

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 621.384.6

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
УСКОРЯЮЩЕГО RFQ-РЕЗОНАТОРА¹

©2024г. А. Л. Ситников^{а,*}, Д. Н. Селезнев^а, Г. Н. Кропачев^а,
А. И. Семенников^а, Т. В. Кулевой^а, Л. Е. Поляков^б, А. В. Тельнов^б

^а Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”

Россия, 117218, Москва, ул. Большая Черемушкинская, 25

^б Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (ВНИИЭФ)

Россия, 607188, Нижегородская обл., г. Саров, пр. Мира, 37

*e-mail: aleksey.sitnikov@itep.ru

Поступила в редакцию 13.03.2024 г.

После доработки 18.03.2024 г.

Принята к публикации 11.04.2024 г.

В ККТЭФ НИЦ “Курчатовский Институт” ведутся работы по разработке линейного ускорителя (ЛУ) с отношением массы к заряду $A/Z = 8$, энергией 4 МэВ/н и током 10 мА. ЛУ состоит из ускорителя с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой, работающего на частоте 40 МГц, и двух ускоряющих структур с трубками дрейфа DTL₁ и DTL₂, работающих соответственно на частотах 80 и 160 МГц. Предполагается, что электроды ускорителя с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой будут со смещенными окнами магнитной связи. Общая длина ускорителя с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой будет составлять около 11 метров.

1. ВВЕДЕНИЕ

Резонатор с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (RFQ – radio frequency quadrupole) широко используется в качестве начальной части ионного линейного

¹ Материалы 28-й конференции по ускорителям заряженных частиц “RuPAC’23”, Новосибирск.

ускорителя [1, 2]. В данной работе представлен выбор ускорителя-резонатора с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой и его электродинамические характеристики (ЭДХ).

2. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ RFQ-РЕЗОНАТОРА

В качестве начальной части линейного ускорителя для проекта САРОВ предлагается использовать ускоритель с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой со смещенными окнами связи. Окна связи, с одной стороны, необходимы для разделения рабочей (квадрупольной) моды электромагнитных (ЭМ) колебаний, а с другой – они позволяют уменьшить поперечные габариты резонатора. Окна связи должны быть смещены между горизонтальной и вертикальной линией электродов, что позволяет уменьшить неравномерность ЭМ-поля вдоль электродов [3].

При выборе основных геометрических размеров RFQ-резонатора учитывались следующие условия:

1. Согласно расчету динамики пучка [4], RFQ-резонатор должен работать на резонансной частоте $f_0 = 40.625$ МГц;
2. RFQ-резонатор должен состоять из нечетного числа секций;
3. Длина каждой секции RFQ-резонатора не должна превышать примерно 1300 мм;
4. Диаметр RFQ-резонатора должен быть не больше примерно 1200 мм.

Если первый пункт обусловлен только требованиями к динамике пучка в ускорителе, то пункты 2-4 нуждаются в пояснении. Разделение всего RFQ-резонатора на нечетное количество идентичных секций (при учете смещенных окон связи) упрощает процесс изготовления резонатора. Для удобства монтажа и юстировки электродов длина каждой секции RFQ-резонатора должна позволять достать от торца секции до центра рукой. Поперечные габариты RFQ-резонатора должны быть минимальны без потери конструкционной прочности резонатора. На основании представленных рассуждений были промоделированы две конструкции RFQ-резонатора (см. рис. 1).

Рис. 1. Конструкции RFQ-резонатора: **а** – короткая секция; **б** – длинная секция.

При моделировании ЭДХ каждой конструкции RFQ-резонатора использовались данные, заданные расчетом динамики пучка (см. табл. 1). Моделирование ЭДХ проводилось для немодулированных электродов, поскольку электрическая емкость между ними соответствует средней емкости канала с электродами с нанесенной модуляцией. Размеры окон связи для каждой конструкции оптимизировались так, чтобы с одной стороны максимально сократить

диаметр резонатора, а с другой, чтобы электрод обладал достаточной жесткостью. ЭДХ характеристики RFQ-резонаторов разной конструкции представлены в табл. 2.

