\pi} D, \quad (1)$$

где e и m – заряд и масса заряженной частицы, соответственно, E_m – напряженности отклоняющего поля, β_z – продольная относительная скорость частицы, c – скорость света.

Тогда, при напряженности отклоняющего поля $E_m = 10$ МВ/м и частоты $f_0 = 300$ МГц, для ожидаемого в рамках проекта FAIR пучка ионов U_{238}^{28+} (см. Табл. 1), угол отклонения $\alpha = 0,2$ мрад. Очевидно, что получить кольцообразный пучок в этом случае возможно, если угол расхождения пучка не превышает 0,2 мрад, а, следовательно, горизонтальный размер

пучка не менее 250 мм, а вертикальный – 80 мм. Таким образом, максимальное отклонение, достижимое в элементарном двухпластинчатом электрическом дефлекторе явно недостаточно для получения требуемого радиуса вращения пучка с указанными параметрами на мишени при частоте 300 МГц.

Таблица 1. Параметры пучка для проекта FAIR.

Тип ионов	U_{238}^{28+}
Кинетическая энергия, ГэВ/а.е.м.	1
Количество частиц в импульсе, шт.	$2 \cdot 10^{12}$
Длительность импульса, нс	50
Горизонтальный эммитанс (4 rms), мм*мрад	25
Вертикальный эммитанс (4 rms), мм*мрад	8
Разброс по энергии, %	± 1

Одним из возможных решений данной проблемы является принцип резонансного взаимодействия отклоняющего поля с частицами. Многоячеечная отклоняющая система состоит из произвольного числа пар отклоняющих пластин, расположенных на оси пучка с периодом D . Амплитуда поля в отклоняющих зазорах периодически изменяется с частотой $f_0 = c/\lambda$, где λ – длина волны колебаний в свободном пространстве, причем в каждый момент времени поле в соседних зазорах направлено противоположно.

Для отклонения пучка представляется целесообразным использовать резонатор с типом колебаний, в котором присутствует поперечное электрическое поле, периодически изменяющееся по длине. Это может быть, например, тип колебаний H_{11p}^o , где p – число вариаций поля по продольной координате [17].

В резонаторе установлены электроды с периодом D (см. Рис. 2), которые, помимо концентрации электрического поля между собой, будут исполнять роль емкостных и индуктивных нагрузок, уменьшая тем самым фазовую скорость отклоняющего поля. Локализация отклоняющего

электрического поля между электродами дает возможность выравнивать его за счет изменения их формы, добиваясь однородности отклонения всех частиц по сечению пучка.

В третьей главе представлен расчет динамики пучка ионов Co_{59}^{27+} , ожидаемого в рамках проекта ИТЭФ-ТВН, в канале транспортировки пучка от отклоняющего резонатора до мишени и расчет электродинамических характеристик отклоняющего резонатора.

Ожидаемые параметры пучка в рамках проекта ИТЭФ-ТВН представлены в Таблице 2. Таким образом, система транспортировки должна сжать пучок, с начальным диаметром 80 мм ($x' = y' = 0,2$ мрад), в пятно, диаметром не более 1,5 мм.

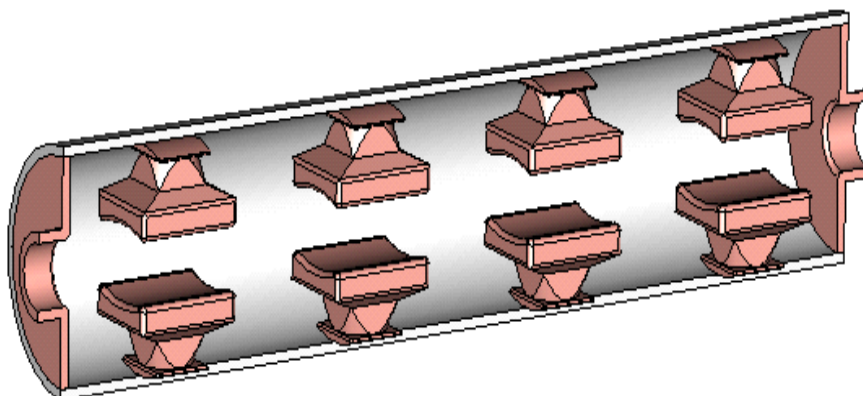


Рис. 2. Общий вид отклоняющего резонатора.

