

Формирование квазитрубчатого пучка тяжелых ионов высокой энергии с помощью многоячеечного резонансного высокочастотного дефлектора

© С.А. Минаев, А.Л. Ситников, А.А. Голубев, Т.В. Кулевой

Государственный научный центр Российской Федерации —
Институт теоретической и экспериментальной физики,
117218 Москва, Россия
e-mail: Aleksey.Sitnikov@itep.ru

(Поступило в Редакцию 21 июля 2011 г. В окончательной редакции 19 декабря 2011 г.)

Генерация экстремального состояния вещества с точно измеряемыми параметрами представляет огромный интерес для современной физики. Одним из способов получения такого состояния является облучение кольцеобразным пучком тяжелых ионов высокой энергии торца полого цилиндрического кожуха, в центре которого расположено изучаемое вещество, находящееся при температуре порядка нескольких градусов Кельвина. Под действием пучка кожух начинает взрывоподобно расширяться как наружу, так и вовнутрь, сжимая изучаемое вещество до экстремально высокого давления, при этом, вещество не подвергается прямому нагреву. Описан принцип создания полого цилиндрического пучка тяжелых ионов высокой энергии с помощью резонансного высокочастотного дефлектора. Отклонение пучка в двух поперечных направлениях с помощью высокочастотного электрического поля позволяет получить пучок, вращающийся вокруг продольной оси и облучающий кольцевую область на торце мишени.

Введение

Плазма с сильным межчастичным взаимодействием является наиболее распространенным состоянием материи во Вселенной: до 98% материи — это астрофизические объекты, состоящие из сильно ионизованного вещества с высокой плотностью. Кроме того, интерес к сверхплотному состоянию вещества обусловлен рядом проблем планетарной геофизики. Примером исследования последнего направления является изучение параметров экзопланет, а также исследование планет Солнечной системы, в частности, изучение проблемы металлизации водорода, важной для определения структуры гигантских планет, таких как Юпитер и Сатурн [1–5]. Более того, совокупность проводимых исследований имеет большое практическое значение для таких прикладных областей, как атомная энергетика, синтез сверхпрочных материалов, плазменные технологии, медицина и управляемый термоядерный синтез (УТС) [2].

Плазму с сильным межчастичным взаимодействием можно создать с помощью химических взрывчатых веществ, мощных лазеров, подземных ядерных взрывов, Z-пинчей, рельсовых пушек и устройств, использующих магнитное сжатие вещества. Ключевой проблемой является повторяемость экспериментов по генерации в лабораторных условиях экстремального состояния вещества с точно контролируруемыми термодинамическими параметрами. Использование пучка заряженных частиц является относительно новым способом генерации экстремального состояния вещества [2].

Одним из возможных методов получения экстремального состояния вещества с помощью пучков заряженных

частиц является облучение последним торца составной цилиндрической мишени, в центре которой расположено изучаемое вещество при температуре нескольких градусов Кельвина, а на периферии — металлический кожух. Тогда при облучении кожуха кольцеобразным пучком тяжелых ионов высокой энергии кожух начнет взрывоподобно расширяться как наружу, так и вовнутрь, сдавливая тем самым изучаемое вещество. Такой эксперимент получил название LAPLAS (Laboratory Planetary Science) [1,6]. Предполагаемая структура мишени представлена на рис. 1. Внешний радиус изучаемого вещества равен 0.4 mm, внешний радиус кожуха, который будет непосредственно сдавливать изучаемое вещество, — 0.6 mm, внешний радиус кожуха, подвергающийся облучению пучка заряженных частиц, — 2.1 mm и внешний радиус всей мишени — 3.3 mm [7]. Данный эксперимент планируется проводить в двух ускорительных лабораториях: в ИТЭФ в рамках проекта ТВН-ИТЭФ, и в GSI, в рамках проекта FAIR [2,8].