Таблица 1. Начальные данные для моделирования ЭДХ RFQ-резонатора

Параметр	Величина
Резонансная частота, МГц	40.625
Напряжение между электродами, кВ	170
Средний радиус апертуры, мм	12.5
Радиус вершины электродов, мм	10
Длина RFQ резонатора, мм	10998

Таблица 2. ЭДХ RFQ-резонатора различной конструкции

Параметр	Величина	
	короткая секция	длинная секция
Собственная добротность	14000	13000
ВЧ-мощность собственных потерь, кВт/м	44	46
ВЧ-мощность собственных потерь, кВт	484	506

Как следует из табл. 2, ЭДХ RFQ-резонаторов существенно не отличаются друг от друга, в то время как размеры секций имеют явные различия (см. табл. 3). Важно отметить, что в RFQ-резонаторе с длинной секцией на одном электроде можно разместить одно целое окно и одно полу-окно связи, тем самым уменьшив консольность электрода. Как следует из данных, представленных в табл. 3, RFQ-резонатор может состоять либо из 9 длинных секций, либо из 11 коротких. В случае использования коротких секций длина RFQ-резонатора увеличится на 2 мм, что не повлияет на динамику пучка.

Таблица 3. Основные геометрические размеры секций RFQ-резонатора различной конструкции.

Параметры	Величина	
	Короткая секция	Длинная секция
Длина секции, мм	1000	1222
Внутренний диаметр секции, мм	850	1025
Длина окон связи, мм	770	760
Высота окон связи, мм	290	350
Ширина основных элементов, мм	250	200

3. ВЛИЯНИЕ ТОРЦЕВЫХ ЗАЗОРОВ НА ЭДХ RFQ-РЕЗОНАТОРА

Одной из главных причин неравномерности ЭМ-поля вдоль резонатора является расстояние между электродами и торцевыми фланцами первой и последней секций. Поле в данных зазорах имеет продольную составляющую. Для того чтобы убрать ускоряющее воздействие ЭМ-поля в данном зазоре, его длину выбирают равной или близкой к целому числу периодов ускорения $\beta\lambda$. Вторым фактором, влияющим на неравномерность поля, является раструб на электродах в первой секции резонатора (см. рис. 2). Раструб необходим для начального формирования сгустков пучка. Его форма задается из динамики пучка. Моделирование неравномерности распределения электрического поля проводилось на полной модели резонатора с короткими секциями.

Пример распределения электрического поля вдоль продольной оси резонатора при одинаковых размерах окон связи представлен на рис. 3.

Рис. 2. Раструб на электродах RFQ-резонатора первой секции.

Рис. 3. Неравномерность электрического поля вдоль продольной оси RFQ-резонатора.

Неравномерность поля составляет $\delta E = 5\%$. Чтобы уменьшить данную неравномерность поля, размеры окон связи в первой и/или последней секциях необходимо изменить. В частности, при длине окон связи в первой и последней секциях равной 763 мм, неравномерность распределения электрического поля вдоль продольной оси составляет

$\delta E = 1\%$ и не превышает вариацию амплитуды поля вдоль структуры, вызванную окнами связи.

Распределение электрического поля вдоль продольной оси резонатора при длине окон связи в первой и последней секциях равной 763 мм представлено на рис. 4.

Рис. 4. Неравномерность электрического поля вдоль продольной оси RFQ-резонатора при длине окон связи в первой и последней секциях равной 763 мм.

4. ТЕПЛОВЫЕ ДЕФОРМАЦИИ RFQ-РЕЗОНАТОРА

Было проведено моделирование нагрева и его влияния на геометрические размеры RFQ-резонатора с короткими секциями с учетом силы тяжести. Моделирование проводилось при начальных условиях, представленных в табл. 4. Моделирование тепловых деформаций RFQ-резонатора проводилось для резонатора, выполненного из нержавеющей стали. Внутренняя часть резонатора покрыта слоем меди толщиной 40 мкм. Коэффициенты излучения различных элементов RFQ-резонатора представлены в табл. 5. При импульсной ВЧ-мощности $P_0 = 450$ кВт средняя ВЧ-мощность составляет $P_{cp} = 135$ Вт. Следовательно, средняя ВЧ-мощность, выделяемая в одной секции RFQ-резонатора, составляет $P_{cp1} = 12$ Вт.

Таблица 4. Начальные данные для моделирования тепломеханических деформаций

Длительность ВЧ-импульса, мкс	300
Частота повторения ВЧ-импульсов, Гц	1
Скважность	3333
Температура окружающей среды, °С	20
Конвективный теплообмен с внешней средой, Вт/(м · К)	10

Таблица 5. Коэффициенты излучения различных элементов резонатора

Внешняя поверхность резонатора	Полированная нержавеющая сталь	0.3
Внутренняя поверхность резонатора	Матовая медь	0.22

В результате моделирования нагрева резонатора от средней ВЧ-мощности определено место в резонаторе с наибольшей температурой. Это вершина электродов в середине окна связи. Температура в данной области составляет 21 °С.

