

PHYSICS

УДК 621.372

ПРИМЕНЕНИЕ УСКОРЯЮЩИХ РЕЗОНАТОРОВ: ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ

Горбач А.П.

*аспирант кафедры проектирования информационно-компьютерных систем
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь*

APPLICATION OF ACCELERATING RESONATORS: CURRENT STATE OVERVIEW

Horbach A.

*postgraduate student of the Information and Computer-Aided Systems Design department
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus*

Аннотация

В статье рассматриваются перспективные конструкции резонаторов для применения в составе ускоряющих устройств. Отражены основные характеристики разрабатываемых конструкций резонаторов.

Abstract

The article deals with perspective structures of resonators, which used in accelerating devices. The main characteristics of been developing resonators are presented.

Ключевые слова: сверхпроводящие ускорители, резонаторы, ускорители заряженных частиц.

Keywords: superconducting accelerators, resonators, charge particle accelerator.

Введение

Высокочастотные резонаторы находят широкое применение в различных областях СВЧ техники. Одним из видов применения резонаторов является их использование в ускорителях заряженных частиц, например, в линейных ускорителях [1, с.8].

Современные сверхпроводящие структуры состоят из последовательности независимо фазированных резонаторов, используемых для ускорения пучков, и соленоидов или квадруполов для их фокусировки. Линейный ускоритель, построенный на основе последовательности независимо фазированных резонаторов, лишен нескольких недостатков [2]:

- нет поворотных магнитов и, соответственно, не требуется расходовать энергию на их питание, поскольку регулировка энергии может быть обеспечена как грубо (при выключении одного или нескольких резонаторов), так и плавно, подстройкой фаз ВЧ-поля в резонаторах;

- ускоритель без особых сложностей может работать в непрерывном режиме, возможен контроль за размером огибающей пучка и т.д.

В данной статье приводятся перспективные конструкции резонаторов для применения в ускоряющих устройствах.

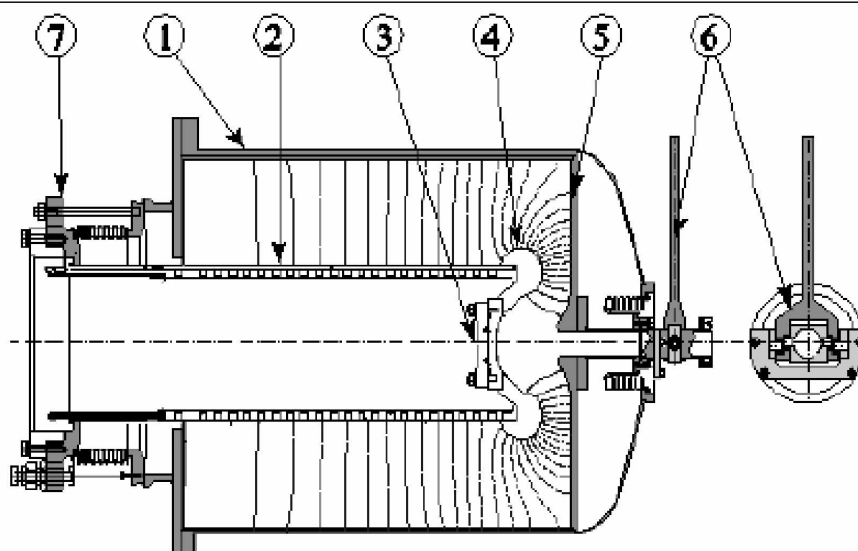
Современные конструкции резонаторов

В качестве основы для электронных ускорителей можно предложить, например, использование коаксиальных полуволновых резонаторов.

Электронный ускоритель БЕТА-8 [3] разработан на основе коаксиального полуволнового резонатора, который, в свою очередь, образован из коаксиального волновода длиной $\lambda/2$, закороченного с обоих концов, где λ – длина волны. Ускоритель рассчитан на получение трех значений средней энергии электронов: 1,5; 4,5 и 7,5 МэВ, с максимальной средней мощностью пучка до 300 кВт.

Основной частью инжектора электронов является сеточно-управляемая термокатодная ВЧ пушка на основе высокочастотного четвертьволнового коаксиального резонатора, с резонансной частотой 100 МГц.

Схематическое изображение резонатора ВЧ инжектора представлено на рисунке 1 [3].