Создание кольцеобразной формы пучка является одной из сложнейших задач данного эксперимента. На сегодняшний день известны 3 способа получения трубчатого пучка. Наиболее простой и очевидный путь — установить на оси пучка цилиндрическое препятствие, существенно меньшее по диаметру, чем сам пучок. Однако, во-первых, большая часть пучка будет потеряна, что приведет к уменьшению энергии, передаваемой пучком облучаемому кожуху, а во-вторых, появится поток вторичных частиц, который может привести к предпрогреву мишени.

Второй способ создания цилиндрического пучка заключается в прохождении его через плазменную линзу,

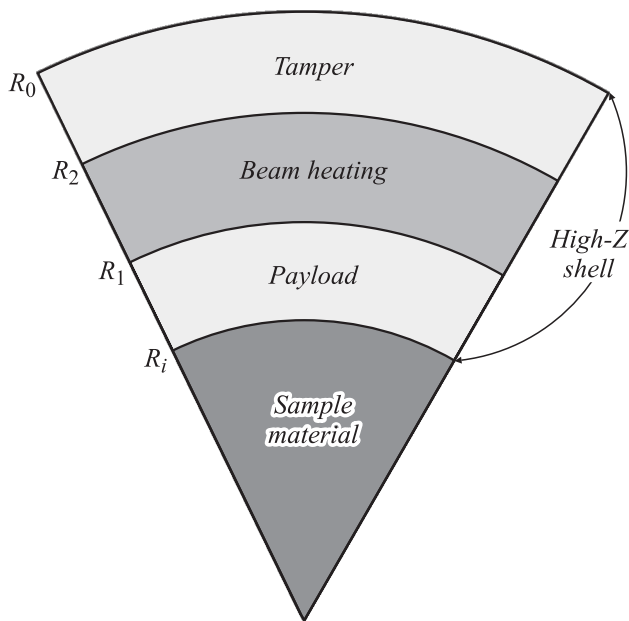


Рис. 1. Структура мишени, где $R_i = 0.4$ mm, $R_1 = 0.6$ mm, $R_2 = 2.1$ mm, $R_0 = 3.3$ mm.

в которой магнитное поле имеет радиальный градиент, уменьшающийся к оси линзы [9]. Магнитное поле плазменной линзы будет фокусировать пучок на некотором расстоянии, после прохождения которого, пучок начнет расходиться, в сечении представляя собой кольцо. У данного способа есть существенный недостаток, а именно центральная область пучка испытывает на себе значительно меньшее влияние фокусирующего магнитного поля [10]. Следовательно, после расхождения в центре пучка могут присутствовать неотклоненные частицы, которые будут облучать изучаемое вещество. Это неприемлемо по условию эксперимента LAPLAS [2,11].

И наконец, третий способ — вращение пучка со скоростью, которая с учетом инерционности процесса на коже позволяет считать его квазитрубчатым [12]. Как показано в работе [13], минимальная частота вращения пучка, обеспечивающего требуемую однородность облучения, составляет величину около 300 MHz. При такой частоте вращения пучок с предполагаемой в рамках проекта ТВН-ИТЭФ длительностью импульса 50 ns, совершит 15 оборотов. На практике вращение пучка может осуществляться при помощи двух высокочастотных дефлекторов, отклоняющих пучок во взаимно перпендикулярных направлениях с соответствующим сдвигом по фазе.

Существуют дефлекторы, создающие квазитрубчатый пучок, за счет отклонения его с помощью магнитного поля [14–16]. Однако частота отклонения в данных дефлекторах ограничена индуктивностью катушек магнитов и не превышает нескольких десятков герц. Следовательно, для отклонения пучка с частотой 300 MHz необходимо использовать отклоняющее электромагнитное поле.