Результаты расчета механических деформаций RFQ-резонатора с нагревом и без нагрева представлены в табл. 6.

Таблица 6. Механические деформации RFQ-резонатора

Оси	без нагрева	с нагревом
$ \Delta x $, мкм	3	5.5
$ \Delta y $, мкм	20	25
$ \Delta z $, мкм	2	10

Из данных, представленных в табл. 5, можно сделать вывод, что основной вклад в деформацию резонатора вносит не нагрев, а его собственный вес. Этот факт необходимо учитывать при разработке как конструкции резонатора, так и системы юстировки электродов.

Механические деформации изменяют геометрические размеры/расположение частей резонатора, что в свою очередь приведет к изменению его ЭДХ. Моделирование ЭДХ резонатора с учетом тепловых деформаций показало, что резонансная частота меняется на $|\Delta f| = 0.6$ кГц.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен выбор и оптимизация параметров секций RFQ-резонатора. Проведено моделирование ЭДХ секций RFQ-резонатора двух различных конструкций. Исследовано влияние торцевых зазоров в первой и последней секциях RFQ-резонатора на распределение ЭМ-поля. Определены параметры окон связи, при которых неравномерность ЭМ-поля вдоль всей структуры RFQ-резонатора составляет не более $\delta E = 1\%$. Проведено моделирование тепловых деформаций структуры. Основной вклад в деформацию структуры вносит собственный вес электродов. Изменение резонансной частоты структуры в результате деформации составляет не более $|\Delta f| = 0.6$ кГц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Тепляков В.А., Мальцев А.П., Степанов В.Б.* Высокочастотная квадрупольная фокусировка (К истории ее возникновения и развития). Препринт ГНЦ РФ. Протвино: Институт физики высоких энергий, 2006.
2. *Kropachev G., Kulevoy T., Sitnikov A.* // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2019. V. 13. № 6. P. 1126. <http://doi.org/10.1134/S1027451019060399>
3. *Andreev V.A., Parisi G.* // Proceedings of EPAC'94. London. 1994. P. 1300.
4. *Кропачев Г.Н., Кулевой Т. В., Ситников А. Л., Скачков В. С., Хабибуллина Е. Р., Сметанин М. Л., Тельнов А. В., Завьялов Н. В.* // Сибирский физический журнал. 2024. (принята к печати).

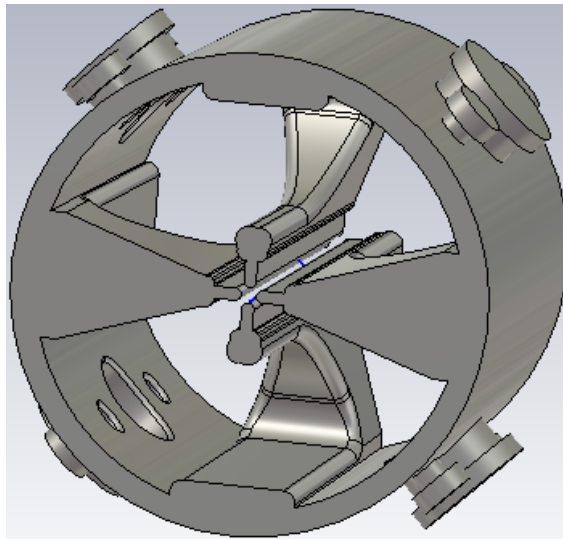
ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Конструкции RFQ резонатора: **а** – короткая секция, **б** – длинная секция.

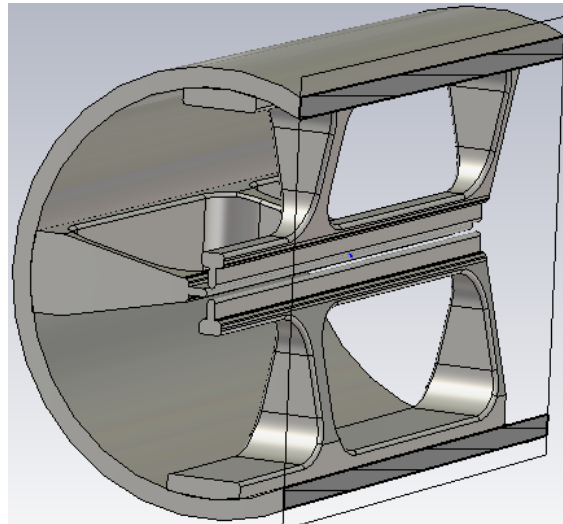
Рис. 2. Раструб на электродах RFQ-резонатора первой секции.

Рис. 3. Неравномерность электрического поля вдоль продольной оси RFQ-резонатора.

