

Технология изготовления и результаты испытаний на высоком уровне мощности 3-зазорного группирователя линейного ускорителя ISAC

Ю.В.Былинский, А.А.Меньшов, П.Н.Остроумов, А.И.Кваша (ИЯИ РАН)
G.Dutto, R.E.Laxdal, R.Poirier (TRIUMF)

Введение

В лаборатории TRIUMF сооружается линейный ускоритель радиоактивных ионов для проекта ISAC [1]. Ускоритель работает на частоте 105 МГц в непрерывном режиме ВЧ возбуждения. В составе ускорителя предусмотрены 3 группирователя, установленные между ускоряющими резонаторами с трубками дрейфа [2]. Основные требования к группирователям: работа в непрерывном режиме возбуждения; высокое эффективное ускоряющее напряжение (до 320 кВ); широкий акцептанс по скоростям ионов (1,8 - 4,2 %). Полномасштабный прототип первого группирователя был разработан и изготовлен в ИЯИ РАН. Это 3-х зазорный резонатор со структурой типа Splitring, работающий на частоте 105 МГц [3]. В процессе испытаний в группирователь в непрерывном режиме была введена ВЧ мощность 14 кВт, что соответствует максимальной напряженности электрического поля на поверхности трубок дрейфа ≈ 17 МВ/м.

Особенности конструкции группирователя

Группирователь представляет из себя высокочастотную структуру типа Splitring [3, 4] с 2 трубками дрейфа, размещенными на концах полуколец, задающих резонансный контур (см. рис. 1). Корпус резонатора и структура Splitring изготовлены из меди. Большинство конструктивных соединений выполнены при помощи пайки серебряным припоем ПСр-72 в водородной печи. Полукольца структуры приварены к поддерживающей штанге в атмосфере гелия с использованием меди в качестве присадки. Внутри полуколец размещены каналы охлаждения. Корпус резонатора и оба днища также охлаждаемые.



Рис. 1. Группирователь Splitring на 105 МГц.

Расчет группирователя базировался на 3-мерном моделировании электродинамики структуры при помощи пакета программ MAFIA. При этом решались следующие основные задачи:

- Оптимизация геометрии структуры по максимуму шунтового сопротивления;
- Выбор способа подстройки частоты в процессе изготовления;
- Определение размеров структуры с резонансной частотой рабочего колебания 105 МГц;
- Расчет высокочастотных потерь в элементах структуры группирователя.

Из расчета было определено, что при существующих ограничениях на размеры резонатора (см. табл. 2) наибольшее влияние на шунтовое сопротивление структуры оказывает диаметр трубки кольца Splitring (см. рис. 2). С этой точки зрения было бы целесообразно использовать кольцо как можно меньшего поперечного сечения. Однако, принимая во внимание необходимость эффективного охлаждения кольца требования по механической жесткости структуры, диаметр кольца был выбран равным 25 мм.

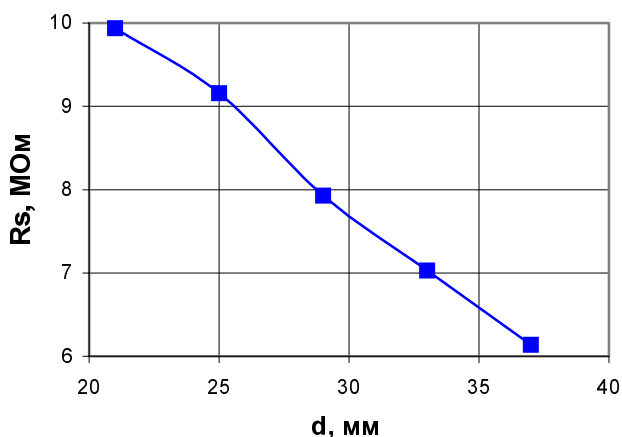


Рис.2. Зависимость шунтового сопротивления банчера от диаметра трубки кольца Splitring.

Распределение высокочастотных потерь в элементах структуры банчера представлено в таблице 3.

Таблица 1. Зависимость частоты от размеров банчера.

Диаметр резонатора	70 кГц/мм
Длина резонатора	15 кГц/мм
Радиус кольца Splitring	400 кГц/мм
Диаметр штанги (ноги)	50 кГц/мм
Высота штанги (ноги)	15 кГц/мм
Толщина кольца Splitring	500 кГц/мм

Таблица 3. Распределение ВЧ потерь.

