

Создание ВЧ-системы разрезного микротрона-рекуператора для мощного лазера на свободных электронах

В.С. Арбузов, Б.А. Баклаков, В.П. Болотин, А.А. Бушуев, В.Ф. Веремеенко, В.Н. Волков, Н.Г. Гаврилов, Э.И. Горникер, Ю.А. Евтушенко, Е.К. Кенжебулатов, А.А. Кондаков, Н.Л. Кондакова, С.А. Крутихин, Я.Г. Крючков, И.В. Купцов, Г.Я. Куркин, В.Ю. Лоскутов, Л.Э. Медведев, Л.А. Мироненко, С.В. Мотыгин, В.Н. Осипов, В.М. Петров, А.М. Пилан, А.М. Попов, И.К. Седяров, А.Г. Трибендис, Н.Г. Фомин, А.Р. Штейнке
Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера, Новосибирск, Россия

Описана ВЧ-система разрезного микротрона-рекуператора на энергию 100 МэВ, создаваемого в Институте ядерной физики для Сибирского центра фотохимических исследований. ВЧ-система работает на частоте 180,4 МГц и состоит из двух частей: ВЧ-системы инжектора на энергию 2 МэВ и ВЧ-системы собственно микротрона. ВЧ-система инжектора включает в себя 3 резонатора – группирующий и 2 ускоряющих. Резонаторы возбуждаются соответственно от генератора 2,5 кВт и двух мощных одноламповых усилителей по 130 кВт. ВЧ-система микротрона включает в себя 16 резонаторов, работающих при напряжении на зазоре 850 кВ на каждом резонаторе. Резонаторы через распределительные фидерные линии возбуждаются от двух 4-ламповых усилителей мощности по 600 кВт каждый. В мощных усилительных каскадах используются тетроды ГУ-101А. Система управления контролирует амплитуду и фазу ВЧ-напряжений в резонаторах и вырабатывает сигналы синхронизации для электронной пушки. Приводятся результаты работы ВЧ-системы инжектора и состояние работ по ВЧ-системе микротрона.

Введение

Проект мощного ЛСЭ [1] предусматривает создание восьмиоборотного микротрона-рекуператора на энергию 100 МэВ, средний ток – до 50 мА. Общая схема ВЧ-системы микротрона-рекуператора приведена на рис. 1. Резонатор-группирователь (2) инжектора возбуждается ВЧ-генератором (1) мощностью 2,5 кВт. Два ускоряющих резонатора (4) инжектора возбуждаются двумя генераторами (3) мощностью по 90 кВт. 16 ускоряющих резонаторов (7) микротрона возбуждаются через систему волноводов (6) двумя генераторами (5) общей мощностью 1,1 МВт, которая ограничена существующим источником анодного питания.

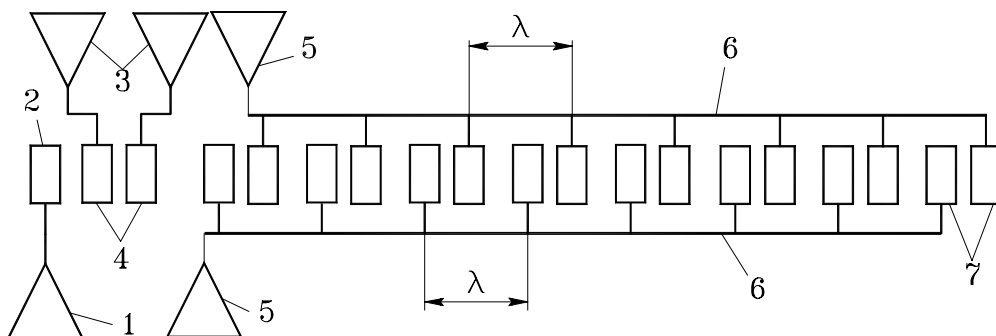


Рис. 1. Общая схема ВЧ-системы микротрона-рекуператора.

ВЧ-резонаторы

Конструкция ускоряющих резонаторов микротрона подробно описана в [2]. Корпуса резонаторов изготавливаются из биметалла (8 мм меди и 7 мм нержавеющей стали), получаемого с помощью диффузионной сварки. Каналы водяного охлаждения корпуса находятся в нержавеющей стали.