Физическое обоснование формирователя квазитрубчатого пучка тяжелых ионов высокой энергии на базе резонансного дефлектора

Вращение пучка может быть осуществлено путем последовательного отклонения его в горизонтальной и вертикальной плоскостях за счет электромагнитного поля. Общий принцип формирователя квазитрубчатого пучка представлен на рис. 2. На нем схематично показаны горизонтальное и вертикальное отклоняющие устройства, система фокусировки и мишень. Пучок ионов высокой энергии с минимизированным значением поперечных скоростей и соответственно сравнительно большим диаметром попадает сначала в горизонтально-отклоняющий элемент, в котором отклоняющее поле изменяется по гармоническому закону, получая тем самым отклонение в горизонтальной плоскости. Затем пучок проходит через свободный промежуток и влетает в вертикально-отклоняющий элемент, где поле также изменяется по гармоническому закону, получая отклонение в вертикальной плоскости. Если горизонтальный и вертикальный дефлекторы должным образом сфазированы и согласованы по амплитуде, центр тяжести пучка после некоторого пространства дрейфа описывает на поперечной плоскости окружность с частотой изменения отклоняющего сигнала. Система фокусировки сокращает размер пучка на мишени до требуемой величины, тогда как его центр тяжести сохраняет вращение вокруг продольной оси на заданном радиусе.

В дальнейшем под словом „пучок“ будет подразумеваться физический пучок ионов, а под словосочетанием „квазитрубчатый пучок“ — пучок ионов, непосредственно облучающий мишень.

Элементарным отклоняющим дефлектором может служить пара пластин, на которые подается гармоническое напряжение. Для определенности, рассмотрим вертикальное отклонение пучка, движущегося вдоль продольной оси z элементарного дефлектора. Угол отклонения частицы после прохождения одной пары пластин такого дефлектора может быть вычислен по

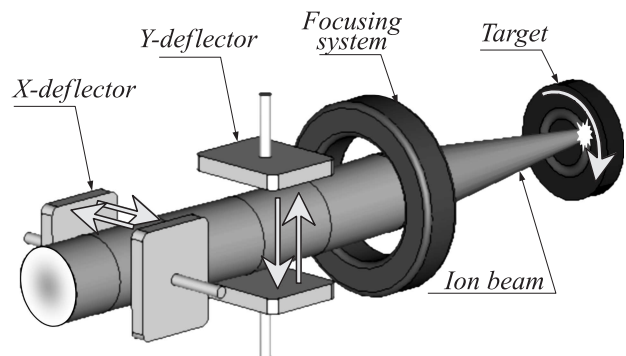


Рис. 2. Схема формирователя квазитрубчатого пучка тяжелых ионов.

следующей формуле:

$$\alpha = \frac{Z_e}{A_m c^2 \beta_z^2 L} \times \int_0^L \left[E_y(z) \sin\left(\frac{\pi}{L} z\right) - \beta_z c B_x(z) \cos\left(\frac{\pi}{L} z\right) \right] dz, \quad (1)$$

где A_m и Z_e — масса и заряд ионов соответственно, β_z — относительная продольная скорость, L — длина deflectора, E_y , B_x — вертикальная составляющая электрического поля и горизонтальная составляющая магнитного поля вдоль продольной оси формирователя. Очевидно, что максимальный угол отклонения достигается в том случае, если длина отклоняющих пластин удовлетворяет условию

$$d = \frac{\beta \lambda}{2}, \quad (2)$$

где λ — длина волны высокочастотных (ВЧ) колебаний в свободном пространстве.

Для ожидаемого в рамках проекта FAIR пучка ионов U_{238}^{28+} с кинетической энергией $W_k = 1 \text{ GeV}$ угол отклонения в элементарном deflectоре при напряженности отклоняющего поля $E = 20 \text{ MV/m}$, что соответствует максимальной напряженности поля на поверхности по критерию Килпатрика [17] при частоте поля $f_0 = 325 \text{ MHz}$, равен $\alpha = 0.64 \text{ mrad}$. Такого отклонения, с учетом доступного пространства, отводимого под эксперимент LAPLAS, не достаточно для получения требуемого размера кольцеобразного пучка на мишени.