Рис. 4. Неравномерность электрического поля вдоль продольной оси RFQ-резонатора при длине окон связи в первой и последней секциях равной 763 мм.



(a)



(б)

Рис. 1.

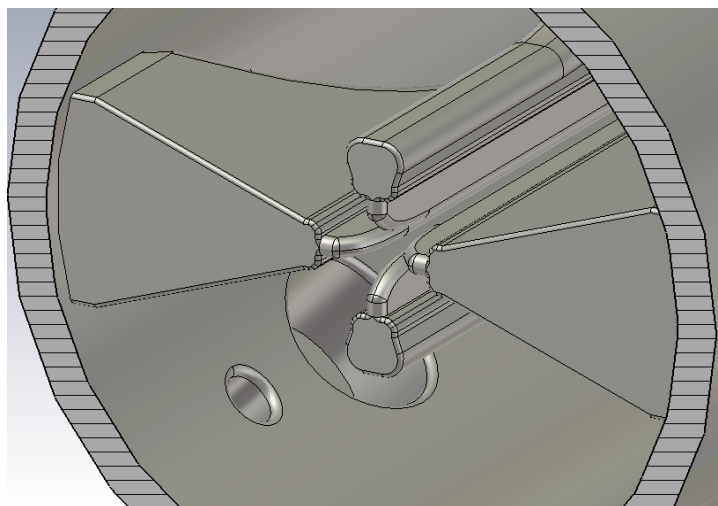


Рис. 2.

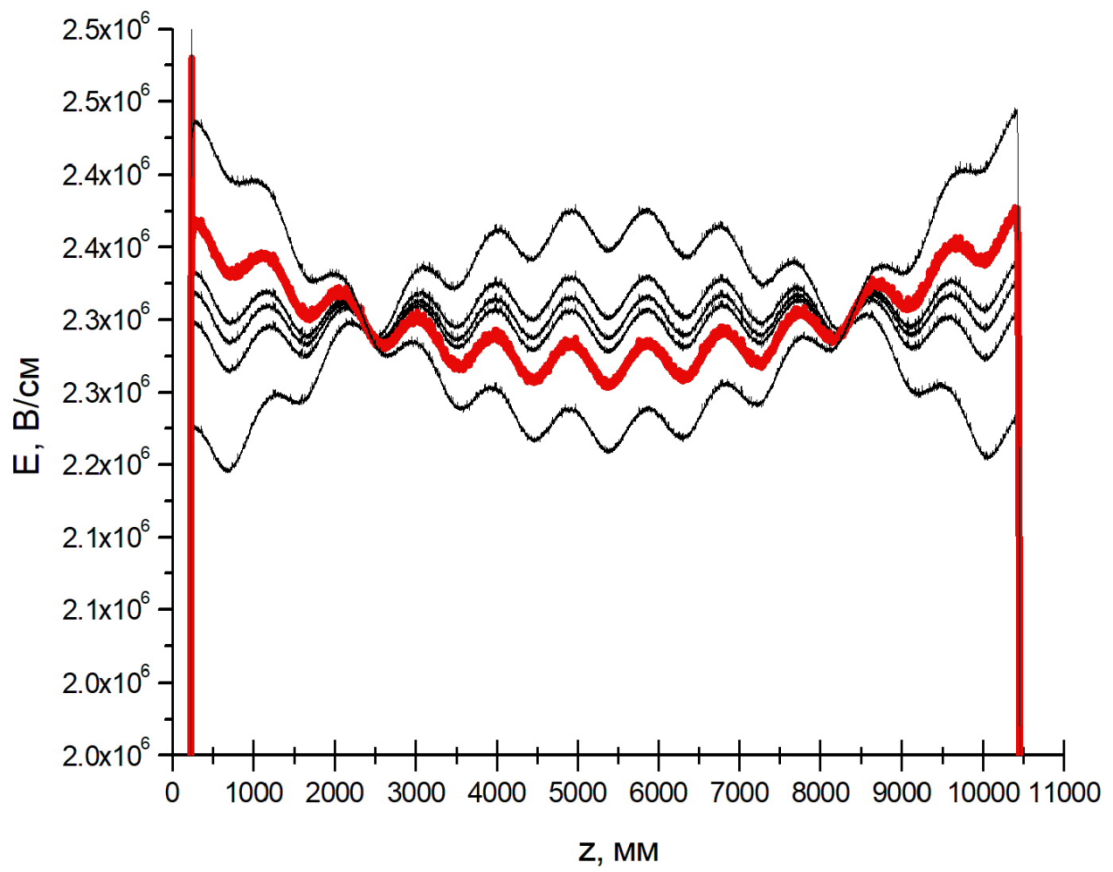


Рис. 3.