В качестве системы транспортировки, был рассмотрен триплет квадрупольных линз [18, 19]. Для предварительной оценки параметров системы транспортировки пучка было проведено моделирование динамики матричным методом с помощью программы Trace3D [20]. Результаты предварительного моделирования канала транспортировки представлены в Таблице 3.

Таблица 2. Параметры пучка для проекта ИТЭФ-ТВН.

Тип ионов	Co_{59}^{27+}
Кинетическая энергия, МэВ/а.е.м.	450
Количество частиц в импульсе, шт.	$2 \cdot 10^{12}$
Длительность импульса, нс	120
Горизонтальный эммитанс (4 gms), мм*мрад	8
Вертикальный эммитанс (4 gms), мм*мрад	8
Разброс по энергии, %	± 1

С использованием численного моделирования был проведен выбор формы и оптимизация размеров электродов, обеспечивающих однородность отклонения пучка не хуже 2,5 %. Расчет однородности отклонения пучка проводился по следующей методике:

1. Рассчитывалось электромагнитное поле в резонаторе при определенной геометрии электродов;
2. Рассчитывался угол отклонения одной частицы, летящей по центру резонатора, и трех частиц, летящих в первом квадранте на границе 80% апертуры канала (см. Рис. 3а);
3. Вычислялась относительная разница углов между центральной и периферийными частицами и определялось максимальное значение этого параметра, получившего название максимальный относительный угол отклонения (α_{\max}).

Рассматривались 2 формы электродов: плоская и седлообразная (см. Рис. 3). В результате оптимизации размера плоских электродов удалось уменьшить α_{\max} до 2,7 %, при ширине электродов, равной 200 мм. В результате оптимизации седловидной формы, а именно ширины пластин и радиуса седла электрода, удалось уменьшить максимальную неоднородность отклонения в пределах 80% апертуры до 2,3%.

Таблица 3. Структура канала транспортировки пучка.

Элемент	Длина, мм	Апертура, мм	Градиент магнитного поля
Магнитная линза 1	400	100	13,35 Т/м
Канал дрейфа	160	100	–
Магнитная линза 2	800	100	13,71 Т/м
Канал дрейфа	160	100	–
Магнитная линза 3	400	100	19,23 Т/м

Для выбранных размеров электродов проведено моделирование многоячеечного резонатора на предмет исследования зазора между рабочей частотой и частотой ближайшего паразитного вида колебаний. В результате моделирования было получено, что расстояние между частотой рабочего вида колебаний и частотой паразитного вида колебаний уменьшается при увеличении количества элементарных ячеек резонатора. В случае 4-х ячейечного резонатора расстояние между частотами составляет около 3 МГц. В резонаторах с 6-ю и 8-ю ячейками разница частот составляет около 1 МГц.

