

♀
сообщения
Объединенного
Института
Ядерных
Исследований
Дубна

63 / 2-82

У/1-82

9-81-682

А.А.Глазов, Е.Н.Заплатин, В.А.Кочкин,
Л.М.Онищенко

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ
МОДЕЛИ РЕЗОНАТОРА СУПЕРЦИКЛОТРОНА

1981

Резонатор суперциклотрона /1/ представляет собой прямоугольный параллелепипед с ускоряющими электродами специальной формы в медианной плоскости в районе рабочих радиусов ускорителя /рис.1/. Проведенный расчет и экспериментальные исследования на модели резонатора в масштабе $1:10^{1/2}$ позволили выбрать размеры резонатора $8,0 \times 2,63 \times 0,45$ м³ и ускоряющего зазора $0,12$ м. Добротность такого резонатора на частоте 50 МГц должна составлять примерно 35000 , а мощность потерь при максимальном напряжении 500 кВ - около 250 кВт.

Для оценки изменения частоты, вызванного наличием электродов, использовались метод возмущений и метод частичных областей. Во втором случае резонатор рассматривался как бесконечный волновод с одинаковым по всей его длине поперечным сечением /рис.2/. Дисперсионное уравнение при этом имеет следующий вид:

$$\frac{1}{2} \operatorname{tg} kh - \operatorname{sinh} kh + \frac{\operatorname{cosh} kh}{\operatorname{tg} kb} - \frac{2kc}{\pi^2 \alpha_0^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin^2 n \pi \alpha_0}{n^3 \exp(T_n h)} \quad /1/$$

Здесь k - волновое число, $\alpha_0 = d/c$, $T_n = \sqrt{(n\pi/c)^2 - k^2}$, $n = 1, 2, 3, \dots$

Экспериментальная модель резонатора в масштабе $1:4$ /рис.3/ выполнена из листового дюралюминия, который с внутренней стороны покрыт медной полированной лакировкой. В боковых стенках в медианной плоскости сделаны выступы, имитирующие ускоряющие электроды. Имеется возможность плавного изменения зазора $\delta = 2d$ между выступами с отсчетом его по нониусу с точностью $0,05$ мм и изменения положения выступов вдоль продольной оси резонатора с шагом 20 см. На рис.4 представлены экспериментальная и вычисленная по формуле /1/ - треугольники - зависимости собственной резонансной частоты модели от расстояния δ . Максимальное отличие расчетных значений от полученных экспериментально не превышает $2,5\%$. Измеренная добротность модели без выступов на 20% меньше, чем расчетная, что характеризует качество исполнения лакировки и контактных соединений.

В модели предусмотрена возможность измерения напряжения вдоль выступов. На рис.5 показано распределение напряжения вдоль резонатора. На оси абсцисс выделена область ускорения, совпадающая с положением выступов. Пунктирная кривая /график синуса/ - распределение напряжения в отсутствие выступов. Как

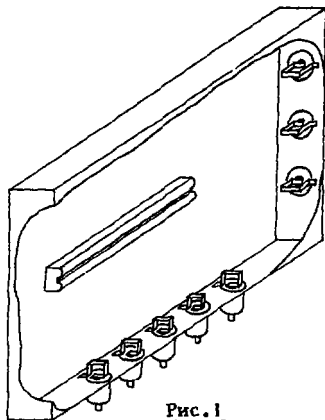


Рис. 1

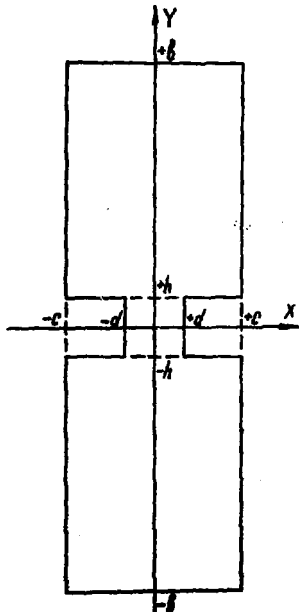


Рис. 2



Рис. 3

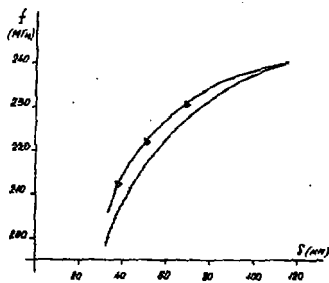


Рис. 4

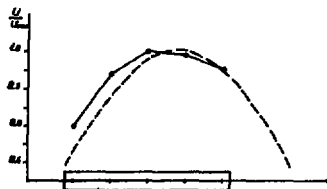


Рис.5

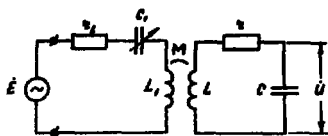


Рис.6

и предполагалось, введение выступов увеличило ускоряющее напряжение /сплошная кривая/ на начальных радиусах примерно на 20%.