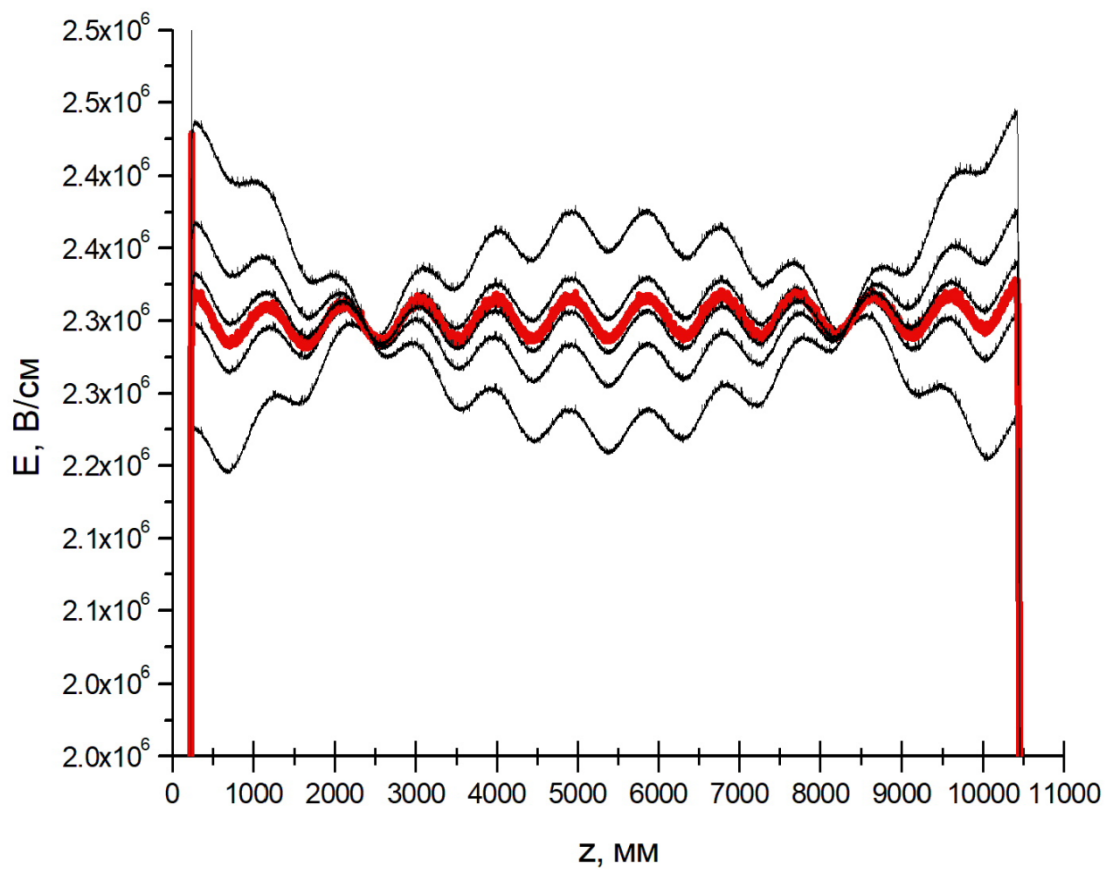


Рис. 4.

Для связи с авторами:

Ситников Алексей Леонидович

aleksev.sitnikov@itep.ru

Селезнев Дмитрий

selesnev@itep.ru

Кропачев Геннадий

kropachev@itep.ru

Для переводчика:

THE RF PARAMETERS OF RFQ LINAC

A. L. Sitnikov¹, D. N. Selesnev¹, G. N. Kropachev¹, A. I. Semennikov¹, T. V.
Kulevoy¹ L. E. Polyakov², A.V. Telnov²

¹*NRC “Kurchatov Institute” KCTEP,*

Moscow, Russia

²*All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics (VNIIEF),*

Sarov, Nizhniy Novgorod Region, Russia

Abstract.

The linear accelerator (linac) with a mass-to-charge ratio of $A/Z = 8$, an energy of 4 MeV/n and a current of 10 mA is under develop at NRC Kurchatov Institute. The linac consists of an accelerator with radio frequency quadrupole (RFQ) operating at a frequency of 40 MHz, and two accelerating structures with drift tubes operating at frequencies of 80 and 160 MHz, respectively.

It is assumed that the electrodes of the RFQ accelerator will be with offset magnetic coupling windows. The total length of the RFQ accelerator will be about 11 meters.