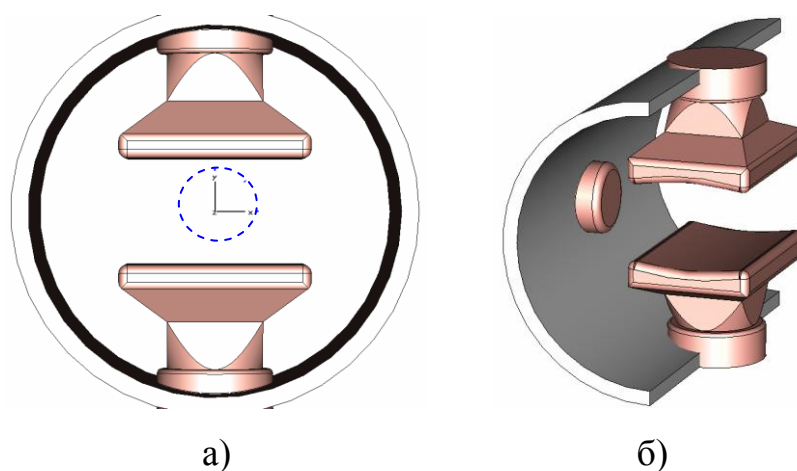


Рис. 3. Различные формы отклоняющих электродов: а) Плоские электроды; б) Электроды седловидной формы;

Для уточнения параметров канала фокусировки и определения напряженности отклоняющего электрического поля было проведено моделирование динамики пучка с использованием реального распределения поля в резонаторе. Моделирование динамики в системе формирования

квазитрубчатого пучка тяжелых ионов проводился с использованием программы Transit, являющейся модифицированной версией программы Dynamion, разработанной в ИТЭФ [21–23]. Параметры формирователя представлены в Таблице 4.

На Рис. 4 представлено сечение пучка и распределение частиц после прохождения системы формирования квазитрубчатого пучка тяжелых ионов высокой энергии. Из Рис. 4 видно, что размер квазитрубчатого пучка удовлетворяет размеру облучаемой области на мишени эксперимента LAPLAS.

В четвертой главе представлена одна ячейка формирователя квазитрубчатого пучка с пластинами седловидной формы. На поверхность ячейки отклоняющего резонатора нанесен медный токопроводящий слой толщиной 50 мкм (см. Рис. 5).

Таблица 4. Параметры системы формирования квазитрубчатого пучка.

Элемент	Длина, мм	Градиент эл./маг. поля
Горизонтально-отклоняющий резонатор	4*368	1,5 МВ/м
Канал дрейфа	200	–
Вертикально-отклоняющий резонатор	4*368	1,5 МВ/м
Канал дрейфа	800	–
Магнитная линза 1	400	13,35 Т/м
Канал дрейфа	150	–
Магнитная линза 2	800	13,71 Т/м
Канал дрейфа	160	–
Магнитная линза 3	400	19,23 Т/м
Канал дрейфа	1300	–

