

На правах рукописи

Звягинцев Владимир Львович

**Теоретические и экспериментальные исследования
сверхпроводящих коаксиальных четвертьволновых резонаторов
для линейных ускорителей ионов**

01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

АВТОРЕФЕРАТ

диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Автор:



Москва 2013

Работа выполнена на кафедре электрофизических установок
Национального исследовательского ядерного университета "МИФИ"

Научный руководитель:

доктор технических наук

профессор

Собенин Николай Павлович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических

наук, профессор

Шведунов Василий Иванович,
зав. лабораторией электронных
ускорителей Научно-

исследовательского института
ядерной физики им. Д.В. Скобельцина
Московского государственного
университета им. М.В. Ломоносова

кандидат физико-математических
наук

Кулевой Тимур Вячеславович,
начальник лаборатории перспективных
разработок ускорительного центра
ФГБУ "Государственный научный
центр Российской Федерации институт
теоретической и экспериментальной
физики"

Ведущая организация:

Институт ядерных исследований РАН

Защита состоится "21" июня 2013 г. в 10 ч. 00 мин. в конференц-зале К-608 на
заседании диссертационного совета Д 212.130.01

при Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ»

по адресу: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д.31.

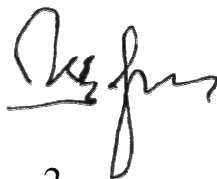
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном
экземпляре, заверенном печатью организации, по адресу НИЯУ МИФИ.

Автореферат разослан "20" мая 2013 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Щедрин И.С.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ

Ускорители тяжёлых ионов широко применяются в фундаментальных исследованиях по ядерной физике, астрофизике, а также в материаловедении, медицине и промышленности. Необходимость ускорения радиоактивных пучков (RIB) придала новый импульс развитию ускорителей тяжелых ионов. Построены и запущены в эксплуатацию такие ускорительные комплексы как ISAC (TRIUMF), ISOLDE (CERN), SPIRAL-I (GANIL), ALPI (INFN). Строятся новые ускорительные комплексы FRIB (MSU/NSCL), SPIRAL-II (GANIL), HIE-ISOLDE (CERN) и другие. Практически во всех новых проектах ускорителей тяжелых ионов используются сверхпроводящие ускоряющие структуры, так как это позволяет существенно уменьшить потребление СВЧ мощности и увеличить темп ускорения, и как следствие, уменьшить энергопотребление и размеры установки. Для ускорителей со скоростями частиц в диапазоне от 0,01 до 0,2 относительно скорости света, благодаря простоте и экономичности, в основном используются ускоряющие структуры в виде коаксиальных четвертьволновых резонаторов. В этой связи задача по разработке методов проектирования, изготовления и эксплуатации сверхпроводящих четвертьволновых резонаторов является актуальной.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является разработка сверхпроводящих четвертьволновых коаксиальных резонаторов для линейных сверхпроводящих ускорителей тяжёлых ионов.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА

Предложена аналитическая методика расчета коаксиальных четвертьволновых резонаторов нескольких типов, позволяющая проводить их оптимизацию на ранних этапах проектирования, и таким образом определять черты прототипа для следующих этапов, где должны быть использованы соответствующие программы автоматического проектирования.

Разработана аналитическая модель для оценки и компенсации эффекта дипольного отклонения пучка в четвертьволновых резонаторах.

На основе анализа электромагнитной модели разработан новый способ травления поверхности сверхпроводящего резонатора, позволяющий скомпенсировать уход частоты, возникающий в процессе его производства и подготовки.

Разработана и оптимизирована конструкция ввода СВЧ мощности в сверхпроводящий четвертьволновый резонатор, обладающая малыми тепловыми потерями по отношению к системе жидкого гелия.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ И ЗНАЧИМОСТЬ

1. Изготовлены и запущены в эксплуатацию на ускорителе ALPI (Acceleratore Lineare Per Ioni –линейный ионный ускоритель) в INFN (Национальный Институт Ядерной Физики в Италии) 23 ниобиевых сверхпроводящих четвертьволновых резонатора. Разработаны три типа ниобиевых сверхпроводящих резонаторов для ускорителя ISAC-II (Isotope Separator and Accelerator) в Канадской Национальной Лаборатории (TRIUMF), изготовлено и запущено в эксплуатацию 40 резонаторов. При этом накоплен уникальный опыт по разработке, изготовлению, испытанию и эксплуатации сверхпроводящих резонаторов.

2. Создано устройство ввода СВЧ мощности в резонатор, обеспечивающее хорошую тепловую развязку и малые тепловыделения, приложенные к системе жидкого гелия. Анализ электромагнитной модели ввода позволил отказаться от металлических контактов, и тем самым устранить загрязнение резонатора металлической пылью, образующейся при их трении.

3. Предложены и реализованы практические методики для настройки сверхпроводящих четвертьволновых резонаторов в процессе их производства и подготовки к работе.

4. Разработаны аналитические модели, пригодные для расчётов и оптимизации параметров и оценки дипольного отклонения пучка в коаксиальных четвертьволновых резонаторах.

ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Результаты расчетов, оптимизации и экспериментального исследования сверхпроводящих коаксиальных четвертьволновых резонаторов.
2. Электромагнитная модель четвертьволнового резонатора, позволяющая вычислить уход резонансной частоты, получающийся после травления поверхности резонатора при его производстве.
3. Экспериментальное исследование и расчет мультипакторного разряда в разработанных резонаторах.
4. Создание конструкции ввода СВЧ мощности в четвертьволновый резонатор, обладающего малыми тепловыми потерями по отношению к системе жидкого гелия.
5. Разработка, изготовление, испытание и запуск в эксплуатацию на ускорителе ISAC-II (TRIUMF, Канада) 40 коаксиальных сверхпроводящих четвертьволновых резонаторов и 23 резонаторов ALPI (INFN, Италия).