Для создания необходимого напряжения на электродах и ускорения проектного тока /0,1 А/ в резонаторе суперциклотрона необходима мощность 20 МВт. Введение такой мощности одной петлей сопряжено с определенными трудностями, а именно: нагревом петли, большими размерами подводящего фидера, необходимостью создания мощного генератора, пробоями изолятора ввода. Поэтому предполагается использовать возбуждение резонатора с помощью нескольких петель, запитанных каждая от автономного усилителя мощности.

При работе на высоком уровне мощности важным фактором является хорошее согласование петли и тракта возбуждения. Представим резонатор и систему возбуждения как систему связанных контуров /рис.6/. Тогда условия согласования записываются как

$$x_1 + x_{ВН} = 0, \quad /2а/$$

$$r_1 + r_{ВН} = Z_0, \quad /2б/$$

где r_1, x_1 - собственные активное и реактивное сопротивления петли; $r_{ВН}, x_{ВН}$ - активная и реактивная компоненты импеданса, вносимого из резонатора в цепь питания; Z_0 - волновое сопротивление фидера связи. При $r_1 \ll r_{ВН}$, что почти всегда выполняется,

$$r_{ВН} = Z_0, \quad /3а/$$

$$x_1 = -x_{ВН} = a Z_0. \quad /3б/$$

Здесь $a = 2\Delta f Q / f$ - обобщенная расстройка резонатора.

В этом случае модуль коэффициента передачи

$$|K| = \left| \frac{\dot{U}}{E} \right| = \frac{1}{\omega C \sqrt{r_1 Z_0}}. \quad /4/$$

Условие /2а/ на практике реализуется установкой последовательно с индуктивностью петли связи L_1 компенсирующей емкости C_1 /рис.6/. Соотношение /2б/ можно реализовать, меняя связь системы возбуждения с резонатором.

Для нахождения необходимой площади петли возбуждения, удовлетворяющей условию /3а/, воспользуемся тем фактом, что размеры петли достаточно малы по сравнению с размерами резонатора и длиной волны, так что в пределах петли $H = \text{const}$, а следовательно,

$$S = \frac{1}{\omega_0 \mu_0 H \sin \alpha} \sqrt{2 \Gamma_{\text{вн}} P} \quad /5/$$

где S - площадь петли, P - мощность, вводимая в резонатор, α - угол между плоскостью петли и силовыми линиями магнитного поля H , отсчитываемый от положения минимальной связи системы возбуждения с резонатором.

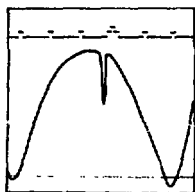
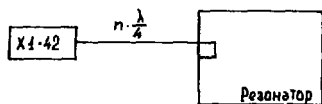


Рис. 7

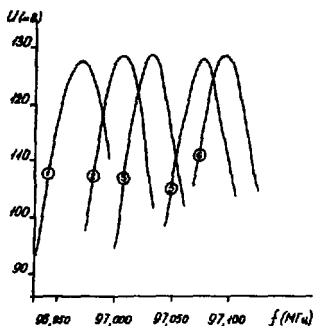


Рис. 9

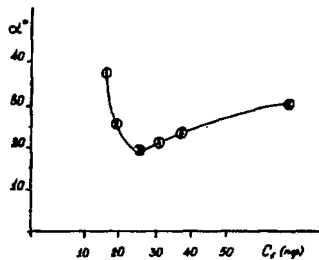


Рис. 8

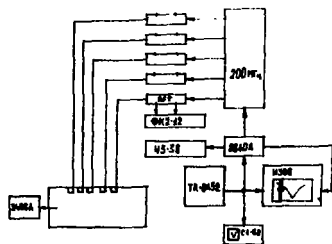


Рис. 10

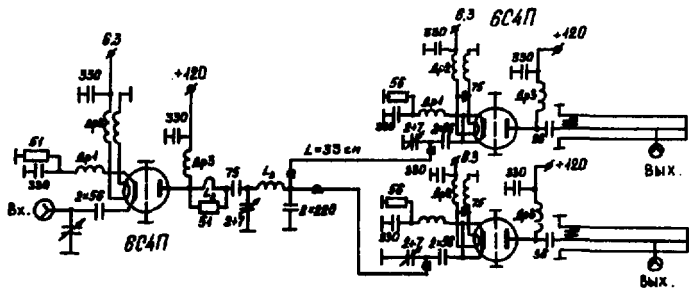


Рис. 11

Если теперь имеем N одинаковых петель, каждая из которых согласована с трактом возбуждения при $\alpha = 90^\circ$, то при одновременном возбуждении резонатора петлями для выполнения условия /3а/ необходимо, чтобы