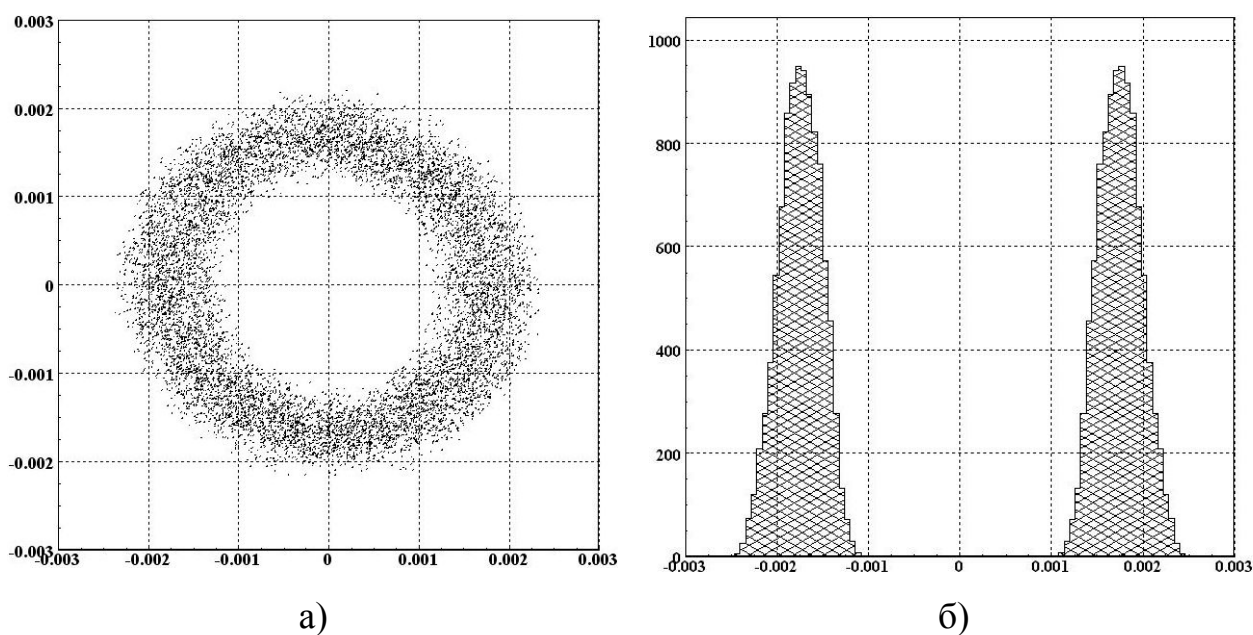


Рис. 4. Сечение пучка (а) и распределение частиц (б) после прохождения формователя квазитрубчатого пучка.

Проведено измерение электродинамических характеристик (ЭДХ) одной ячейки формователя. Расчетная резонансная частота одной ячейки формователя квазитрубчатого пучка тяжелых ионов составляет $f_0 = 296,6$ МГц, а добротность $Q_0 = 14000$. Измеренная резонансная частота ячейки $-f_0 = 294,2$ МГц, добротность $-Q_0 = 11000$. Таким образом, измеренная резонансная частота отличается от расчетной на $\Delta f = 2,4$ МГц, что составляет около 0,8 %, а добротность $\Delta Q = 3000$.

Были промоделированы и экспериментально исследованы различные методы настройки частоты, а именно: введение в объем резонатора штатного подстроечного плунжера, установка грибовидных плунжеров и установка кольцеобразных плунжеров. Для всех видов плунжеров получены зависимости сдвига частоты от геометрических размеров плунжеров. В итоге, резонатор был настроен на рабочую частоту с помощью кольцеобразных плунжеров, установленных на торцевых фланцах.

Для возбуждения резонатора были разработан и изготовлен фидерный ввод (магнитная антенна) ВЧ мощности на максимальную импульсную

мощность 300 кВт. Расчетное значение площади петли составило $1,5 \text{ см}^2$ и была выбрана так, чтобы она имела критическую связь с резонатором, т.е. чтобы нагруженная добротность резонатора (Q_n) была равна половине собственной (Q_0). Также, была рассчитана и откалибрована петлевая антенна для измерения электромагнитного поля в резонаторе. Коэффициент связи измерительной петли с резонатором равен $K_{св} = -44,5 \text{ дБ}$.



Рис. 5. Фотография ячейки формователя после нанесения медного проводящего слоя.

Проведены измерения распределения отклоняющего электрического поля в одной ячейки формователя. В результате измерения было получено, что распределение электрического поля совпадает с моделированием (см. Рис. 6а). Измерение влияния подстроечных элементов на распределение поля также хорошо согласуется с результатами моделирования (см. Рис. 6б).

Одна ячейка формователя была установлена на вакуумный стенд, получено предельное значение вакуума равное $\sim 10^{-7}$ торр, после чего в ячейку была введена ВЧ мощность. В ходе эксперимента, в ячейку была

введена мощность, равная ~ 70 кВт, и получена напряженность поля между электродами, равная $3,25$ МВ/м, что в $2,16$ раза превышает максимально требуемое значение в $1,5$ МВ/м.

В пятой главе представлен изготовленный и собранный формирователь квазитрубчатого пучка, состоящий из двух 4-х ячейных отклоняющих резонаторов. После изготовления четырех ячеек одного резонатора было проведено измерения их резонансной частоты. Измерения показали, что резонансные частоты отличаются от заданной на $\Delta f = 2,26 \div 2,67$ МГц.