Кольцо Splitring	68%
Днища	24.5%
Обечайка	2.5%
Штанга	4.4%
2 трубки дрейфа	0.25%
Элемент подстройки	0.04%

При помощи пакета MAFIA были проанализированы различные возможности регулировки частоты за счет изменения размеров структуры. Характерные величины коэффициентов влияния размеров банчера на частоту приведены в табл.1. Разработка группирователя не сопровождалась макетированием, поэтому в конструкцию была заложена возможность подстройки частоты в процессе изготовления. Для этого между полукольцами Splitring была установлена прямолинейная цилиндрическая вставка, а трубки дрейфа подсоединены к полукольцам через конические кронштейны.

Окончательные размеры структуры при-

Таблица 2. Основные размеры банчера.

Диаметр резонатора	550 мм
Длина резонатора	98 мм
Радиус изгиба кольца Splitring	178 мм
Диаметр поперечного сечения Кольца Splitring	25 мм
Смещение оси резонатора от Оси пучка	156.5 мм
Длина прямолинейной вставки	80 мм
Диаметр штанги (ноги)	50 мм
Высота штанги (ноги)	96 мм
Диаметр трубок дрейфа	30 мм
Диаметр апертуры	14 мм

Результаты предварительных измерений

После предварительной сборки ускоряющей структуры отличие рабочей частоты от расчета (MAFIA) составило 600 кГц. Подстройкой длины прямолинейной вставки была произведена коррекция частоты. Результаты радиотехнических измерений приведены в таблице 4. Распределение электрического поля на оси пучка представлено на рис 3. Особое внимание было уделено определению механической стабильности структуры. При этом были измерены спектры собственных механических колебаний структуры и амплитудно-частотные характеристики вынужденных колебаний при номинальном протоке воды по охлаждающему каналу кольца Splitring. Измерения проводились независимо в 3-х плоскостях при помощи осциллометра (см. табл.5).

Таблица 4. Радиотехнические параметры группирователя.

Частота рабочего колебания	105,2 МГц
Частота ближайшего паразитного колебания	103,5 МГц
Диапазон перестройки частоты тюнером	-900 кГц
Добротность (изм./расч.)	4200/5800
Шунтовое сопротивление* (изм./расч.)	6,0/9,16 МОм
Номинальная мощность	9,5 кВт
Напряжение на трубке дрейфа	60 кВ
Напряженность на поверхности	13.2 МВ/м
КСВ в фидере на входе в резонатор	1.01
Коэффициент влияния температуры на частоту	~2 кГц/град.

* $R_s = \frac{U^2}{P}$, где $U=4U_1$, U_1 – максимальное напряжение на первом ускоряющем зазоре, P – полная рассеиваемая мощность.

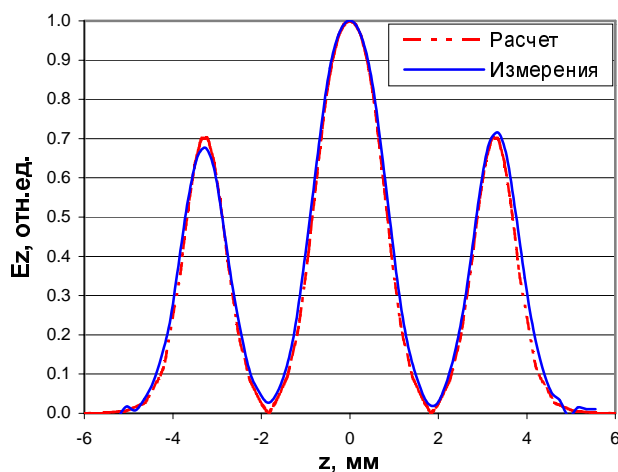


Рис. 3. Распределение ускоряющего поля вдоль оси пучка.

Таблица 5. Параметры механических колебаний структуры Splitring.

	Верт. ось (x)				Гориз. ось (y)					Ось пучка (z)				
Частоты собственных колебаний, Гц	11; 36,5; 39,5; 97,5; 109				11; 36,5; 39,5; 97,5; 109					18; 36,5; 97,5; 109				
Частоты вынужденных колебаний, Гц	36	39	96	107	11	36	39	96	107	19	36	39	96	107
Амплитуды вынужденных колебаний, мкм	0,5	0,5	0,1	0,1	1	1	1	0,1	0,1	0,4	1	0,5	0,3	0,1

Испытания на высоком уровне мощности

Резонатор запитывался от ВЧ генератора на 105 МГц с выходной мощностью до 20 кВт. Система возбуждения генератора позволяет работать как на фиксированной частоте, так и в автоколебательном режиме в непрерывном и в импульсном режимах. Мощность подводилась по фазостабильному кабелю с воздушной изоляцией. Наличие собственных резонансов питающего фидера обусловило применение мощного фазовращателя тромбонного типа на выходе ге-

нератора. Перестройкой длины фазовращателя эти колебания максимально удалялись по частоте от рабочего колебания группирователя, так как они оказывали существенное влияние на стабильность работы генератора. Вводу мощности в резонатор предшествовали тщательные вакуумные испытания и обезгаживание внутренних поверхностей. Обезгаживание поверхности проводилось при температуре 50°- 60°С в течение 10 часов до получения вакуума на уровне $2 \cdot 10^{-7}$ Торр.

