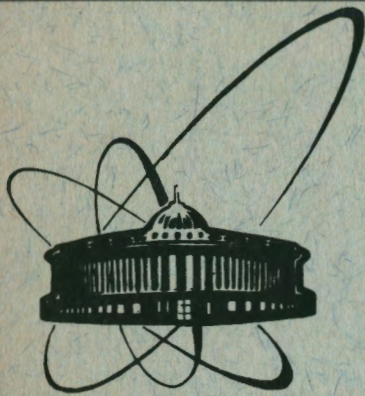


91-84



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
Дубна

P9-91-84

А.А.Глазов, Е.Н.Заплатин, В.А.Кочкин,
Р.А.Умеров*

ИССЛЕДОВАНИЕ УСКОРЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ
ИЗОХРОННОГО ЦИКЛОТРОНА У-200Т

*Институт ядерной физики АН УзССР, Ташкент

1991

Проведенный расчет геометрии ускоряющей системы циклотрона У-200Т^[1,2] показал, что в качестве ВЧ-ускоряющей структуры целесообразно использовать плоскую резонансную линию с панельной перестройкой частоты. Расчетные параметры этой системы следующие:

диапазон частот (по протонам), [МГц].....11.4÷20.5
 ускоряющее напряжение, [кВ].....65
 мощность потерь, [кВт].....130

При проектировании резонансной системы наиболее ответственно необходимо отнестись к точности расчета резонансной частоты или диапазона перестройки резонансной частоты в выбранной геометрии ускоряющей системы. Поэтому следующим необходимым этапом после теоретических исследований является масштабное моделирование системы.

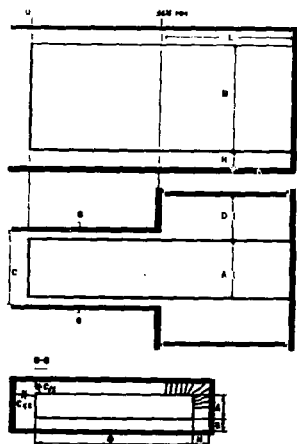
Экспериментальное исследование ускоряющей структуры У-200Т проводилось на модели в масштабе 1:5 поэтапно с постепенным усложнением геометрии. На каждом этапе моделирования проводился полный проверочный расчет резонансной частоты и диапазона перестройки частоты системы, на основе теории длинных линий^[3]. Точность результатов получаемая в результате такого расчета в значительной степени зависит от точности вычисления волнового сопротивления участка Z_0 . Поскольку конфигурация линии может быть довольно произвольной, а соотношение геометрических размеров варьироваться в широких пределах, существует специальная справочная литература, содержащая большой набор формул и графиков для расчета волновых сопротивлений различных геометрий длинных линий, например^[4,5]. Для данного конкретного случая, для расчета волнового сопротивления резонансной линии ВЧ-системы циклического ускорителя, наиболее широкое распространение получила формула, приводимая Ченом^[6]:

$$C_{f1} = \frac{\epsilon}{\pi} \left[\ln \frac{D^2 + H^2}{4H^2} + \frac{2H}{D} \operatorname{arctg} \frac{D}{H} \right], \quad (1a)$$

$$C_{f2} = \frac{\pi}{\pi} \left[\ln \frac{D^2 + H^2}{4D^2} + \frac{2D}{H} \operatorname{arctg} \frac{H}{D} \right], \quad (16)$$

$$Z_0 = \frac{376.6}{2 \left(\frac{1}{H} + \frac{1}{D} \right) + \frac{4}{\pi} (C_{f1} + C_{f2})}, \quad (2)$$

При её получении использовался метод конформных отображений. Эта формула справедлива только, если краевое поле одного угла не пересекается с краевым полем другого угла, т.е. когда зазоры малы по сравнению с размерами внутреннего проводника.



Для циклотронов это условие выполняется не всегда и иногда приходится рассматривать прямоугольную линию с большими зазорами. Случай, когда одна сторона внутреннего проводника меньше, чем зазоры, был рассмотрен

Рис.1. Первая модель геометрии ускоряющей системы.

Кокрофтом [7]. Однако точное решение включает в себя эллиптические функции и очень сложно для использования при расчётах. Некоторые результаты приведены Ченом в графической форме. Для $D=H$ и $b=0,5D$ различие от (1) составляет только 2%, а это означает, что уравнение (2) можно применять при проведении инженерных расчётов резонансных линий циклотронов.

Однако следует ожидать, что более точные результаты можно получить при использовании формулы, приводимой А.А.Глазовым в работе [8]. В её основе лежит рассмотрение формы распределения электромагнитного поля в резонансной системе, а именно, на какие стенки камеры замыкаются силовые линии электрического поля. Достаточно просто этот эффект может быть учтён, если

воспользоваться методикой, предложенной В.Ф.Коваленко [9]. Предполагается, что силовые линии являются дугами окружностей, центр которых расположен таким образом, что на металлических поверхностях обеспечивается условие $E = E_n$. В этом случае краевая ёмкость

$$C_k = \frac{2\pi}{\tau} \ln \frac{r_{\max}}{r_{\min}},$$

где r_{\min} , r_{\max} определяются размерами резонансной линии.