Для получения требуемого отклонения, а следовательно, и требуемого размера квазитрубчатого пучка было предложено использовать принцип резонансного взаимодействия отклоняющего поля с пучком (см. рис. 3). Многоячеечная отклоняющая система состоит из произвольного числа пар отклоняющих пластин, расположенных на оси пучка с периодом D . Из рис. 3 можно видеть, что отклоняющее поле имеет π -вид колебаний. Если расстояние между центрами отклоняющих пластин $D = \beta \lambda / 2$, то резонансная частица при переходе из одной отклоняющей ячейки в другую попадает в одну и ту же фазу отклоняющего поля.

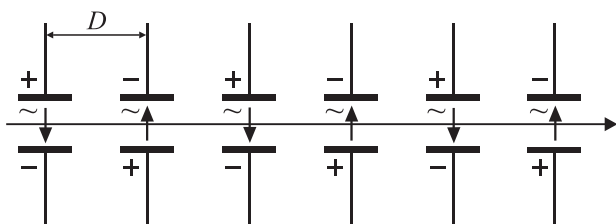


Рис. 3. Принципиальная схема многоячеечного резонансного deflectора.

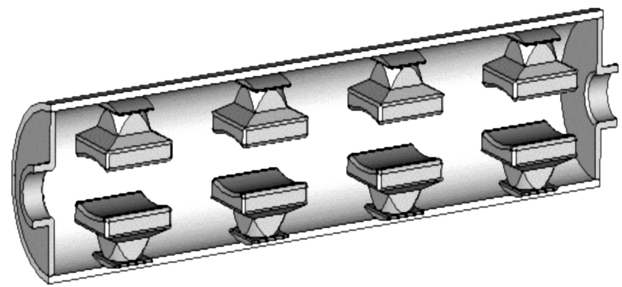


Рис. 4. Общий вид отклоняющего резонатора.

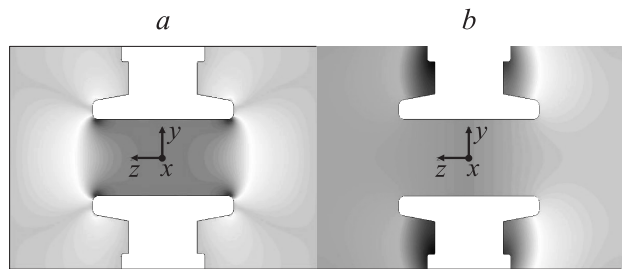


Рис. 5. Распределение электрического (a) и магнитного (b) полей в поперечном сечении одной ячейки отклоняющего резонатора.

Для отклонения пучка необходимо использовать резонатор с типом колебаний, в котором присутствует поперечное электрическое поле, периодически изменяющееся по длине. Это может быть, например, тип колебаний H_{11p}^0 , где p — число вариаций поля по продольной координате.

Поскольку в предлагаемом многоячеечном deflectоре реализуется принцип резонансного взаимодействия частиц с электромагнитным полем, то фазовая скорость основной гармоники отклоняющего поля должна совпадать со скоростью частиц. Как известно, в гладких волноводах и соответствующих резонаторах элементарной конфигурации это условие выполнено быть не может, поскольку фазовые скорости всех волн как H -, так и E -типа превышают здесь скорость света. Уменьшить фазовую скорость волны можно за счет введения в объем резонатора дополнительных емкостных и индуктивных элементов, как например в круглом диафрагмированном волноводе [18].

В данном случае предлагается ввести отклоняющие пластины, установленные на опорах, которые, в свою очередь, крепятся к корпусу резонатора, как показано на рис. 4. Типичная картина компонент электромагнитного поля одной ячейки отклоняющего резонатора представлена на рис. 5. Электрическое поле в этом случае будет сконцентрировано между пластинами, а магнитное — вокруг опор.