1 – корпус резонатора; 2 – цилиндрический электрод;
3 – термокатодный узел; 4 – фокусирующий электрод; 5 – торцевая стенка резонатора с анодным отверстием; 6 – устройство оперативной перестройки частоты резонатора; 7 – устройство фиксации электрода и предварительной настройки частоты резонатора

Рисунок 1. Схематичное изображение резонатора ВЧ инжектора с силовыми линиями ускоряющего ВЧ поля

Принцип работы ВЧ инжектора состоит в том, что сеточно-катодный узел, расположенный непосредственно в ВЧ резонаторе, выпускает электронные сгустки определенной длительности и в определенной фазе ВЧ ускоряющего поля в резонаторе. Определенную длительность сгустков и привязку их к фазе ВЧ поля в резонаторе обеспечивает модулятор сеточно-катодного узла, создающий импульсы отпирающего напряжения.

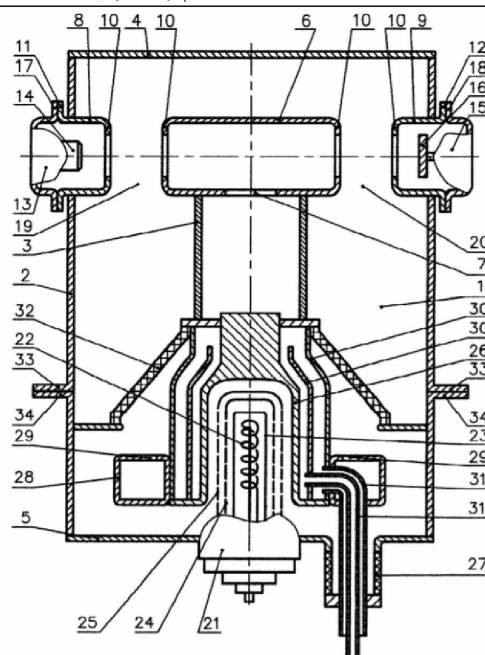
Щелкунов Г. П., Олихов И. М. и Петров Д. М. в 2007 году предложили ускоритель заряженных частиц, который может использоваться как резонаторное ускоряющее устройство для сверхэнергетичного ускорителя заряженных частиц [4].

Прообразами разработанного ускорителя заряженных частиц являются резонаторный ускоритель частиц, обладающих электрическим зарядом, и высокочастотный импульсный резонаторный ускоритель электронов. Данные устройства отличаются низким КПД, невысокой надежностью и значительными массогабаритными показателями, требуют использование электроемких источников питания. Конструкция разработанного ускорителя заряжен-

ных частиц имеет значительно уменьшенные габариты, увеличенные КПД и рабочую частоту, а также высокую надежность, механическую прочность и виброустойчивость.

Вышеперечисленные усовершенствования были достигнуты благодаря использованию опорного изолятора, выполненного в виде полого усеченного конуса и расположенного соосно с резонатором, применению рубашек охлаждения и размещению в полости резонатора тетродной пушки и радиального анода генератора высокочастотной мощности в вакууме (рисунок 2) [4].

Четвертьволновые коаксиальные резонаторы, используемые в предложенном устройстве как анодный резонатор ВЧ тетрода и ускоряющий резонатор ускорителя заряженных частиц, обеспечивают на выходе ускорителя высокоэнергетичные потоки частиц, обладающих электрическим зарядом, за счет последовательного наращивания их энергии. Использование коаксиальных резонаторов данного вида вкупе с двумя ВЧ зазорами позволяет использовать четвертьволновой резонатор как полуволновой, что влечет за собой уменьшение габаритов устройства.



1 – четвертьволновый коаксиальный резонатор; 2 – внешний проводник коаксиального резонатора; 3 – внутренний проводник коаксиального резонатора; 4, 5 – торцевые стенки коаксиального резонатора, 6 – центральная пролетная труба; 7 – отверстие в центральной пролетной трубе; 8, 9 – боковые пролетные трубы для ввода и вывода заряженных частиц соответственно; 10 – диафрагмы пролетных труб 6, 8, 9; 11, 12 – фланцы боковых пролетных труб 8, 9 соответственно; 13 – источник заряженных частиц; 14 – электронная или ионная пушка; 15 – устройство для приема заряженных частиц; 16 – мишень; 17, 18 – фланцы источника заряженных частиц и устройства для приема заряженных частиц соответственно; 19, 20 – ускоряющие высокочастотные зазоры; 21 – катодная ножка ВЧ тетрода; 22 – подогреватель катода ВЧ тетрода; 23 – катод ВЧ тетрода; 24 – управляющая сетка ВЧ тетрода; 25 – экранная сетка ВЧ тетрода; 26 – радиальный анод ВЧ тетрода; 27 – изолятор вывода анода ВЧ тетрода; 28 – торообразная насадка; 29 – отверстия в торообразной насадке; 30 – рубашки охлаждения; 31 – трубки для ввода/вывода охлаждающей жидкости; 32 – опорный диэлектрический изолятор; 33, 34 – фланцы внешнего проводника 2 коаксиального резонатора

