

Численное моделирование и экспериментальные исследования трехмерных ВЧ-полей в Н-резонаторах

С.А. Минаев

Инженерно-физический университет, Москва, Россия

Ю.А. Свистунов

Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры

им. Д.В.Ефремова, Санкт-Петербург, Россия

С.А. Силаев

Электротехнический университет, Санкт-Петербург, Россия

Программа ISFELD3D, предназначенная для моделирования трехмерных электромагнитных полей в резонаторах со сложной формой проводящей поверхности, используется для расчета собственных частот и собственных колебаний Н-резонаторов как с трубками дрейфа, так и с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой. Оба типа резонаторов исследуются в НПК ЛУЦ НИИЭФА им. Д.В.Ефремова и используются для ускорения ионов водорода от 60 КэВ до 2 МэВ (НЧУ) и от 2 до 10 МэВ (ОЧУ) на частоте 433 МГц. Сравнение теоретических и экспериментальных данных для настроенного и ненастроенного Н-резонаторов с трубками дрейфа дано для макета с удвоенной частотой (866 МГц) рабочего вида колебаний.

Введение

В НПК ЛУЦ НИИЭФА им. Д.В.Ефремова разрабатывается технология производства линейных ВЧ-ускорителей на частоте 433 МГц. В настоящее время испытывается лабораторный вариант такого ускорителя с выходной энергией протонов 1.8 МэВ на базе четырехкамерного резонатора с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой [1]. Изготовлен резонатор с выходной энергией частиц 2 МэВ. В случае ускорения ионов до больших энергий такие резонаторы используются как начальная часть ускорителя (НЧУ). Ускорение частиц от 2 до 5...15 МэВ предполагается осуществить в резонаторах с трубками дрейфа. Протоны или дейтоны с такими энергиями можно использовать для производства изотопов (в первую очередь, для целей медицины) или активационного анализа материалов. Обычно в качестве второй ступени используют структуру Альвареца в различных модификациях. К недостаткам резонаторов Альвареца в составе промышленной установки можно отнести сложность настройки, необходимость специальных устройств для юстировки трубок, механические трудности интенсивного охлаждения при большой средней мощности и, как следствие, высокую стоимость изготовления и эксплуатации. Кроме того, в силу принципиальных особенностей держатели трубок не могут быть слишком толстыми, и структура не обладает высокой механической жесткостью, чувствительна к толчкам и вибрациям.

В качестве альтернативы резонатору Альвареца здесь предлагается структура со скрещенными поперечными держателями (СПД), работающая на стоячей волне на π -типе колебаний (рис.1). Распределение электромагнитного поля рабочего вида колебаний соответствует Н(TE) виду [2]. Структура состоит из отдельных ячеек, каждая содержит широкое внешнее цилиндрическое кольцо. На массивном держателе, установленном внутри кольца вдоль диаметра, закреплена трубка дрейфа. Ячейки могут

независимо поворачиваться вокруг продольной оси и ориентированы таким образом, что соседние держатели взаимно перпендикулярны или близки к этому положению.

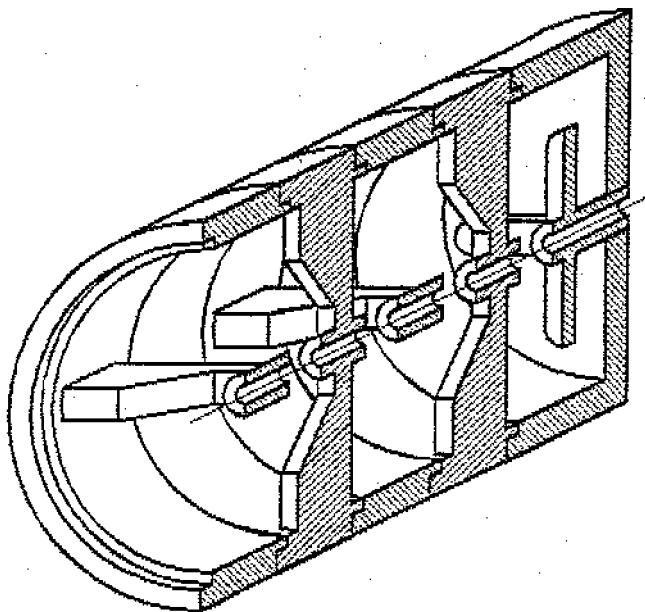


Рис. 1: Ускоряющая структура со скрещенными поперечными держателями трубок дрейфа.

СПД обладает высокой механической жесткостью, может иметь принудительное интенсивное охлаждение и не требует специальных устройств для юстировки; технология ее изготовления близка к традиционной технологии ускоряющих волноводов. В нашем случае СПД является аперидической, поскольку для ускорения частиц используется переменнo-фазовая фокусировка (ПФФ).

Настройка секции с ПФФ

Настройку резонатора со скрещенными поперечными держателями можно условно разделить на следующие операции:

- идентификация рабочего вида колебаний,
- компенсация спада поля в зазорах на краях резонатора,
- компенсация спада поля вдоль резонатора, вызванного ростом длин ускоряющих зазоров,
- компенсация модуляции поля в структуре с ПФФ,
- настройка на резонансную частоту.

При настройке длинного нерегулярного резонатора это разделение весьма условно. Для длинных резонаторов настройку можно вести последовательно, разбив резонатор на несколько частей и постепенно, по мере настройки наращивая его длину. Удобно начинать настройку с оконечных ячеек резонатора, располагая в них держатели взаимно перпендикулярно, и по мере сокращения длин зазоров и трубок увеличивать угловое смещение. Компенсация спада поля на краях осуществляется размещением на длинных торцевых полутрубках подстроечных элементов в виде крестов; наличие таких элементов уравнивает собственные частоты торцевых и остальных секций.