Важной особенностью предлагаемого резонатора является симметрия электрического поля в поперечных сечениях, равноотстоящих от соседних пар отклоняющих пластин. Поскольку тангенциальная составляющая электрического поля в этих сечениях отсутствует, здесь может быть введена электрическая стенка, не искажающая ни резонансной частоты системы, ни распределения поля. На практике это означает, что длинный отклоняющий резонатор, содержащий p пар отклоняющих пластин, может быть составлен из p идентичных, конструктивно независимых ячеек (модулей), в каждой из которых возбуждается аналог колебаний типа H_{111}^0 , при этом изменение количества модулей в системе практически не влияет ни на ее резонансную частоту, ни на распределение поля в отдельной ячейке. Такая система, составленная из унифицированных модулей, обладает определенной гибкостью и позволяет реализовать различные диапазоны углов отклонения в зависимости от поставленной задачи.

Выбор формы отклоняющих электродов

Локализация электрического поля между пластинами позволяет выравнивать его распределение по сечению пучка за счет подбора формы пластин, добиваясь, тем самым, однородности отклонения частиц, находящихся на разном удалении от оси пучка.

Как было сказано выше, максимальный угол отклонения, получаемый частицей, летящей строго по оси, при прохождении одной пары отклоняющих пластин, не превышает 0.64 mrad , что соответствует смещению

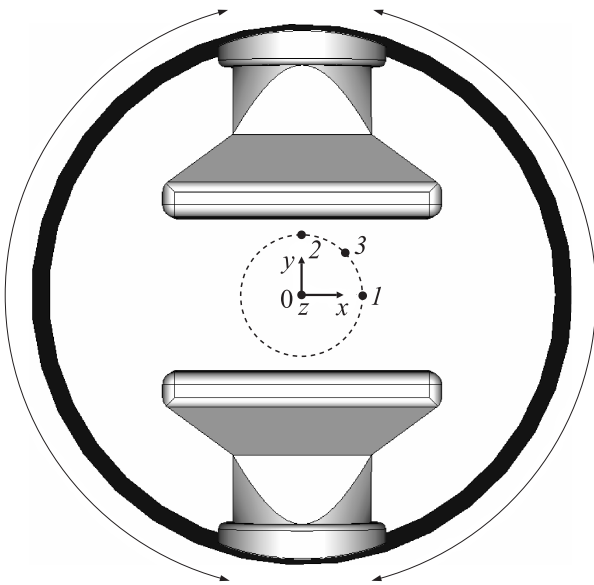


Рис. 6. Поперечное сечение модели отклоняющего резонатора с плоскими электродами. Синим пунктиром обозначена область 80% апертуры канала. Цифрами обозначены траектории частиц, вдоль которых рассчитывался эффективный угол отклонения.

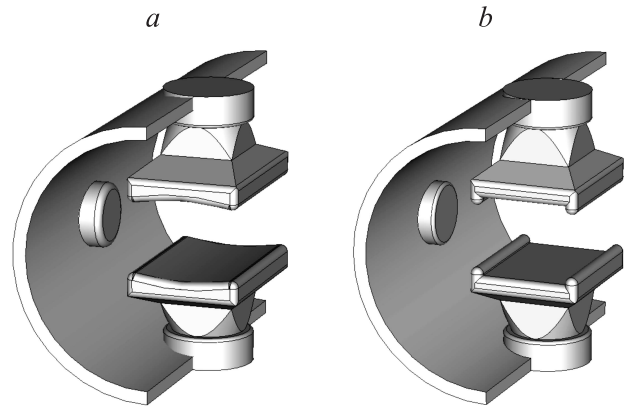


Рис. 7. Различные формы отклоняющих электродов. *a* — электроды седловидной формы, *b* — электроды с выступами на краях.

траектории частицы на выходе из отклоняющей ячейки на 0.26 mm . Поскольку вертикальное смещение траектории частицы пренебрежимо мало по сравнению с поперечным размером пучка с диаметром, равным 60 mm , то отклоняющую ячейку можно рассматривать в приближении тонкой линзы.