СВЯЗЬ РАБОТЫ С НАУЧНЫМИ ПРОГРАММАМИ

Работа выполнена в рамках проектов ALPI INFN LNL (Италия) и ISAC-II Канадской Национальной Лаборатории TRIUMF (Ванкувер, Канада): в 1993-2003 годах в LNL-INFN проводилась работа по изготовлению и испытаниям 23 сверхпроводящих резонаторов для линейного ускорителя тяжёлых ионов ALPI, в 2000-2003 годах LNL-INFN в коллаборации с TRIUMF проводилась работа по разработке и изготовлению 20 четвертьволновых резонаторов для первой секции ISAC-II, в 2003-2010 годах в TRIUMF проводилась работа по испытаниям и запуску в эксплуатацию 20 резонаторов первой секции ISAC-II, разработке, изготовлению, испытанию и запуску в эксплуатацию 20 резонаторов второй секции ISAC-II.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ

Основные результаты и положения диссертации были представлены на российских и международных конференциях, в частности:

7th International Conference on Heavy Ion Accelerator Technology, Canberra, Australia, 1995

PAC 2001, Chicago, Illinois, 2001; PAC 2005, Knoxville, Tennessee, USA, 2005; PAC 2007, Albuquerque, New Mexico, USA, 2007; PAC 2009, Vancouver BC, Canada, 2009

SRF 2003, Lubeck, Germany, 2003; SRF 2005, Ithaca, NY, USA, 2005; SRF 2007, Beijing, China, 2007; SRF 2009 Workshop, Berlin, Germany, 2009; SRF2011 Conference, Chicago, USA, 2011

LINAC 2004, Lubeck, Germany, 2004; LINAC 2008, Victoria BC, Canada, 2008; LINAC10 Conference, Tsukuba, Japan, 2010

EPAC 2006, Edinburgh, Scotland, 2006

APAC 2007, Indore, India, 2007

RUPAC 2008, Zvenigorod, Russia, 2008; RUPAC 2010 Conference, Protvino, Russia, 2010; RUPAC 2012 Conference, Peterhof, Russia, 2012

AIP Conf. 2010

ПУБЛИКАЦИИ

Основные результаты диссертации опубликованы в 42 печатных трудах, в том числе, в 3 статьях, в журналах, входящих в перечень ВАК.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы. Объем диссертации составляет 120 страниц. Список литературы включает 70 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснованы актуальность и цель диссертации. Сформулирована цель и задачи исследований.

Первая глава "Оптимизация ВЧ структуры четвертьволновых резонаторов" посвящена анализу и аналитической методике оптимизации ускоряющего двухзазорного тракта и коаксиальной структуры.

Рассмотрим двухзазорный ускоряющий тракт (рис. 1а) в аспекте получения максимального фактора пролётного времени $T_o = T(\beta_o)$, т.е. его эффективности, на заданной относительной скорости частиц β_o , путём оптимизации параметра зазора $a = g/d$, представляющего собой отношение длины ускоряющего зазора g и межзазорного расстояния d . Для рассмотрения проблемы в общем виде, в качестве аргумента удобно использовать относительную скорость частицы, приведённую к геометрической оптимальной скорости $y = \beta/\beta_g$. Геометрическая оптимальная скорость для двухзазорного ускоряющего резонатора равна отношению межзазорного расстояния к половине длины волны ускоряющего поля $\beta_g = 2d/\lambda$.

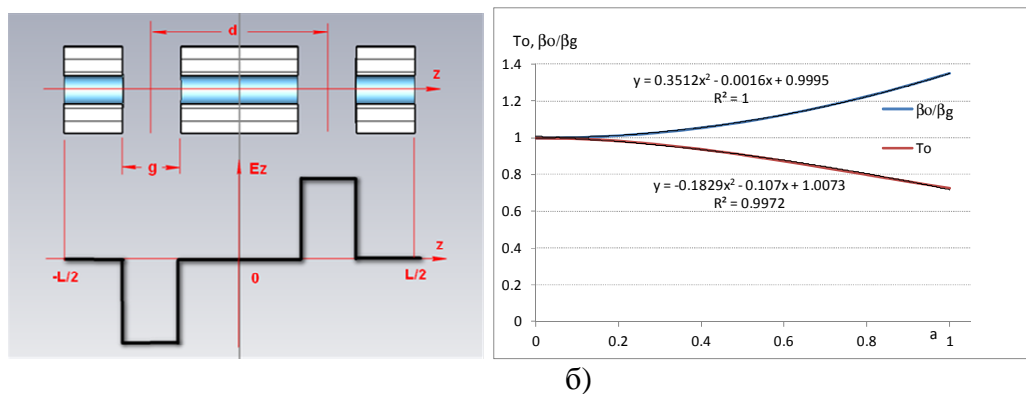


Рис. 1. Ускоряющий тракт двухзазорного резонатора (а) и его основные параметры T_o и β_o/β_g как функции от приведённой длины зазора a .

В приближении, что частица движется с постоянной скоростью и распределение ускоряющей компоненты поля в зазорах равномерно, выражение для фактора пролётного времени выглядит в виде:

$$T = \frac{\sin \frac{\pi a}{2y}}{\frac{\pi a}{2y}} \sin \frac{\pi}{2y} \quad (1)$$

Численный анализ выражения (1) по параметру $a=g/d$ приводит к полиномиальным выражениям для максимального значения фактора пролётного времени (при оптимальной скорости), а также отношения оптимальной и геометрической скоростей частицы:

$$T_o = -0.1829 \cdot a^2 - 0.1070 \cdot a + 1.0073 \quad (2)$$

$$\frac{\beta_o}{\beta_g} = 0.3512 \cdot a^2 - 0.0016 \cdot a + 0.9995 \quad (3)$$

Из выражения (2) следует, что при уменьшении приведённой длины зазора a фактор пролётного времени T_o растёт. При этом, с уменьшением зазора растёт ёмкость, нагружающая резонатор, что приводит к снижению шунтового сопротивления структуры и росту коэффициента перенапряжения по электрическому полю E_p/E_a (отношение пиковой напряжённости к среднему значению ускоряющего поля). Из графика на рис. 1б видно, что при $a < 0,3$ рост T_o замедляется с уменьшением приведённой длины зазора a . Величина a может быть оптимизирована по шунтовому сопротивлению и E_p/E_a . В качестве первого приближения можно выбрать значение $a=0,3$ как наиболее выгодное, с точки зрения получения максимальной эффективности структуры, выражение (3) показывает, что при этом оптимальная скорость частицы β_o примерно на 3% выше скорости β_g .