Рисунок 2. Ускоритель заряженных частиц

В работе [5] описаны разработка и характеристики четвертьволновых резонаторов для сверхпроводящего линейного ускорителя, выполненная в рамках совместного сотрудничества между IUAC (Индия) и ANL (США). Четвертьволновой резонатор представляет собой коаксиальную структуру, работающую в режиме ТЕМ с ускоряющими зазорами

перпендикулярно оси симметрии. Для уменьшения длины полости емкостной нагрузки используется центральный проводник, имеющий форму с двумя разными диаметрами. Резонатор полностью образован из ниобия и находится в стальной оболочке из нержавеющей стали, заполненной жидким гелием. Внешний вид данного резонатора представлен на рисунке 3.



Рисунок 3. Четвертьволновой ниобиевый резонатор

Известно, что Двинских В. А., Степанчук В. П., Бондусь А. А. и Горбачев В. П. в 2009 году разработали высокочастотную систему резонансного ускорителя заряженных частиц [6].

Прототипом разработки является высокочастотная система резонансного усилителя заряженных частиц, включающая в себя импульсный сверхвысокочастотный генератор, выполненный на амплитроне с положительной обратной связью, и ускоряющий резонатор, подключенный в боковую стенку волновода, включенного между выходом амплитрона и согласованной нагрузкой, но наиболее близкой по технической сущности является высокочастотная система резонансного ускорителя заряженных частиц, где между выходом импульсного магнетронного генератора и ускоряющим резонатором включен ферритовый вентиль, четырехполюсное устройство, пропускающее прямую волну с малым ослаблением и поглощающее отраженную волну. Основными недостатками вышеописанных систем является низкий КПД, поэтому основной задачей предложенной разработки является увеличение значения данного параметра.

Высокочастотная система резонансного ускорителя заряженных частиц представляет собой им-

пульсный источник питания, магнетронный генератор, выходной трансформатор и ускоряющий резонатор, соединенные последовательно.

Устройство имеет следующий принцип действия: для получения максимального КПД магнетронный генератор согласуется с ускоряющим резонатором, который работает в полосе частот, состоящей из собственной частоты резонатора и передающей линии. Источник питания подает напряжение на магнетронный генератор через выходной трансформатор, при этом мощность анодного блока магнетрона передается на ускоряющий резонатор.

В 2012 году Михаэль Клеманн, Михаэль Бак и Оливер Хайд запатентовали высокочастотный резонатор и ускоритель частиц, снабженный высокочастотным резонатором [7].

Поскольку ВЧ резонатор применяется для ускорения заряженных частиц, то необходимым условием является наличие в нем вакуумной среды с низким давлением. Обеспечение таких условий – это трудоемкий и дорогостоящий процесс, и эта разработка описывает изобретение с упрощенной технологией изготовления резонатора. На рисунке 4 изображено схематичное представление предлагаемого устройства [7].