За показатель однородности отклонения примем максимальный относительный угол отклонения (ОУО) частиц, который рассчитывается по следующей формуле:

$$\max \delta \alpha_{\text{eff}N} = \frac{\alpha_{\text{eff}N} - \alpha_{\text{eff}0}}{\alpha_{\text{eff}0}}, \quad (3)$$

где $\alpha_{\text{eff}0}$ — эффективный угол отклонения частиц, летящих строго по оси резонатора, $\alpha_{\text{eff}N}$ — эффективный угол отклонения частиц, летящих по траектории N (см. рис. 6), $N = 1-3$ — номер траектории. Эффективные углы отклонения рассчитывались по формуле (1).

В случае плоских пластин (рис. 6) отклоняющее электрическое поле спадает на краях так, что для получения приемлемой однородности пришлось бы делать пластины достаточно широкими, что приводит, в свою очередь, к росту емкостной нагрузки и потребляемой ВЧ-мощности. При ширине электродов, равной 200 mm , максимальная неоднородность отклонения составляет 2.7% . Первоначально для компенсации спада поля на краях были рассмотрены пластины седловидной формы, представленные на рис. 7, *a*. В результате оптимизации формы пластин удалось уменьшить максимальную неоднородность отклонения в пределах 80% апертуры до 1.5% . В качестве альтернативной конфигурации, исследованы пластины с компенсирующими выступами на краях, приведенные на рис. 7, *b*. Для плоских пластин с компенсирующими выступами на краях удается уменьшить максимальную неоднородность отклонения до величины около 1% при меньшей ширине пластин (130 mm против 140 mm для пластин седловидной формы). Это, в свою очередь, дает снижение потребляемой ВЧ-мощности. Таким образом, плоские пластины с выступами на

краях выглядят предпочтительнее как с точки зрения однородности отклоняющих полей, так и с точки зрения потребляемой ВЧ-мощности.

Расчет динамики пучка в формирователе квазитрубчатого пучка тяжелых ионов высокой энергии

Расчет динамики пучка в системе формирования квазитрубчатого пучка тяжелых ионов высокой энергии проводился для пучка ионов Co_{59}^{27+} , использование которых планируется в рамках проекта ИТЭФ-ТВН. Параметры пучка представлены в табл. 1. Расчет проводился с использованием программы Transit, являющейся модифицированной версией программы Dynapion, разработанной в ИТЭФ [19,20]. Данная программа позволяет моделировать прохождение пучка ионов через ускоряющие и фокусирующие элементы, учитывая влияние на динамику пучка пространственного заряда и нелинейности ускоряющих и фокусирующих полей.

Отведенное пространство в ИТЭФ для эксперимента LAPLAS позволяет разместить два четырехъячеечных резонатора, один из которых производит отклонение пучка в горизонтальной плоскости, а другой — в вертикальной. Таким образом, удастся снизить амплитуду отклоняющего поля, увеличив тем самым электриче-

Таблица 1. Параметры пучка на выходе ускорительно-накопительного комплекса ИТЭФ

Параметр	Величина
Тип частиц	Co_{59}^{27+}
Кинетическая энергия, MeV	450
Количество частиц в импульсе	$2 \cdot 10^{12}$
Длительность импульса, ns	50
Нормализованный эффективный x -эмиттанс, mm · mrad	8
Нормализованный эффективный y -эмиттанс, mm · mrad	8

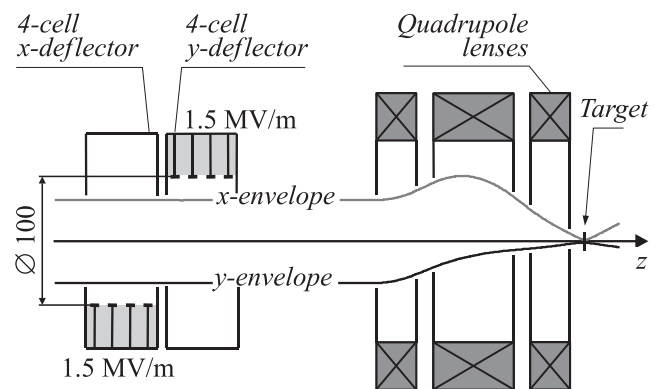


Рис. 8. Структурная схема формирователя квазитрубчатого пучка.