$$\alpha = \arcsin \frac{1}{\sqrt{N}}.$$

/6/

Для исследования многопетлевого возбуждения модели сделаны 8 идентичных петель из меди, пять из которых располагаются по длинной стороне резонатора, а три петли - по короткой /рис. 1/. Для компенсации собственной индуктивности петли последовательно с ней поставлен полицилиндрический переменный конденсатор. Компенсация реактивности петли проводилась в два этапа. Сначала бралась линия длиной $n\lambda/4$ (где n - целое, λ - длина волны в резонаторе) и закорачивалась на петлю, введенную в резонатор. С другой стороны она подключалась к измерителю АЧХ X1-42, на экране которого можно было видеть низкочастотный последовательный резонанс контура петли и высокочастотный резонанс модели /рис. 7/. Совмещение этих резонансов по частоте дает грубую настройку петли. Более точная настройка проводилась с использованием векторного вольтметра ФК-2-12 и направленного ответвителя, позволяющих контролировать амплитуды падающей и отраженной волн в цепи возбуждения, а также разность фаз между ними. Путем подстройки компенсирующего конденсатора и связи с резонатором устанавливались минимум напряжения отраженной волны и ноль разности фаз, что соответствует условиям /3/. Необходимо отметить, что, меняя связь системы возбуждения с резонатором и одновременно подстраивая компенсирующую емкость, можно найти семейство точек согласования, сдвинутых друг относительно друга по частоте. Причем в полном соответствии с фор-

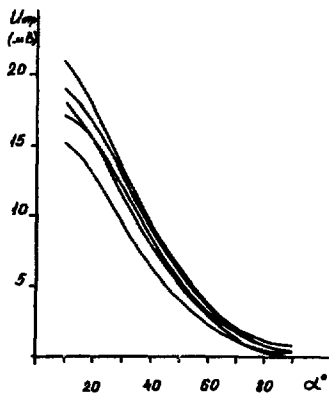


Рис. 12

мулой /4/ напряжение на ускоряющих электродах не меняется по величине /рис.8,9/. Для этого эксперимента модель резонатора была перестроена на частоту ~100 МГц, чтобы иметь возможность использовать векторный импедансметр 4815А. Перестройка была произведена в соответствии с рис.4. за счет уменьшения зазора до 5 мм. Экспериментально удалось получить сдвиг по частоте на величину до шести полюсов пропускания модели резонатора.

Блок-схема возбуждения модели резонатора несколькими петлями представлена на рис.10. Здесь TR-0452 - генератор сигналов специальной формы, 8640А - ВЧ генератор, ЧЗ-38 - частотомер, С1-68 - контрольный осциллограф, Н306 - двухкоординатный самописец, ФК-2-12 - фазовый вольтметр, RFT- направленный ответвитель, 3406А - вольтметр для измерения напряжения на резонаторе, 200 МГц - пятиканальный усилитель на 200МГц /рис.11, показаны два канала, остальные идентичны им/. На рис.12,13 приведены амплитуды отраженных волн в зависимости от угла поворота и частоты для пяти петель при возбуждении модели каждой петли в отдельности по схеме рис.10. Амплитуда падающей волны составляла 20 мВ. Видно, что неидентичность каналов возбуждения по частоте составляет 3 кГц, а по коэффициенту отражения - 5%. Далее проводилась последовательная настройка двух, трех и пяти петель одновременно /рис.14/.

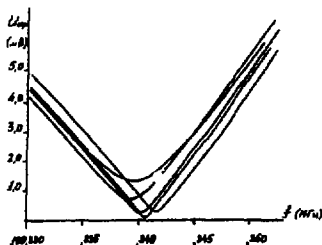


Рис. 13

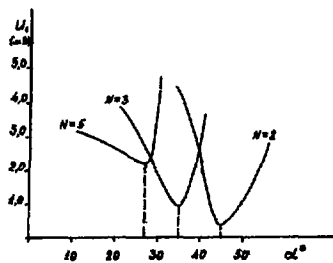


Рис. 14

Критерием настройки было получение максимального КБВ во всех трактах возбуждения. Ухудшение КБВ с ростом числа петель объясняется увеличением трудности настройки. Видно полное соответствие полученных результатам выражению /6/.

Проведенные исследования показали, что суммарное напряжение, полученное при возбуждении резонатора каждой петлей в отдельности, отличается на 5% от напряжения, полученного при одновременном использовании всех пяти петель.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глазов А.А. и др. В кн.: Труды V Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 5-7 октября 1976 г. "Наука", М., 1977, т. 1.
2. Глазов А.А., Заплатин Е.Н. ОИЯИ, 9-80-46, Дубна, 1980.