Полная ёмкость на единицу длины внутреннего электрода на наружный образуется из ёмкостей плоских конденсаторов, вычисленных с учётом эффекта "уширения" [10] и краевой ёмкости.

В зависимости от соотношения между a и h возможны три случая:

1. $D > \tau H/2$, $r_{\min} = H$, $r_{\max} = 2D/\tau - B/2 + H$
 $Z_0 = 60\tau / [A/H + B/D + 2H/D + 4/\tau - \ln(2D/\tau H) - 4/\tau(1 - \ln 2)]$, (3)
2. $D < 2H/\tau$, $r_{\min} = D$, $r_{\max} = 2H/\tau - A/2 + D$
 $Z_0 = 60\tau / [A/H + B/D + 2D/H + 4/\tau - \ln(2h/\tau D) - 4/\tau(1 - \ln 2)]$,
3. $2h/\tau < D \leq H/2$
 $Z_0 = 60\tau / (A/H + B/D + 4/\tau \ln 2)$.

Из (3) следует, что при $D_m = \tau(B + 2H)/4$ величина Z_0 достигает максимума. Это же значение D ограничивает область применения выражения (3). Подставляя в (3) значение D_m , найдём:
 $Z_{0m} = 60\tau / [A/H + 4/\tau - \ln(B/2H) + 4/\tau \ln 2]$.

Размеры модели резонансной системы, на которой проводились исследования, следующие (рис.1): толщина дуанта $A = 0.035$ м, ширина дуанта $B = 0.38$ м, боковой зазор между дуантом и камерой $H = 0.4$ м, вертикальный (ускоряющий) зазор между дуантом и камерой $D_d = 0.009$ м.

Точность линейных размеров при изготовлении макета составляет 0.5 мм. Для обеспечения повышенной точности размера ускоряющего зазора по плоскости дуанта и резонансной линии в нескольких местах были установлены калиброванные тефлоновые шарики, что привело к повышению точности этого размера до 0.1 мм.

Первый вариант модели представлял собой однородную длинную линию в области радиусов ускорения с переменным вертикальным

зазором D по длине резонансной линии (рис.1). Соответствующий этому изменению D диапазон перестройки резонансной частоты приведен на рис.2. На этом же графике приведены теоретические частотные зависимости, вычисленные по формулам (1) – (3).

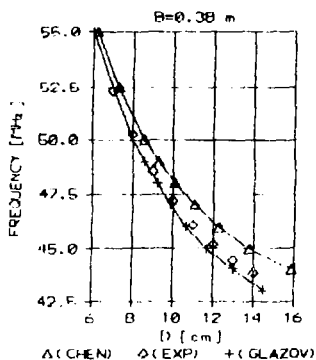


Рис.2. Зависимость частоты от положения панелей для первой модели геометрии ускоряющей системы.

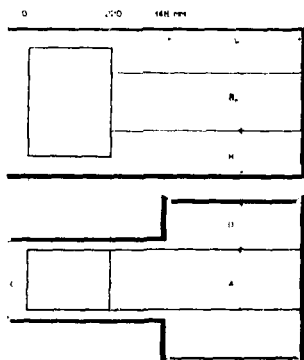


Рис.3. Вторая модель геометрии ускоряющей системы.

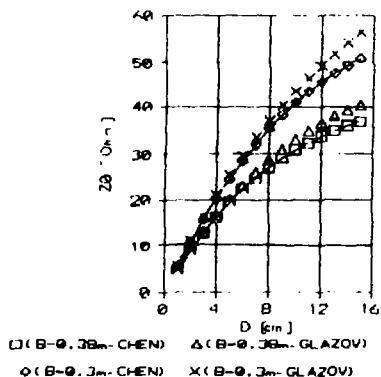


Рис.4. Волновое сопротивление резонансной линии в зависимости от положения панелей.

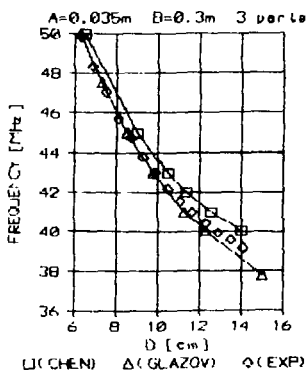


Рис.5. Зависимость частоты от положения панелей для второй модели геометрии системы.

Дальнейшее изменение геометрии модели заключалось в уменьшении ширины резонансной линии B_d (рис.3). Результаты расчётов волнового сопротивления Z_0 резонансной линии модели при изменении вертикального зазора D приведены на рис.4. Расчёт проводился для двух значений ширины резонансной линии B_d . Разница в результатах достигает 10%. На рис.5 представлены теоретические и экспериментальная частотные зависимости для этой геометрии.