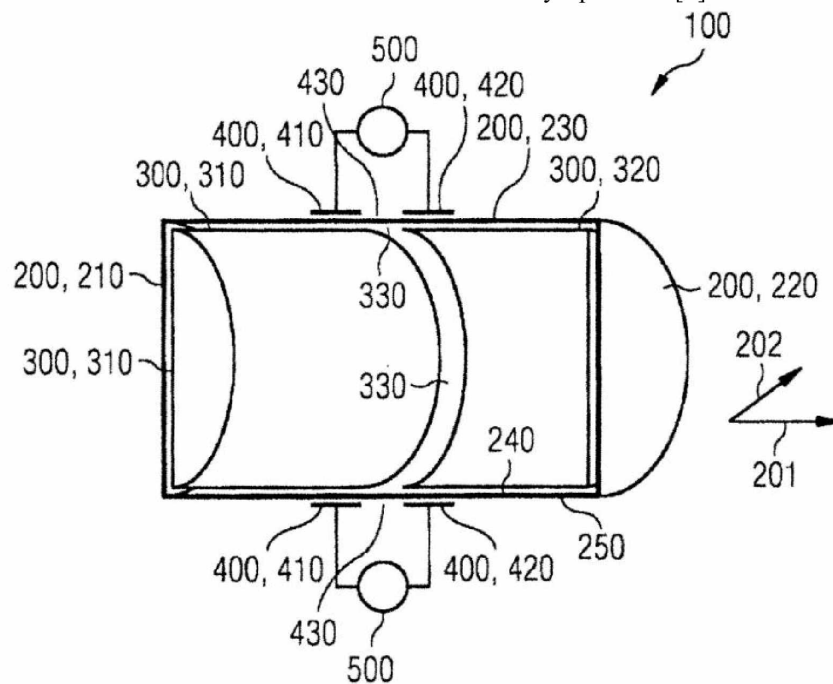


Рисунок 4. Сечение высокочастотного резонатора

Из рисунка видно, что ВЧ резонатор состоит из цилиндрической полости (200) из диэлектрического материала, которая в свою очередь включает в себя первый цилиндрический участок (210), второй цилиндрический участок (220) и диэлектрическое кольцо (230), соединяющее первый участок (210) и второй участок (220). Причем внутренняя сторона (240) первого цилиндрического участка (210) имеет первое электропроводное внутреннее покрытие (310), и внутренняя сторона (240) второго цилиндрического участка (220) имеет второе электропроводное внутреннее покрытие (320).

Из предложенного решения следует, что высокочастотное электрическое напряжение прикладывается между первым и вторым наружными покрытиями. Наличие зеркально-вращательной симметрии у резонатора обеспечивается наличием зазора, кольцеобразно проходящего по периметру и ориентированного перпендикулярно продольному направлению цилиндрической полости, и кольцеобразно проходящим по боковой поверхности полости двум наружным покрытиям. Благодаря этому в ВЧ резонаторе могут возбуждаться колебания в симметричных режимах.

Поскольку ВЧ резонатор представляет собой цилиндрическую полость (баллон, выполненный в форме круглого цилиндра), следовательно, данный объем не имеет проемов и выступов, а значит легко вакуумируется и является ускорителем электрически заряженных частиц.

Алиевым К.А. и др. предложен ускорительный комплекс NICA, в состав которого входят четвертьволновые коаксиальные резонаторы и СН-резонаторы [2]. Данная установка заменит собой действующий линейный ускоритель ЛУ-20, введенный в эксплуатацию более 40 лет назад. Разрабатываемый ускоритель имеет большую выходную энергию, уменьшенные габариты и увеличенный коэффициент токопрохождения. Поскольку установка разрабатывается не с нуля, а является улучшением действующего ускорителя, то можно утверждать о сравнительной экономичности и эффективности использования. Над разработкой ускорителя работают ученые из России и Беларуси, а окончательный запуск установки планируется произвести в 2020 году. Это подтверждает актуальность разработок, а также способствует укреплению международного сотрудничества и является примером перспективных исследований в этой области.

Заключение

Анализ конструкций и технических характеристик существующих ускоряющих резонаторов показал, что в последние десять лет разработка ускоряющих структур является особенно актуальной. Разработанные устройства имеют различные харак-

теристики, что позволяет применять их в устройствах СВЧ широкого диапазона. Ведутся работы над созданием как одиночных резонаторов, так и комплексных структур, состоящих из последовательности резонаторов разного типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Забаев, В.Н. Применение ускорителей в науке и промышленности: учебное пособие / В.Н. Забаев. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 195 с.
2. Алиев, К.А. О возможности использования сверхпроводящих резонаторов для реконструкции протонного инжектора комплекса «Нуклотрон» / К.А. Алиев [и др.] // Письма в ЭЧАЯ Т.13 №7(205). – 2016. – С. 1418-1424.
3. Беляев, А.Н. Моделирование режимов работы системы инжекции резонансного ускорителя электронов БЕТА-8 / А. Н. Беляев [и др.] // Молодежь в науке: сборник докладов 15-й научно-технической конференции. – Саров : ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2017. – С. 112-117.
4. Google Patents [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://patents.google.com/patent/RU2306685C1/ru>
5. Roy, A. Development of quarter wave resonators / A Roy // APAC 2007 – RRCAT. – Indore, India, 2007. – P. 554-558.
6. Google Patents [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://patents.google.com/patent/RU88891U1/ru>.
7. Google Patents [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://patents.google.com/patent/RU2606188C2/ru>