На рис. 2 приведен схематический чертеж двухрезонаторной секции. Каждый резонатор имеет 2 бесконтактных узла подстройки частоты рабочей моды (2) и 2 узла подстройки высших мод (3). Сверху на резонаторе расположен коаксиальный ввод мощности (1) с цилиндрическим керамическим окном. Каждый ввод мощности перед установкой на резонатор испытывается на стенде. Для измерения напряжения на зазоре имеется индуктивный датчик (4). Снизу на резонаторе установлен магниторазрядный насос (5).

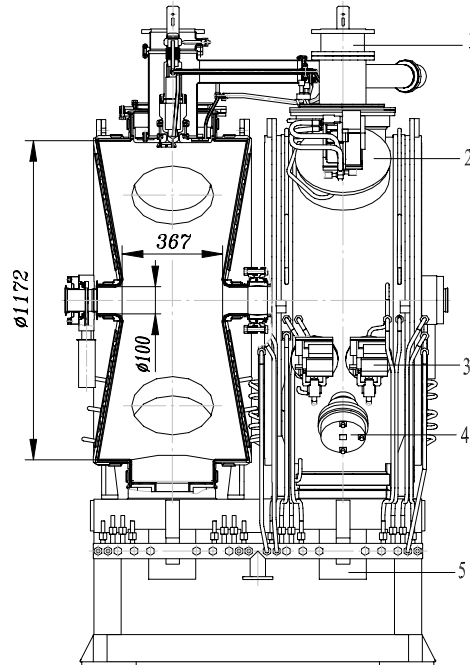


Рис. 2. Схематический чертеж резонатора. Резонатор изображен на подставке, используемой при испытаниях. В ускоряющий промежуток резонаторы подвешиваются на специальной раме.

В табл. 1 приведены параметры резонатора для основной моды типа E_{010} .

После сборки резонатора на специальном стенде [3] проводятся радиотехнические измерения параметров основной и высших мод. Измеряются частоты и добротности мод резонатора в диапазоне до 1500 МГц при различных положениях элементов подстройки. Подстройки высших мод слабо влияют на частоту основной моды, но перестраивают частоты высших мод. Для каждой моды измеряется распределение электрического поля на оси резонатора и рассчитывается величина характеристического сопротивления. Подстройки располагаются таким образом, чтобы пролетающие электронные ступки слабо взаимодействовали с высшими модами.

Таблица 1. Параметры ускоряющего резонатора.

Резонансная частота	f_0	180,4	МГц
Диапазон перестройки частоты	Δf_0	320	кГц
Собственная добротность резонатора	Q_0	40000	
Шунтовое сопротивление	$R = U^2 / 2P$	5,3	МОм
Характеристическое сопротивление	$\rho = R/Q_0$	133,5	Ом
Напряжение на зазоре	U	0-950	кВ
Мощность потерь в резонаторе при $U=950$ кВ	P	85	кВт

После измерений два резонатора собираются в секцию, откачиваются и прогреваются при температуре 300°C в печи. Вакуум в резонаторе после прогрева лучше 10^{-7} Па. Перед установкой в микротрон все резонаторы испытываются на стенде от одного из ВЧ-генераторов инжектора в непрерывном режиме при напряжении до 1100 кВ. При испытаниях тренируется мультипактор, проверяется электрическая прочность резонатора и измеряется уход частоты основной моды при изменении напряжения с отключенной системой АПЧ. Конструкция резонаторов обеспечивает частичную компенсацию тепловых уходов частоты. При изменении напряжения от 100 до 900 кВ уход частоты составляет около 10 кГц.

ВЧ-генераторы

ВЧ-генератор модульной конструкции [4] разработан и изготовлен в ИЯФ. Анодный выпрямитель [5] на напряжение 8 кВ и мощность 2,5 МВт также разработан и изготовлен в ИЯФ. Выпрямитель оборудован системой быстрого (50 мксек) защитного отключения.

Каждый генератор – четырехкаскадный (рис. 3). Первый и второй усилительные каскады (4) выполнены на тетрадах ГУ-92А. Третий и четвертый (выходной) каскады (5,6) выполнены на основе тетрода ГУ-101А. Два генератора с одномодульными выходными каскадами на ГУ-101А возбуждают резонаторы инжектора микротрона-рекуператора.

Генераторы связаны с резонаторами (1) ВЧ-трактами, состоящими из прямоугольных волноводов (3) сечением 958 x 415 мм и коаксиальных линий.