Следующим шагом было создание модели рабочей геометрии системы (рис.6). Из-за сложной конфигурации дуанта точность изготовления уменьшилась, что сказалось на совпадении теоретических и экспериментальных характеристик (рис.7). Поэтому для проверки полученных результатов теоретически была исследована "предельная" геометрия структуры (рис.8), которая отличается от рабочего варианта тем, что вертикальный разрез дуанта A_d уменьшен до 6 мм по всей площади дуанта. Вертикальный зазор между дуантом и камерой был постоянный также по всей площади дуанта и равнялся 9 мм. С радиотехнической точки зрения это означает более высокое значение ёмкости дуанта по сравнению с рабочим вариантом, а, следовательно, более глубокая перестройка триммеров. Результаты расчётов такой

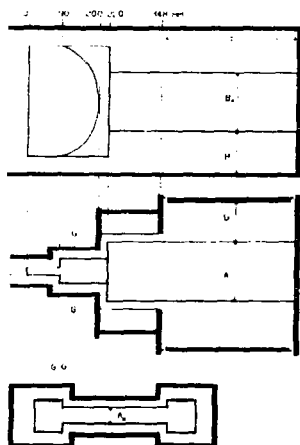


Рис.6. Третья модель геометрии ускоряющей системы.

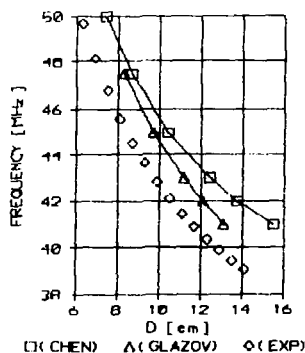


Рис.7. Зависимость частоты от положения панелей для третьей модели ускоряющей системы.

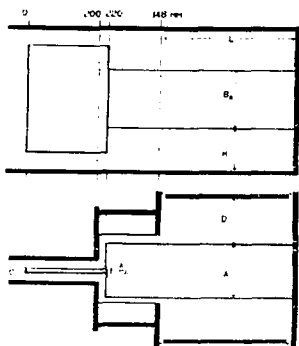


Рис.8. "Предельная" геометрия ускоряющей системы.

системы представлены на рис.9. На этот же график для сравнения нанесены экспериментальные значения частоты рабочей геометрии модели. Очевидно, что полученные, как теоретические, так и экспериментальные результаты удовлетворяют необходимой точности при проектировании ускоряющей системы.

Поскольку при всех изменениях геометрии модели размер резонансной линии L поддерживался постоянным и равным 34 см, верхняя частота системы с рабочей геометрией понизилась до 100 МГц и не отвечает заданным требованиям на трехкратную перестройку по частоте.

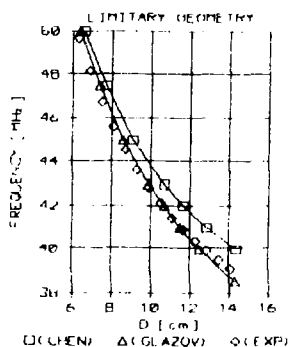


Рис.9. Зависимость частоты от положения панелей для "предельной" геометрии ускоряющей системы.

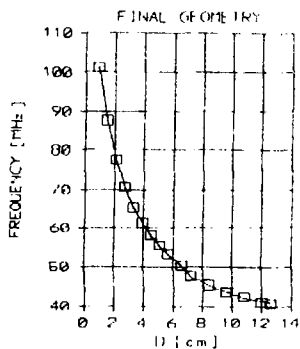


Рис.10. Зависимость частоты от положения панелей для окончательной геометрии системы.

Проведенный расчёт показал, что даже при предельной геометрии системы уменьшение размера L до 30 см позволяет получить необходимое верхнее значение частоты 105 МГц. Для проверки этого резонансная линия со стороны "земли" была укорочена на 4 см. При этом для более полного приближения к реальной геометрии системы с боков дуанта для имитации емкостей триммерных конденсаторов сделаны уширения. На рис.10 приведена частотная характеристика окончательной геометрии ускоряющей системы. Видно, что при наличии многопластинчатого триммерного конденсатора нижняя частота диапазона (для макета ~ 35 МГц) легко может быть получена.

Литература.

1. Ю.Г.Аленицкий и др. ОИЯИ, Р9-91-82, Дубна, 1991г.
2. А.А.Глазов и др. ОИЯИ, Р9-91-83, Дубна, 1991г.
3. Г.И.Атабеков, "Линейные электрические цепи", ч.1, М., "Энергия", 1978.
4. М.А.Р.Ганстон, "Справочник по волновым сопротивлениям фидерных линий СВЧ", "Связь", Москва, 1976.
5. Ю.Я.Июссель и др. "Расчёт электрической ёмкости", "Энергоиздат", Ленинград, 1981.
6. T.S.Chen. IRE Trans. Microwave Theory Techn. MTT-8 (1960) p.510.
7. J.D.Cockcroft, J. IEE 66 (1928) 385.
8. А.А.Глазов и др. ОИЯИ, Р9-6241, Дубна, 1972г.
9. В.Ф.Коваленко. Введение в электронику СВЧ, "Сов. радио", 1950г.
10. В.Смайт. Электростатика и электродинамика, ИЛ, Москва, 1954г.

Рукопись поступила в издательский отдел
8 февраля 1991 года.