Для увеличения резонансной частоты высота электродов, на основании проведенного моделирования, была уменьшена на величину от $0,6$ до $0,65$ мм.

После доработки ножек отклоняющих электродов, формирователь квазитрубчатого пучка тяжелых ионов был собран и установлен на штатную подставку (см. Рис. 7, для наглядности торцевые фланцы сняты).

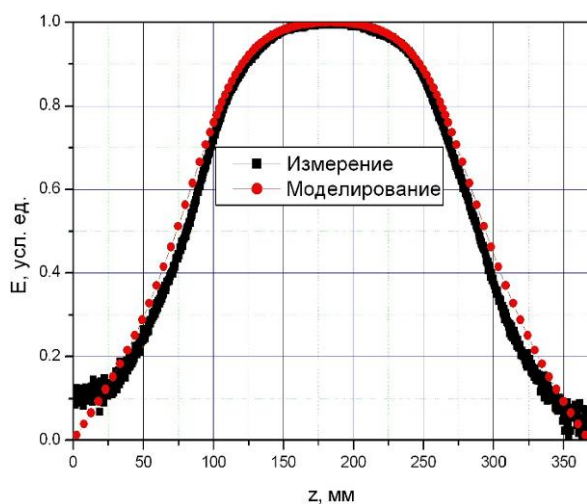


Рис. ба. Распределение поля на оси дефлектора без подстроечного элемента.

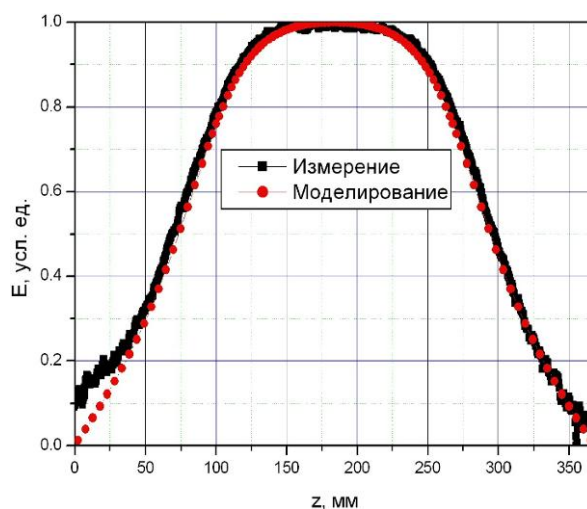


Рис. бб. Распределение поля на оси дефлектора с подстроечным элементом, введенным на глубину 50 мм.