В рассмотренном случае предполагалось, что радиус апертуры r_a пренебрежимо мал. Учёт радиуса апертуры даёт эффективное увеличение длины зазоров за счёт провисания поля в пространство дрейфа. Согласно известному полуэмпирическому выражению, эффективное значение длины зазора вычисляется следующим образом:

$$g_e = \sqrt{g^2 + 4r_a^2} \quad (4)$$

Приведённая методика была применена для вычисления T_o и β_o по геометрическим параметрам ускоряющих зазоров для четвертьволновых резонаторов ISAC-II. Сравнение с результатами трехмерного моделирования в программе CST Microwave Studio показало, что расхождение полученных величин находится в пределах $\pm 1\%$.

На рис. 2 изображена модель четвертьволнового резонатора и его эквивалентная схема, представляющая отрезок длинной линии, замкнутой накоротко на одном конце и разомкнутой на другом конце. При этом, на разомкнутом конце линия имеет ёмкость, образованную трубкой дрейфа и ускоряющими зазорами. Четвертьволновый резонатор работает на частоте, при которой длина линии приблизительно равна длине волны электромагнитных колебаний $l \approx \lambda_0/4$. На разомкнутом конце образуется пучность электрического поля, которое используется для ускорения частиц в двух зазорах.

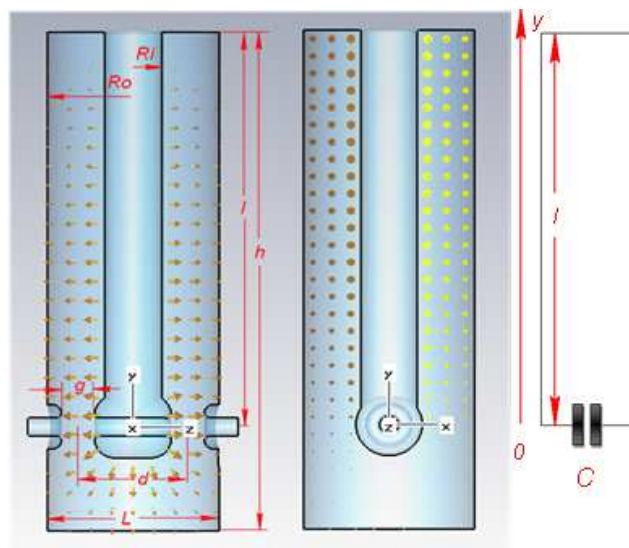


Рис. 2. Четвертьволновый коаксиальный резонатор и его эквивалентная схема.

На рис. 3 представлены результаты анализа эквивалентной схемы резонатора в виде графиков коэффициента перенапряжения по магнитному полю B_p/E_a , приведённых величин шунтового к поверхностному сопротивлению r_a' , геометрического фактора G' и шунтового сопротивления к добротности (R_c/Q) в зависимости от отношения внутреннего и наружного радиусов коаксиальной линии R_i/R_o . При этом для упрощения выкладок, рассматривается четвертьволновая линия ($l = \lambda_0/4$) без учёта ёмкости на разомкнутом конце ($C=0$) и фактора пролётного времени ($T=1$). Можно выделить два основных критерия оптимизации:

1. Минимизация B_p/E_a , которая даёт возможность увеличения ускоряющего поля при ограничении величины магнитного поля: практическая

максимальная величина пикового магнитного поля составляет $B_p \approx 70$ мТл. Минимум $B_p/E_a \approx 9$ мТл/(МВ/м) достигается при $R_i/R_o = 0,36$.

2. Получение максимально возможного приведённого к поверхностному сопротивлению шунтового сопротивления r_a' ; при этом форма резонатора оптимизируется на максимальную эффективность преобразования СВЧ мощности в ускоряющее поле, которая достигается при $R_i/R_o = 0,12$

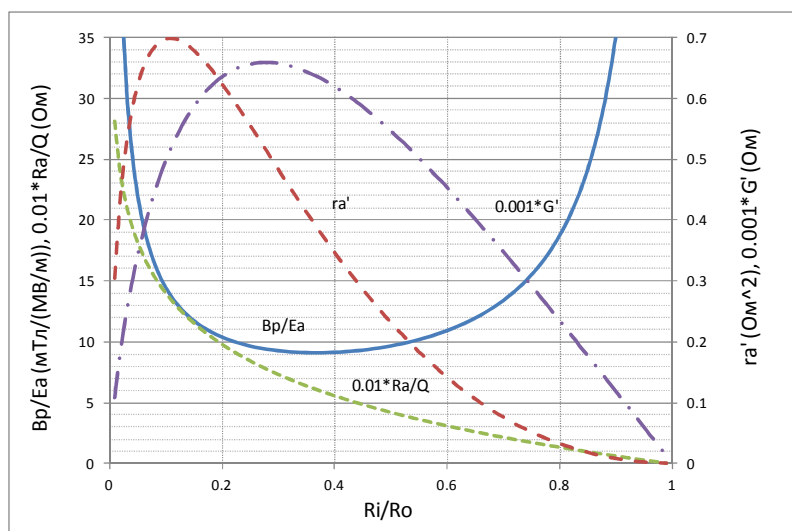


Рис.3 Параметры четвертьволнового резонатора в зависимости от соотношения радиусов внутреннего и наружного проводников коаксиальной линии при $T=1$ и $l=\lambda_o/4$.