Начало ввода мощности с минимальным напряжением на трубках дрейфа ~ 100 В сопровождалось ухудшением вакуума на порядок. Скорость увеличения напряжения ограничивалась допущенным верхним пределом остаточного давления $8 \cdot 10^{-7}$ Торр. Одним из наиболее продолжительных этапов (7 часов) была тренировка резонатора на низком уровне мощности (до 100 Вт), когда интенсивное газовыделение было обусловлено мультипакторным разрядом. При этом генератор возбуждался на фиксированной частоте.

Характерные зависимости напряжения на первом ускоряющем зазоре резонатора и давления остаточного газа от времени тренировки приведены на рис 4. Дальнейший подъем напряжения проводился в режиме автоколебаний и был ограничен высоковольтными пробоями при превышении остаточного давления $\sim 5 \cdot 10^{-6}$ Торр. Подъем до номинального уровня мощности осуществлялся в течение 4 часов с промежуточной тренировкой в выходные дни на половинной мощности в течение 26 часов. После тренировки на номинальном уровне мощности в течение 24 часов до уровня вакуума $4 \cdot 10^{-7}$ Торр напряжение было поднято еще на 20%. Тренировка резонатора на всех этапах проводилась в непрерывном режиме генерации, так как импульсный режим оказался малоэффективным.

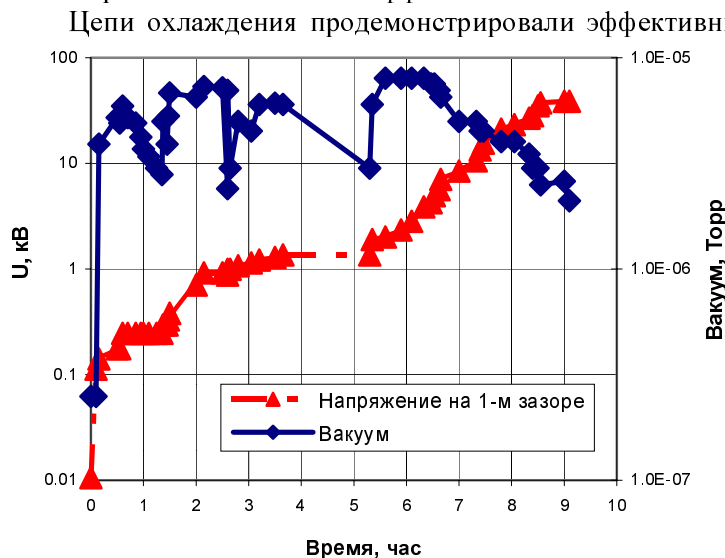


Рис. 4. Диаграмма ВЧ тренировки группирователя.

Цепи охлаждения продемонстрировали эффективный теплосъём. Температурный градиент охлаждающей воды в цепи максимального тепловыделения (кольцо Splitring) составил 9°С при протоке 15 л/мин.

Выводы

Результаты проведенных испытаний подтвердили правильность расчетов и технических решений. Резонатор работает надежно в широком диапазоне напряжений.

Конструкция двух других группирователей линейного ускорителя ISAC [2, 3], которые должны быть изготовлены в 1999 г., будет базироваться на данной разработке.

Литература

1. P.W.Schmor at al. Status of the TRIUMF-ISAC Facility for Accelerating Radioactive Beams, Proc. of the PAC-97, Vancouver, Canada, 12-16 May 1997, Vol.1, pp. 956-958.
2. R.Laxdal at al. A Separated Function Drift-Tube Linac for the ISAC Project at TRIUMF. Proc. of the PAC-97, Vancouver, Canada, 12-16 May 1997, Vol.1, pp. 1194-1196.
3. Y.V.Bylinsky at al. A Triple Gap Resonator Design for the Separated Function DTL at TRIUMF. Proc. of the PAC-97, Vancouver, Canada, 12-16 May 1997, Vol.1, pp. 1135-1137.
4. E.Muller and H.Klein. The Split-Ring Loaded RF Cavity, Nuclear Inst. And Meth. 224 (1984), p.17.