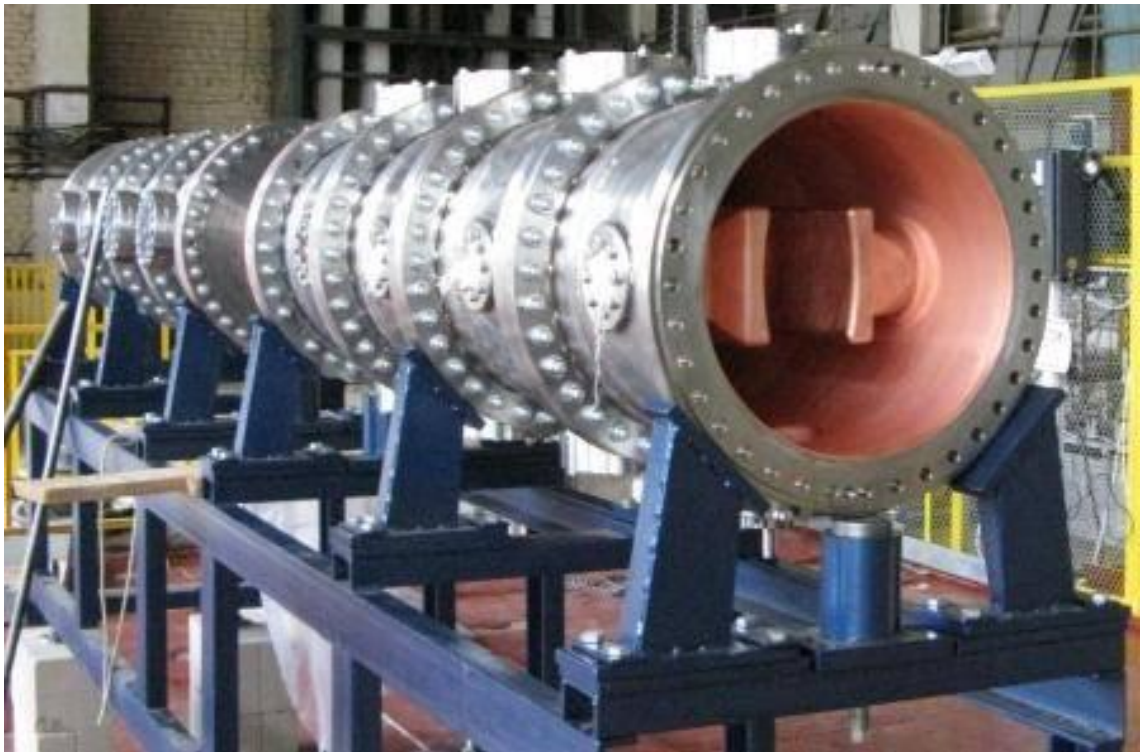


Рис. 7. Фотография формирователя.

После сборки формирователя было проведено измерение его ЭДХ. Резонансная частота отличается от требуемой ($f_0 = 297$ МГц) на $\Delta f = 0,76$ МГц и $\Delta f = 0,59$ МГц, а добротности отличаются от расчетной ($Q_0 = 14000$) на $\Delta Q = 1807$ и $\Delta Q = 2326$ для горизонтально и вертикально отклоняющих резонаторов, соответственно. Было проведено измерение распределения отклоняющего электрического поля на оси резонаторов. На Рис. 8 представлен результат измерения распределения отклоняющего электрического поля в горизонтально отклоняющем резонаторе. Как видно из Рис. 8, измеренное распределение отклоняющего электрического поля отличается от расчетного на величину, не превышающую 5%.

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы работы.

В результате работы, была разработана, создана и исследована система формирования квазитрубчатого пучка тяжелых ионов высокой энергии.

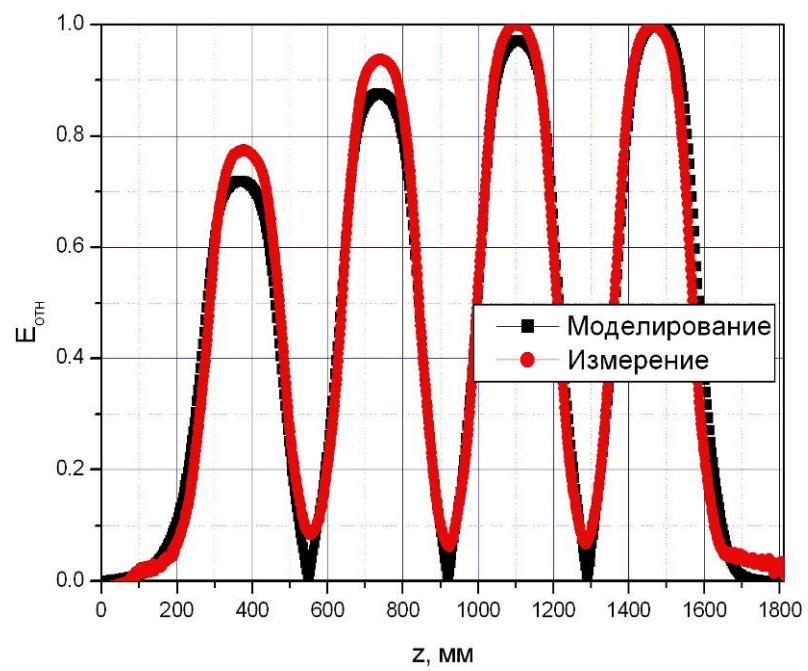


Рис. 11. Распределение отклоняющего электрического поля на оси 4-х ячейечного горизонтально отклоняющего резонатора.