Компромисс между максимальным значением r_a' и минимальным B_p/E_a находится в диапазоне $R_i/R_o = 0,12 \dots 0,36$. Для увеличения рабочего градиента ускоряющего поля необходимо минимизировать B_p/E_a . Для получения максимальной эффективности использования криогенной мощности надо увеличивать шунтовое сопротивление r_a' . При изменении R_i/R_o от 0,36 до 0,3 шунтовое сопротивление возрастает на 25% при всего лишь 5% росте B_p/E_a . Соотношение $R_i/R_o = 0,3$ обеспечивает практический компромисс при проектировании резонатора.

Применение данной методики для расчёта параметров B_p/E_a , G , R_a/Q четвертьволновых резонаторов ускорителя ISAC-II даёт результаты, которые находятся в хорошем согласии с данными трехмерного моделирования в программе CST Microwave Studio: расхождение результатов находится в пределах $\pm 10\%$.

Вторая глава “Анализ дипольного отклонения пучка в четвертьволновом резонаторе” посвящена подробному рассмотрению этого эффекта и методов его компенсации. Предложен аналитический подход для расчёта дипольного отклонения пучка и методов коррекции в четвертьволновых резонаторах.

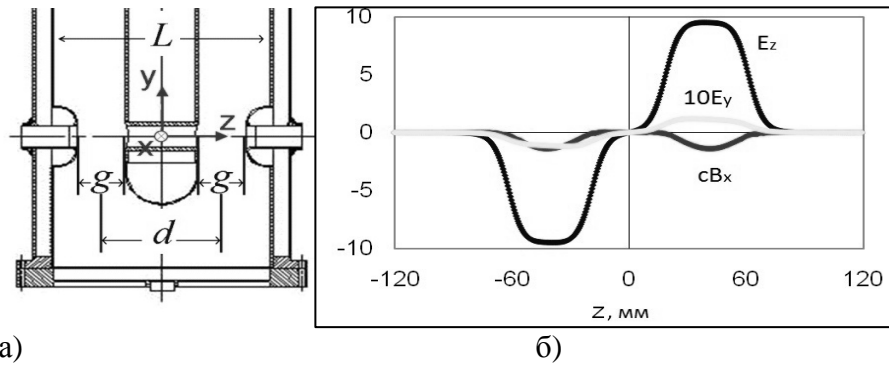


Рис. 4. Распределение компонент поля по оси пучка (а) и ускоряющий тракт четвертьволнового резонатора (б).

На оси пучка четвертьволнового резонатора, кроме ускоряющей компоненты $E_z(z,t)=E_z(z)\cos(\omega t)$, присутствуют поперечные электрические и магнитные компоненты поля, отклоняющие частицу в вертикальном направлении: поперечная компонента электрического поля $E_y(z,t)=E_y(z)\cos(\omega t)$, созданная вертикальной несимметрией резонатора, и поперечная компонента магнитного поля $B_x(z,t)=B_x(z)\sin(\omega t)$, обусловленная рабочей ТЕМ модой резонатора.

Дипольное вертикальное отклонение пучка $\Delta y'$ может быть выражено через отношение $\Delta p_y/p_z$, где Δp_y - приращение поперечного импульса частицы и p_z - продольный импульс частицы от магнитного и электрического поля:

$$\Delta p_{yB} = qe \beta c \int_{t(-L/2)}^{t(L/2)} B_x(z, t) dt \quad (5)$$

$$\Delta p_{yE} = qe \int_{t(-L/2)}^{t(L/2)} E_y(z, t) dt \quad , \quad (6)$$

где q - зарядовое состояние ускоряемой частицы, e - заряд электрона, L - активная длина резонатора по оси пучка, и z - положение частицы в момент времени t . Для упрощения выкладок, для выражений (5,6) используется приближение, заключающееся в предположении постоянства скорости частицы β в ускоряющем тракте резонатора и прямоугольности формы распределения

поля на оси пучка. В результате проведённого анализа, при использовании параметров четвертьволнового резонатора, рассчитанных на оси пучка, получено выражение для отклонения частицы при $y \ll R$:

$$\Delta y'(E_a, \phi, \beta, y) = \frac{qeE_a L \sin \phi}{Am_o c^2 T_{Ez}(\beta_0)} \left\{ D_{Bx}(\beta) + \sum_{j=1}^n D_{Eyj}(\beta) + D_{RF}(\beta, y) \right\}, \quad (7)$$

В этом выражении использованы параметры резонатора для получения отклонения, создаваемого магнитным полем, вертикальной компонентой электрического поля и ВЧ дефокусировкой:

$$\begin{aligned} D_{Bx}(\beta) &= \frac{G_{Bx}}{\beta\gamma} T_g(\beta, g_{Bx}) \sin\left(\frac{\pi d_{Bx}}{\beta\lambda}\right) \\ D_{Eyj}(\beta) &= \frac{G_{Eyj}}{\beta^2\gamma} T_g(\beta, g_{Eyj}) \cos\left(\frac{\pi d_{Eyj}}{\beta\lambda}\right) \\ D_{RF}(\beta, y) &= -\frac{\omega}{2\beta^3\gamma^3 c} T_g(\beta, g_{Ez}) \sin\left(\frac{\pi d_{Ez}}{\beta\lambda}\right) y \\ G_{Bx} &\equiv \frac{cB_{xo} g_{Bx}}{E_{zo} g_{Ez}} & G_{Eyj} &\equiv \frac{E_{yoj} g_{Eyj}}{E_{zo} g_{Ez}} \end{aligned} \quad (8)$$

Выражение (7) позволяет вычислить поперечное отклонение пучка во всём диапазоне скоростей β при помощи нескольких геометрических параметров, относящихся к отдельным компонентам поля, давая возможность анализа и компенсации оптимизацией соотношения компонент поля. На рис. 5 представлены графики, характеризующие эффект отклонения пучка в четвертьволновом резонаторе на оптимальную скорость частиц $\beta_0=0,075$ на частоте 106 МГц, при градиенте ускоряющего поля $E_a=1$ МВ/м и синхронной фазе $\phi=-30^\circ$, для частиц с отношением заряда к массе $q/A=1$. Линии показывают данные аналитической модели, ромбы представляют собой данные численного расчёта траекторий. Здесь представлены графики приращения энергии ΔW , дипольного отклонения пучка $\Delta y'$, электрическая $\Delta y'_{Ey}$, и магнитная $\Delta y'_{Bx}$ составляющие дипольного отклонения. Результаты аналитической модели находятся в хорошем соответствии с численными данными расчёта траектории пучка.