Серьезной проблемой в многозазорном резонаторе также является разделение видов колебаний и, как следствие, высокая чувствительность распределения поля к возмущению собственных частот ячеек. Тем не менее была успешно проведена настройка 59-зазорной структуры с рабочим (низшим по частоте) видом колебаний 866 МГц. Этот резонатор представлял собой уменьшенный вдвое макет структуры с ПФФ на частоте 433 МГц из сплава Д-16, предназначенной для ускорения протонов от 2 до 10.6 МэВ. В результате окончательной настройки неравномерность поля в зазорах не превышала 5%, а ближайший различимый паразитный вид колебаний отстоит от рабочего по частоте на 4.1 МГц и не представляет опасности.

Моделирование ВЧ-полей

Резонаторы с ПОКФ, трубками дрейфа и с поперечными держателями имеют очень сложную конфигурацию внутренних поверхностей, а последние не поддаются даже оценочному аналитическому расчету. Единственно возможным способом определения собственных функций является численное моделирование трехмерных уравнений поля. С этой целью использовалась трехмерная программа ISFEL3D и ее модификация MES 3D [3], основанные на технике конечных элементов. Программа написана на языке FORTRAN 77 и позволяет рассчитывать как резонансные, так и возбужденные колебания в структурах с произвольной формой проводящей поверхности.

Для расчета основных электродинамических характеристик структуры, изображенной на рис.1, распределения Е- и Н-полей и сравнения с экспериментальными данными был изготовлен макет структуры из меди, состоящий из 6 ячеек и двух полужеек на концах, представляющий часть упоминавшегося выше макета из алюминиевого сплава. Длина резонатора макета составила 296 мм, внутренний диаметр 120 мм, длины левой и правой концевых полужеек соответственно 45 и 55 мм.

Настройка проводилась по методу, изложенному в предыдущем разделе. Использовался торцевой настроечный элемент (крест), расположенный в области последнего зазора. Длина лучей креста составила 40x36 мм, подстроечный элемент в области первого зазора не потребовался. В табл. 1 указаны угловые смещения ячеек θ_i в градусах от взаимно перпендикулярного положения, следующих непосредственно за зазором с номером i ; величины фазового отклонения $\Delta\phi$ в градусах при введении возмущающего тела в центр i -того зазора; амплитуды поля E в i -том зазоре, нормированные на максимальное значение; собственные частоты f в МГц рабочего вида колебаний; добротности Q_{01} настроенного и ненастроенного резонатора. Для ненастроенного резонатора все θ_i , естественно, равны нулю. В первом столбце слева указан номер зазора.

Сравнение результатов расчета и экспериментальных данных для настроенного резонатора показывает удовлетворительное совпадение результатов; относительная ошибка в определении частот собственных колебаний (для основного вида) 0.5%, относительная ошибка в определении амплитуды поля в зазорах 15%. Отметим, что разница амплитуд напряжений в зазорах для настроенного и ненастроенного резонаторов очень велика. Поскольку предварительный расчет всегда ведется для ненастроенного резонатора, разница между теоретическим и экспериментальным значениями частоты рабочего вида колебаний может оказаться значительной.

Таблица 1. Электротехнические характеристики резонатора-макета

Настроенный резонатор $f=928.5, Q=7300$	Ненастроенный резонатор $f=905.4, Q=7608$
---	---

1	$\theta_i(\text{град})$	$\delta\phi_i$	$E_i(o.e.)$	$\delta\phi_i$	$E_i(o.e.)$
1	0.	11.	0.938	18.	0.756
2	-17.5	11.	0.938	25.5	0.9
3	20.	12.5	1.0	31.5	1.0
4	0.	11.	0.938	21.5	0.826
5	0.	11.	0.938	6.5	0.454
6	10.	12.	0.980	4.51	0.371
7	0.	12.5	1.	1.5	0.218

Заключение

Экспериментальные данные, полученные при исследовании 866 МГц макетов с 59 алюминиевыми и 6 медными ячейками, а также результаты численного моделирования показывают, что шунт-импеданс рассматриваемого H-резонатора сравним (или больше) с шунт-импедансом резонаторов типа Альвареца в диапазоне энергий 2...15 МэВ. Однако он будет в несколько раз выше, если использовать в этом диапазоне энергий H-резонаторе не с ПФФ, а с ускорением частиц при постоянной фазе ВЧ-поля поля (например, 30°). В этом случае H-резонатор можно использовать и для ускорения частиц до больших энергий (до 100 МэВ). Даже при одинаковом шунт-импедансе габариты H-резонатора оказываются существенно меньше, чем резонатора типа Альвареца. Для стабилизации радиального движения частиц при этом также нужно использовать фокусирующие квадруполь в трубках дрейфа.

Авторы выражают благодарность А.К.Ливеровскому за помощь в проведении измерений и М.А.Калиниченко за выполнение ряда расчетов.

Литература

1. Ю.П.Вахрушин и др. Разработка линейного ускорителя протонов промышленного и медицинского применения. / Тезисы докладов VII Совещания по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве. — С-Петербург, 1992, с.192.
2. N.Ueda et al. RF Field Measurement and Its Analysis on a Model Resonator of the Interdigital H-Type Linac. IEEE Transactions on Nuclear Science. V. NS-28. No 3, June 1982 p.3023.
3. S.Silaev. Isoparametric Finite Element Analysis of Time-Harmonic Electromagnetic Fields in Three Dimensions. NIM in Physics Research, section A 328 (1993) p.535-541.