Основные результаты диссертации.

1. Предложен принцип создания квазитрубчатого пучка тяжелых ионов высокой энергии, заключающийся в последовательном резонансном отклонении пучка в горизонтальной и вертикальной плоскостях высокочастотным электромагнитным полем, возбуждаемым в цилиндрическом резонаторе с типом колебаний H_{11p}^o , где p – количество вариаций поля по продольной координате;

2. Предложена методика оптимизации формы отклоняющих электродов. С ее помощью найдена форма отклоняющих электродов обеспечивающих однородность отклонения частиц по всему сечению пучка не хуже 2,5 %. Проведено моделирование динамики пучка в формирователе квазитрубчатого пучка тяжелых ионов высокой энергии. В результате моделирования определены параметры резонатора и канала фокусировки, обеспечивающие формирование требуемого пучка на мишени;

3. Разработана конструкция отклоняющего резонатора. Изготовлена элементарная ячейка отклоняющего резонатора – базового элемента формирователя. Проведено измерение ЭДХ ячейки резонатора.

4. Ячейка была настроена на резонансную частоту. В ячейку формирователя введена ВЧ мощность и получена напряженность отклоняющего поля в 2,16 раза больше требуемой для формирования квазитрубчатого пучка тяжелых ионов для проекта ИТЭФ-ТВН;

5. Изготовлены все 8 ячеек формирователя требуемые для эксперимента в рамках проекта ИТЭФ-ТВН. Проведена доработка конструкции отклоняющих электродов формирователя и сборка формирователя. Проведено измерение ЭДХ формирователя и получено хорошее совпадение с расчетными значениями. Проведено моделирование динамики пучка ионов Co_{59}^{27+} с учетом измеренных ЭДХ формирователя и показано, что данный формирователь способен обеспечить требуемые параметры пучка на мишени.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Heavy ion hollow beam formation at the energy of 1 AGeV for implosion experiments using an original RF system for fast rotation, [S. Minaev](#), A. Sitnikov, A. Golubev et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics, Research A, 620 (2010), 99–104;
2. Multi-cell RF deflecting system for formation of hollow high energy heavy ion beam, [S. Minaev](#), A. Sitnikov, A. Golubev et al., Proceedings of IPAC'10, p. 3756-3758, Kyoto, Japan, 2010;
3. Electro-dynamic characteristics of RF wobbler cell for heavy ion beam, [S. Minaev](#), A. Sitnikov, A. Golubev et al., Proceedings of LINAC'10, p. 581-583, Tsukuba, Japan, 2010;
4. Particle dynamics simulation in wobbler system for hollow high energy heavy ion beam formation, [S. Minaev](#), A. Sitnikov, A. Golubev et al., Proceedings of PAC'11, p. 2193-2195, New York, USA, 2011;
5. Ввод ВЧ мощности в ячейку формирователя квазитрубчатого пучка тяжелых ионов высокой энергии, А.Л. Ситников, В.Г. Кузьмичев, А.А. Голубев и др., Ядерная Физика и Инжиниринг, 2011, том 2, № 4, с. 355–358;
6. Формирование квазитрубчатого пучка тяжелых ионов высокой энергии с помощью многоячеечного резонансного высокочастотного дефлектора, [Минаев С.А.](#), Ситников А.Л., Голубев А.А., Кулевой Т.В., Журнал технической физики, 2012, том 82, вып. 9, с. 69-74;
7. Патент на изобретение № 2422928 от 27.06.2011 «Устройство для вращения пучка тяжелых ионов высокой энергии», Голубев А.А., [Минаев С.А.](#), Кулевой Т.В., Шарков Б.Ю., Ситников А.Л.

Литература.