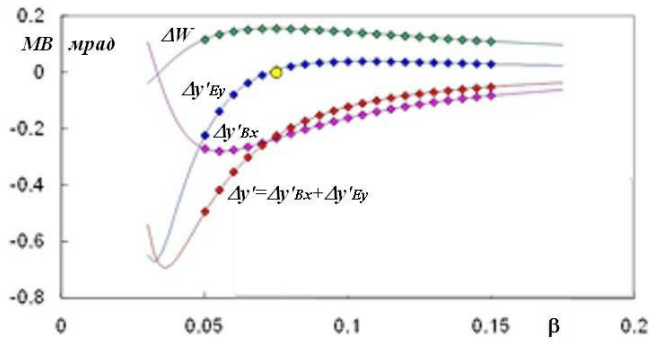


Рис. 5. Эффект дипольного отклонения пучка в четвертьволновом резонаторе, рассчитанный по аналитической модели (линии) и численно (ромбы).

Данный подход позволяет проанализировать способы компенсации дипольного отклонения пучка в четвертьволновых резонаторах:

1. Использование аксиально-симметричной трубки дрейфа в форме тороида на конце внутреннего проводника четвертьволнового резонатора (рис. б) приводит к уменьшению магнитного поля в зазорах, и как следствие, к уменьшению отклонения пучка. На рис. 6 представлен пример применения аксиально-симметричной трубки дрейфа в коаксиальном четвертьволновом резонаторе при оптимальной скорости $\beta_0=0,11$ на частоте $f=141$ МГц. На графике приведены данные расчёта компоненты отклонения, обусловленной магнитной компонентой поля при $E_a=1$ МВ/м, $A/q=1$ и $\phi=-30^\circ$. Нижняя линия соответствует резонатору с простым цилиндрическим внутренним проводником, а верхняя - резонатору с аксиально-симметричной трубкой дрейфа. При этом геометрический параметр G_{Bx} уменьшается с 0,25 до 0,16.

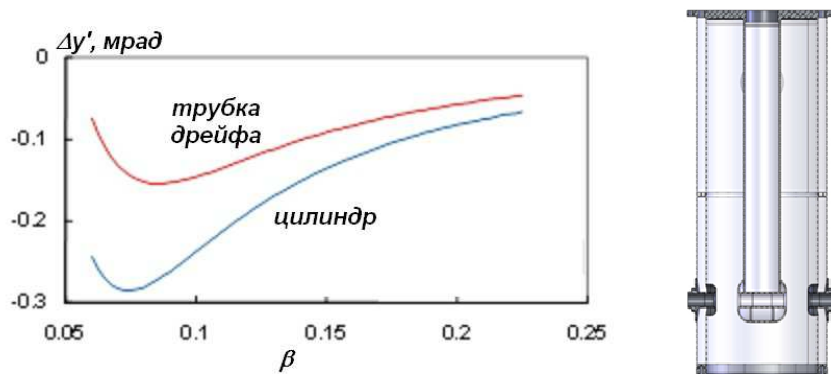


Рис. 6. Уменьшение отклонения пучка, обусловленного магнитной компонентой поля при использовании аксиально-симметричной трубки дрейфа.

2. Подбором смещения пучка по вертикали относительно оптической оси апертуры можно использовать ВЧ дефокусировку для компенсации магнитной компоненты отклонения пучка. Таким образом, магнитная и электрическая компоненты отклонения пучка действуют в противофазе и компенсируют друг друга. На рис. 7 представлен пример компенсации дипольного отклонения за счёт смещения пучка от оси в резонаторе на $\beta_0=0,11$ и $f=141$ МГц. Линиями представлены результаты аналитической модели, а ромбами – данные расчёта в программе TraceWin: нижняя кривая – первоначальное отклонение $\Delta y'$, средняя - отклонение при смещении пучка на 1,7 мм вверх от оси, верхняя – приращение энергии ΔW .

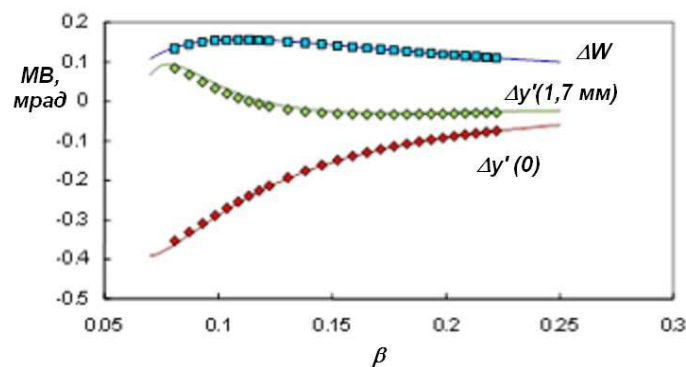


Рис. 7. Компенсация дипольного отклонения за счёт смещения пучка в резонаторе на 1,7 мм вверх от оси.