скую прочность резонаторов, и снизить вводимую в резонаторы ВЧ-мощность.

Общая структурная схема устройства формирования квазитрубчатого пучка тяжелых ионов представлена на рис. 8. На ней обозначены два резонатора, триплет квадрупольных линз и мишень. Структура канала, в котором проводился расчет динамики пучка ионов Co_{59}^{27+} , представлена в табл. 2. Параметры отклоняющего резонатора представлены в табл. 3.

На рис. 9 представлено поперечное сечение пучка в области кроссовера. Из рис. 9 видно, что пучок обладает кольцеобразным сечением с внешним радиусом кольца, равным 2 mm, и внутренним — 1 mm, что удовлетворяет требованиям эксперимента LAPLAS на ускорительно-накопительном комплексе ИТЭФ-ТВН (см. рис. 1).

Заключение

В работе описан метод формирования квазитрубчатого пучка тяжелых ионов высокой энергии, необходимого для эксперимента LAPLAS, который заключается в отклонении пучка в двух поперечных направлениях

Таблица 2. Структура канала

Номер элемента	Элемент	Длина, mm	Апертура, mm	Градиент электрического и магнитного полей
1	Горизонтально-отклоняющий резонатор	1472	100	1.5 MV/m
2	Канал дрейфа	184	100	—
3	Вертикально-отклоняющий резонатор	1472	100	1.5 MV/m
4	Канал дрейфа	800	500	—
5	Магнитная линза 1	400	500	13.35 T/m
6	Канал дрейфа	160	500	—
7	Магнитная линза 2	800	500	13.71 T/m
8	Канал дрейфа	160	500	—
9	Магнитная линза 3	400	500	19.23 T/m

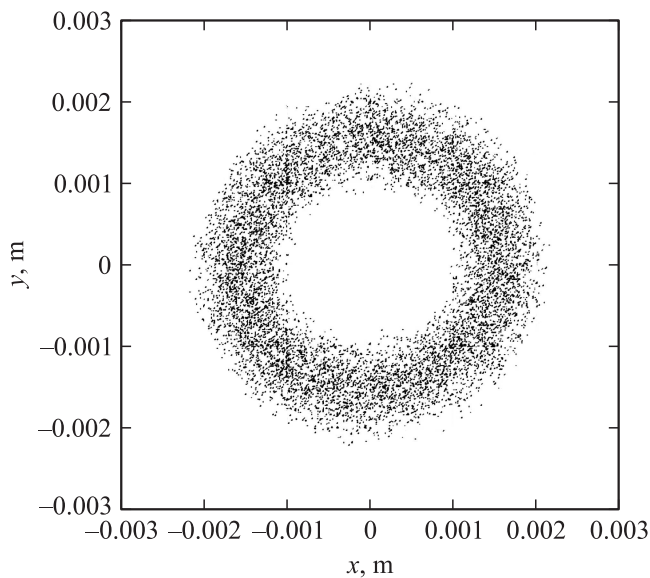


Рис. 9. Поперечное сечение пучка в области наименьшего поперечного размера.