1. Интенсивные ионные пучки для генерации экстремальных состояний вещества, В.Е. Фортов, Д. Хоффманн, Б.Ю. Шарков, Успехи физических наук, т. 178, №2, февраль 2008;
2. Present and future perspectives for high energy density physics with intense heavy ion and laser beams, D.H.H. Hoffmann, A. Blazevic, P. Ni, etc., Laser and Particle Beams (2005), 23, 47-53;
3. Мощные ударные волны и экстремальные состояния вещества, В.Е. Фортов, Успехи физических наук, т. 177, №4, апрель 2007;
4. Экстремальные состояния вещества на Земле и в космосе, В.Е. Фортов, Успехи физических наук, т. 179, №6, июнь 2009;
5. CERN FAQ – the LHC guide, <http://public.web.cern.ch>;
6. Ядерный синтез с инерционным удержанием. Современное состояние и перспективы для энергетики, под ред. Б.Ю. Шаркова, М.: Физматлит, 2005;
7. Generation of hollow ion beam: Calculation of the rotation frequency required to accommodate symmetry constraint, A.R. Piriz, N.A. Tahir, D.H.H. Hoffmann, M. Temporal, Physical Review E 67, 017501 (2003);
8. Теория линейных резонансных ускорителей, Капчинский И.М., М.: Энергоиздат, 1982, 241 с.;
9. Экстремальные состояния вещества, Д. А. Киржниц, Успехи физических наук, Том 104, вып. 3, июль 1971 г.;
10. FAIR – An International Facility for Antiproton and Ion Research, D. Krämer, Proceedings of RuPAC 2006, Novosibirsk, Russia;
11. HEDgeNOB: Studies on High Energy Density Matter with Intense Heavy Ion and Laser Beams at FAIR, www.gsi.de;
12. Научная программа в новом международном центре фундаментальной физики – Европейском центре антипротонных и ионных исследований FAIR, В.Е. Фортов, Б.Ю. Шарков, Х. Штокер, УФН, т. 182, № 6, 2012;

13. Metallization of hydrogen using heavy-ion-beam implosion of multilayered cylindrical targets, N.A. Tahir et al., Phys. Rev. E 63 (2001) 016402;
14. Справочник по радиоэлектронным устройствам. В 2-х томах; Под ред. Д. П. Линде – М.: Энергия, 1978;
15. Wobbler Dosimetry for the Biomedical program at the LBL Bevalac, W. Chu, M. McEvoy, M. Nyman, etc., IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. NS-32, #5, 1985;
16. Wobbler Facility for Biomedical Experiments at the Bevalac, W.T. Chu, S.B. Curtis, J. Llacer, IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. NS-32, #5, 1985;
17. Техника сверхвысоких частот, Н.П. Собенин, О.С. Милованов, М.: Энергоатомиздат, 2007;
18. Транспортировка пучков заряженных частиц, И.Н. Мешков, издательство «Наука», Сибирское отделение, 1991;
19. Физика и технология источников ионов, под редакцией Я. Брауна, М.: «Мир», 1998;
20. TRACE 3-D Documentation, K.R. Crandall, Report LA-11054-MS, Los Alamos, 1987;
21. Beam dynamics simulation for the GSI high current injector with the new versatile computer code DYNAMION, J. Klabunde, W. Barth, S. Yaramyshev, A. Kolomiets, Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference, p. 2899-2901;
22. DYNAMION – the code for beam dynamics simulations in high current ion linac, A. Kolomiets, V. Pershin, I. Vorobyov, S. Yaramishev, Ju. Klabunde, Proceedings of the 1998 European Particle Accelerator Conference, p. 1201-1203;
23. Implementation of the DYNAMION code to the end-to-end beam dynamics simulations for the GSI proton and heavy ion linear accelerators, S. Yaramyshev, W. Barth, L. Dahl, L. Groening, B. Schlitt, Proceedings of ICAP 2006, WEPPP 10, p. 201-204.