3. Геометрические параметры G_{Eyj} и G_{Bx} , которые определяют отклоняющее воздействие компонент электрического и магнитного полей, могут быть уменьшены за счёт изменения формы резонатора, однако при этом магнитная компонента не может быть устранена полностью. В Аргонской Национальной Лаборатории (США) был разработан новый метод компенсации отклонения пучка, который может быть применён в резонаторах на относительно высокие скорости частиц. Он основан на формировании вертикальной компоненты электрического поля E_y для компенсации отклонения пучка. Придавая наклон поверхностям портов, можно создать пики разных полярностей вертикальной компоненты электрического поля E_y . На рис. 8 показан пример коррекции отклонения пучка в четвертьволновом резонаторе

на частоту 161 МГц и $\beta_0=0,16$. Справа вверху на рис. 8 показано распределение компонент поля на оси E_z , cB_x и $10E_y$ с корректирующими пиками, произведёнными девятиградусным наклоном портов пучка на наружном и внутреннем проводниках. Справа внизу на рис. 8 показано отклонение пучка протонов при градиенте ускоряющего поля $E_a=1$ МВ/м и синхронной фазой $\phi=-30^\circ$. Ромбами показано полное отклонение $\Delta y'$, рассчитанное с реальными полями в программе TraceWin. Аналитические результаты показаны линиями: электрическое $\Delta y'_{Ey}$, магнитная компонента $\Delta y'_{Bx}$, а также полное отклонение $\Delta y'$.

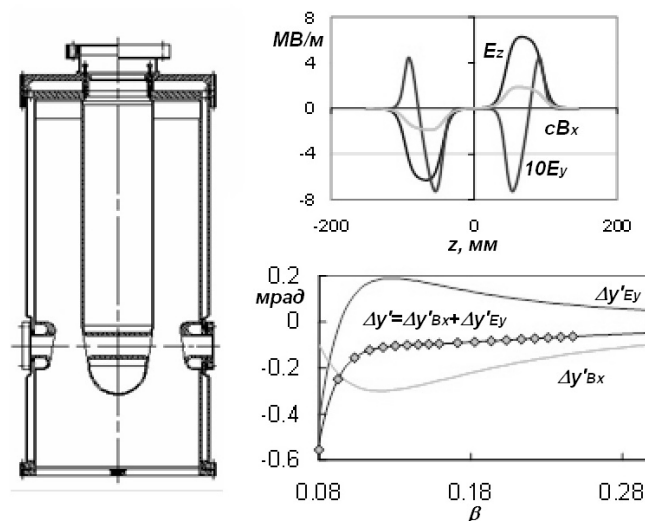


Рис. 8. Компенсация дипольного отклонения пучка в четвертьволновом резонаторе за счёт изменения формы ускоряющих зазоров.

Результаты аналитической модели совпадают с численными данными. Они показывают, что отклонение пучка в четвертьволновых резонаторах на скоростях до $\beta_0 \sim 0,1$ может быть эффективно скомпенсировано за счёт смещения оси пучка относительно геометрической оси апертуры. Наклон портов пучка и краёв трубки дрейфа эффективно работает для компенсации вплоть до скоростей $\beta_0 \sim 0,15$. Для более высоких скоростей коррекция становится проблематичной в связи с искажением поля.

Третья глава “Разработка четвертьволнового резонатора для линейного ускорителя ионов ISAC-II” описывает результаты разработки конструкции сверхпроводящего резонатора, а также устройств,

обеспечивающих его работу: поглотитель механических колебаний, подстройки частоты и ввода СВЧ мощности.

Конструкция сверхпроводящего четвертьволнового коаксиального двухзазорного резонатора, разработанного для второй секции ускорителя ISAC-II, представлена на рис. 9. Резонатор в номинальном режиме работы, при температуре жидкого гелия 4,2К и 7 Вт рассеиваемой мощности, при оптимальной скорости частиц $\beta_0=0,11$, обеспечивает эффективное ускоряющее напряжение 1,08 МВ. При этом градиент ускоряющего поля равен $E_a=6$ МВ/м, пиковые значения электрического и магнитного полей составляют соответственно 30 МВ/м и 60 мТл. Параметры резонатора представлены в таблице 1.

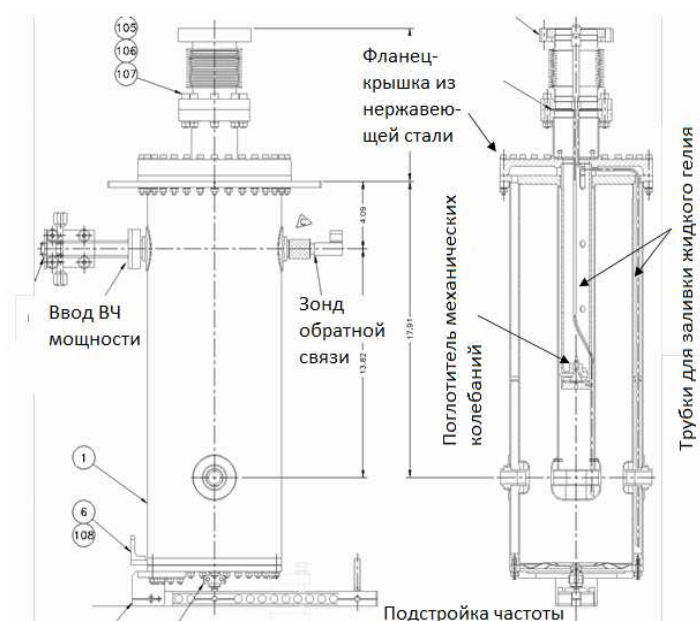


Рис. 9. Конструкция четвертьволнового сверхпроводящего резонатора на частоте 141 МГц с оптимальной скоростью частиц $\beta_0=0,11$ для ускорителя ISAC-II.

Конструкция резонатора представляет собой ниобиевый резервуар с двойными стенками и полым цилиндром внутреннего проводника для охлаждения жидким гелием. Система трубок для заливки жидкого гелия обеспечивает оптимальный режим захолаживания. Малая толщина стенок (2 мм) делает резонатор чувствительным к колебаниям давления жидкого гелия и акустическим вибрациям, которые воздействуют на его резонансную частоту. Относительно медленные колебания давления гелия компенсируются

устройством подстройки частоты, мотор которого, находящийся снаружи криомодуля, через рычаговый механизм производит деформацию днища резонатора. Деформация днища резонатора позволяет производить корректировку резонансной частоты в полосе 30 кГц.

Таблица 1.

Параметры четвертьволнового сверхпроводящего резонатора для секции высоких скоростей ускорителя ISAC-II.