Таблица 3. Параметры отклоняющего резонатора

Параметр	Величина
Тип используемых электродов	Седловидной формы
Диаметр резонатора, мм	342
Длина отклоняющей ячейки, мм	368
Длина отклоняющего электрода, мм	170
Высота отклоняющего электрода, мм	121
Частота отклоняющего поля, МГц	297

с помощью гармонического электромагнитного поля с частотой около 300 МГц. Для формирования квазитрубчатого пучка предложено использовать цилиндрический резонатор с типом колебаний H_{11p}^0 , где p — число вариаций поля по продольной координате, в котором установлены отклоняющие электроды. Предложен критерий оценки однородности отклонения пучка, основанный на учете суммарного воздействия электрической и магнитной компонент отклоняющего поля, при разной форме отклоняющих электродов. С его помощью проведена оптимизация отклоняющих электродов седловидной формы и электродов с выступами на краях. Выбрана форма отклоняющих электродов, обеспечивающих наилучшую однородность отклонения частиц по сечению пучка. Проведен расчет динамики пучка ионов Co_{59}^{27+} в формирователе квазитрубчатого пучка. Моделирование показало, что два четырехъячеечных отклоняющих резонатора и система квадрупольных линз обеспечивает формирование требуемой формы и размера квазитрубчатого пучка на мишени.

Список литературы

- [1] HEDgeHOB Technical proposal, January 2005, The HEDgeHOB Collaboration, www.gsi.de.
- [2] Фортнов В.Е., Хоффманн Д., Шарков Б.Ю. // УФН. 2008. Т. 178. № 2. С. 113.
- [3] Hoffmann D.H.H., Blazevic A., Ni P. et al. // Laser and Particle Beams. 2005. Vol. 23. P. 47–53.
- [4] The Experimental Program with Intense Heavy Ion and Laser Beams, PPAC-3 Roadmap Discussion Meeting, 2006.
- [5] Tahir N.A., Lomonosov I.V., Shutov A. et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2008. Vol. 112. 042025.
- [6] Basko M., Schlegel T., Maruhn J. // Phys. Plasmas. 2004. Vol. 11, N 4. P. 6025.
- [7] Tahir N.A. et al. // Phys. Rev. E. 2001. Vol. 63. P. 016402.
- [8] Minaev S. et al. // Nucl. Instr. and Meth. A. 2010. Vol. 100. P. 1020.
- [9] Neuner U. et al. // Phys. Rev. Lett. 2010. Vol. 25. N 21. P. 4518.
- [10] Баско М.М., Голубев А.А., Губский К.Л. и др. XII Всерос. конф. «Диагностика высокотемпературной плазмы». 2008. P. 163.
- [11] Ядерный синтез с инерционным удержанием. Современное состояние и перспектива для энергетики / Под ред. Б.Ю. Шаркова. М.: Физматлит, 2005. 264 с.
- [12] Sharkov B.Yu., Alexeev N.N., Churazov M.D., Golubev A.A., Koshkarev D.G., Zenkevich P.R. // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A. 2001. Vol. 464. P. 1–5.
- [13] Piriz A.R., Tahir N.A., Hoffmann D.H.H., Temporal M. // Phys. Rev. E. 2003. Vol. 67. P. 017501.
- [14] Chu W., McEvoy M., Nyman M. et al. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1985. Vol. NS-32. N 5. P. 603.
- [15] Chu W.T., Curtis S.B., Llacer J. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1985. Vol. NS-32. N 5. P. 409.
- [16] Noda K., Furukawa T., Inaniwa T. et al. // Proceedings of EPAC08. Italy. Genoa. P. 1818.
- [17] Peter W., Faehl R.J., Kadish A. et al. // Nucl. Sci. 1983. Vol. NS-30, N 4. P. 501.
- [18] Собенин Н.П., Милованов О.С. Техника сверхвысоких частот. М.: Энергоатомиздат, 2007.
- [19] Kolomiets A., Pershin V., Vorobyov I., Yaramishev S., Klabunde Ju. // CERN Courier. 1998. Vol. 38. P. 16.
- [20] Yaramishev S., Barth W., Dahl L., Groening L., Schlitt B. Proceedings of ICAP 2006. France. Chamonix. WEP10.