Рабочая частота	f	МГц	141,4
Оптимальная скорость	β_0		0,113
Фактор пролётного времени	T_0		0,938
Длина зазора	g	мм	35
Межзазорное расстояние	d	мм	115
Активная длина ускорения	L	мм	180
Высота	h	мм	560
Частота механического резонанса	f_m	Гц	150
Электрический коэффициент перенапряжения	E_p/E_a		4,9
Магнитный коэффициент перенапряжения	B_p/E_a	мТл/(МВ/м)	10
Геометрический фактор	$G=RsQ_0$	Ом	25,6
Приведённое шунтовое сопротивление	R_a/Q	Ом	545
Удельная накопленная энергия	U/E_a^2	Дж/(МВ/м) ²	0,067
Чувствительность к давлению гелия	df/dp	Гц/мБар	-1
Чувствительность устройства подстройки	df/dh	кГц/мм	10

Устройство подавления механических колебаний представляет собой нагрузку (рис. 10), расположенную на плоскости внутри центрального проводника резонатора (рис. 9), колебания которого приводят её в движение. Энергия акустических колебаний преобразуется в работу силы трения между нагрузкой и плоскостью, при этом происходит 10 кратное ослабление колебаний среды, воздействующих на резонатор.



Рис. 10. Поглотитель механических колебаний для четвертьволнового сверхпроводящего резонатора.

Поглотитель механических колебаний позволяет стабилизировать частоту резонатора в полосе ± 10 Гц. Однако полоса пропускания сверхпроводящего резонатора в номинальном режиме составляет всего $\sim 0,5$ Гц. Так как ток пучка в ускорителе ISAC-II практически не нагружает резонатор, то приходится расширять его полосу пропускания за счёт пересвязи ввода СВЧ мощности с резонатором. Ввод СВЧ мощности (рис. 11) представляет регулируемую индуктивную петлю. Связь изменяется за счёт перемещения петли относительно стенки резонатора. При расширении полосы пропускания до ~ 40 Гц падающая мощность в резонатор должна быть ~ 200 Вт. При этом 7 Вт рассеивается на стенках резонатора, 10 Вт - на петле связи ввода мощности, а остальная мощность, за вычетом потерь в линии передачи, выводится через циркулятор наружу и рассеивается на балластной нагрузке. Внутренняя жила петли связи находится в хорошем тепловом контакте корпусом ввода через керамический изолятор, Корпус ввода охлаждается потоком жидкого азота через специально устроенный канал теплоотвода, который позволил уменьшить нагрузку на систему жидкого гелия до $1/4$ Вт.

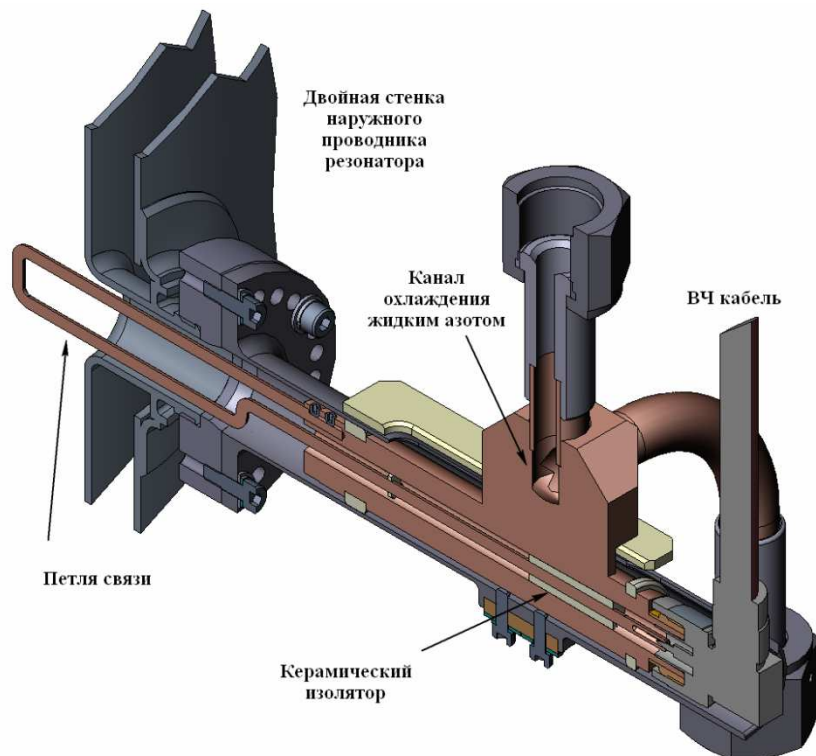


Рис. 11. Конструкция ввода СВЧ мощности для четвертьволнового сверхпроводящего резонатора ISAC-II.

Четвёртая глава “*Экспериментальные исследования сверхпроводящих четвертьволновых резонаторов*” описывает практическую сторону предмета данной работы.

При производстве и подготовке поверхности сверхпроводящих резонаторов данного вида частота может отклониться на величину порядка 100 кГц, но диапазон устройства подстройки частоты резонаторов составляет всего 30 кГц. Был разработан и успешно использован метод компенсации ухода резонансной частоты путём дифференцированного травления (ВСП) поверхности ниобиевого резонатора. Метод заключается в разделении четвертьволнового резонатора по высоте на две половины. При этом чувствительность к частоте по глубине травления каждой из половин, противоположна по знаку, это даёт возможность сдвигать частоту резонатора как вверх, так и вниз, варьируя глубину травления каждой половины. По приведённой методике, в зависимости от необходимого сдвига частоты, вычисляются длительности процесса травления каждой из половин.

Было проведены расчёты и измерения уровней мультипактора. Как показали расчёты и измерения, уровень поля сильного мультипактора в рассмотренных резонаторах на три порядка ниже, чем рабочее поле. Таким образом он представляет проблему только тем, что срывает установление в резонаторе рабочего уровня поля, никак не проявляясь после выхода резонатора в рабочий режим. Разработан и успешно внедрён способ кондиционирования мультипакторного разряда в резонаторах ускорителя ISAC-II.

Было проведено изучение влияния процесса захолаживания резонаторов на их добротность, проявляющееся в выходе на поверхность ниобия примесей водорода на поверхности (Q-disease). Рассмотрено влияние магнитного поля на рабочие параметры резонатора. Для всех резонаторов первой и второй секций ISAC-II было проведено кондиционирование и испытание в тестовом криостате. Зависимости добротностей Q_o от величины ускоряющего поля E_a

резонаторов первой секции ускорителя представлены на рис. 12. В результате проведённых испытаний было установлено соответствие резонаторов рабочим требованиям ускорителя ISAC-II, т.е. при номинальной рассеиваемой мощности на резонаторе 7 Вт величина ускоряющего градиента E_a должна быть не меньше 6 МВ/м.

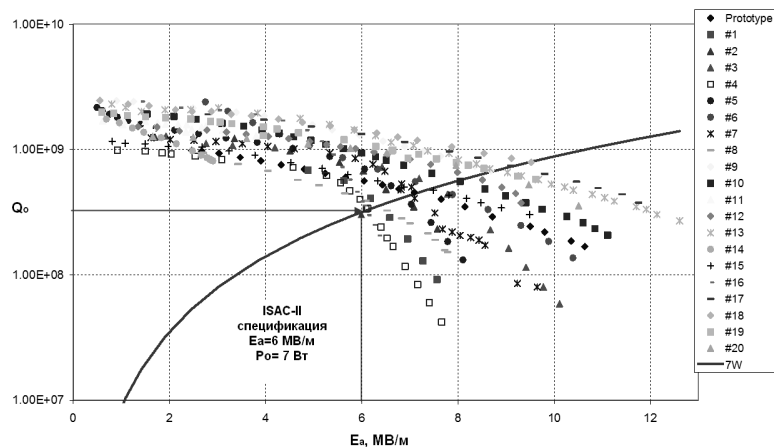


Рис. 12. Результаты испытаний сверхпроводящих четвертьволновых резонаторов для первой секции ускорителя ISAC-II.

40 резонаторов было установлено в рабочих криомодулях двух секций ускорителя ISAC-II: секции средних и высоких скоростей. Было замечено, что после установки в рабочие криомодули характеристики $Q_o(E_a)$ резонаторов ухудшаются примерно на 5%, это связано с тем, что вакуумный объём резонаторов сообщается с общим вакуумным объёмом криомодуля. В данном случае используется система криомодуля с общим вакуумом. Она проще и дешевле системы с разделённым вакуумом, но уступает в части качества. Выбор системы криомодулей с общим вакуумом был оправдан бюджетными ограничениями для достижения поставленных целей. Первая секция ускорителя запущена в эксплуатацию в 2006 году, вторая – в 2010.

В процессе работы часть резонаторов выходила из строя, но при этом, благодаря модульной структуре ускорителя, система сохраняла работоспособность, после соответствующей подстройки режимов для компенсации потерь звеньев ускорения. Средняя величина ускоряющего поля E_a для резонаторов первой секции составляет 6,6 МВ/м, что на 10% выше

проектной величины. Во второй секции ускорителя средняя величина $E_a=5,6$ МВ/м, что на 7% ниже проектного, это объясняется выбранной глубиной травления ниобия, которая в два раза меньше, чем для резонаторов первой секции, и составляет ~50 мкм. Такое решение было принято для того, чтобы уменьшить риск утечки гелия через сварные швы резонатора. Дальнейшая работа направлена на усовершенствование технической инфраструктуры и обслуживание резонаторов в процессе эксплуатации.

Аналогичная работа была проделана автором в 1998-2003 г.г., в лаборатории INFN-LNL (Италия), где были изготовлены и запущены в эксплуатацию при его участии 23 сверхпроводящих резонатора на ускорителе ALPI/PIVAE.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Разработаны аналитические модели для расчёта и оптимизации параметров сверхпроводящих двухззорных четвертьволновых ускоряющих резонаторов, а также расчета и компенсации дипольного отклонения пучка. Предложенные модели использованы при разработке сверхпроводящих резонаторов и хорошо согласуются с расчетными данными численного моделирования.

Исследованы вопросы развития мультипакторного разряда в сверхпроводящих четвертьволновых резонаторах.

Разработаны и запущены в эксплуатацию устройства, обеспечивающие работу сверхпроводящих четвертьволновых резонаторов: поглотитель механических колебаний, обеспечивающий механическую стабильность сверхпроводящих ниобиевых резонаторов и ввод СВЧ мощности, обеспечивающие стабильную работу при хорошей тепловой развязке и настраиваемости.

На основе проведенных исследований разработаны сверхпроводящие резонаторы для ускорителя ISAC-II (TRIUMF, Канада). Изготовлены и запущены в эксплуатацию 23 сверхпроводящих резонатора на ускорителе ALPI

(INFN, Италия) и 40 сверхпроводящих резонаторов на ускорителе ISAC-II (TRIUMF, Канада).

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Facco, J.S. Sokolovski, V. Andreev, G. Bassato, E. Chiaveri, P. Favaron, V. Zvyagintsev, “Experience with the low β resonators at LNL”, Proceedings of the 7th International Conference on Heavy Ion Accelerator Technology, Canberra, 17-23 September, 1995, Nucl. Instr. And Meth. A382 (1996) p.107-111.
2. Facco, F. Scarpa, D. Zenere, R. Losito, V. Zvyagintsev, “Low- and Intermediate-beta, 352 MHz Superconducting Half-wave Resonators for High Power Hadron Acceleration”, Proceedings of EPAC 2006, Edinburgh, Scotland, June 26-30, 2006, MOPCH165. Phys. Rev. ST Accel. Beams 9, 110101, p.1-5 (2006).
3. A. Facco, V. Zvyagintsev, “Beam steering in superconducting quarter-wave resonators: An analytical approach”, Phys. Rev. ST Accel. Beams 14, 070101, p.1-8 (2011).