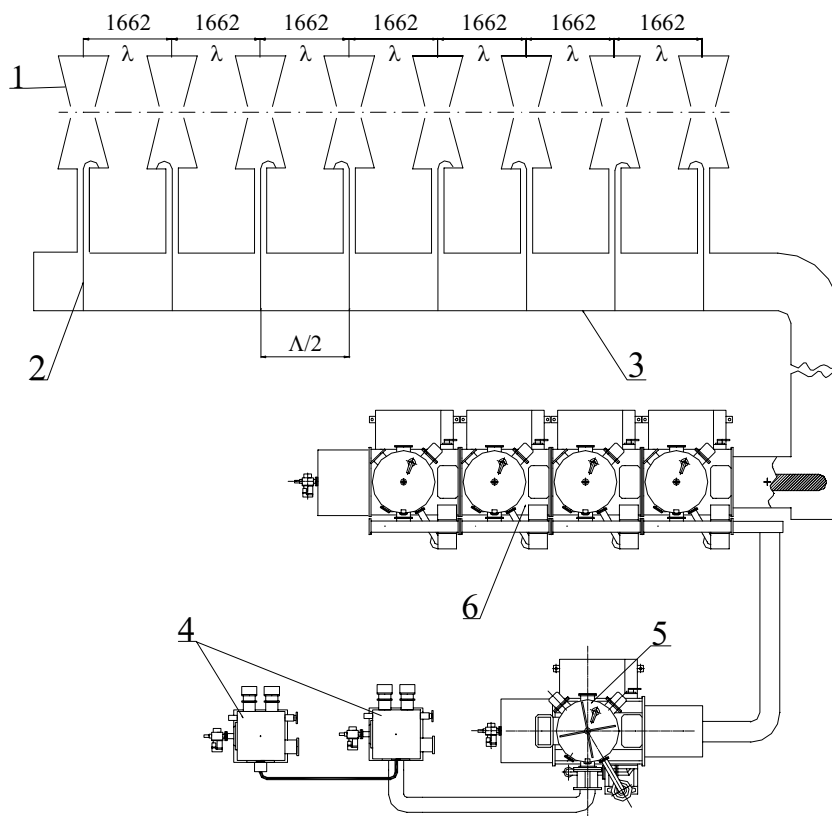


Рис. 3. Схема питания 8 резонаторов микротрона от 1-го генератора.

Система деления мощности между ускоряющими резонаторами (поз. 1, рис. 3) состоит из прямоугольного волновода (3), соединенного коаксиальными фидерами с резонаторами. Резонаторы разделены на две группы по 8 резонаторов, каждая из которых подключена к своему волноводу. Дистанция между центрами резонаторов в группе равна длине волны в вакууме (1662 мм). Деление мощности между резонаторами в группе достигается следующим образом.

Каждый резонатор имеет коаксиальный вход и подключен к распределительному волноводу посредством волноводно-коаксиального перехода (ВКП, поз. 2). Длина волны в волноводе равна удвоенной длине волны в вакууме. Таким образом, расстояние между ВКП соседних резонаторов в группе равно половине длины волны в волноводе и, следовательно, модули напряженности полей волновода в сечениях включения ВКП одинаковы, а фазы отличаются на 180° . Правильная фазировка резонаторов обеспечивается тем, что петли связи в соседних резонаторах группы развернуты на угол 180° относительно друг друга. Мощности возбуждения всех резонаторов одинаковы, если резонаторы имеют одинаковые шунтовые сопротивления и коэффициенты связи с коаксиальной линией.

Система управления

Система управления регулирует амплитуду ускоряющего напряжения и осуществляет фазирование генераторов между собой и с ВЧ-системой инжектора. ВЧ-напряжения генераторов управляются независимо, а их регулирование осуществляется одинаковым образом.

Для стабилизации амплитуды ускоряющего напряжения введена цепь обратной связи. Сумма протектированных ВЧ-напряжений с измерительных петель резонаторов сравнивается с опорным сигналом ЦАП. Выход усилителя сигнала ошибки управляет усилением каскада в тракте генератора ВЧ-мощности.

Ускоряющие напряжения резонаторов, подключенных к одному генератору, фазуются между собой благодаря соответствующему выбору геометрических размеров элементов волноводного делителя мощности и выбору расстояния между резонаторами. В этом случае ошибка фазирования напряжений резонаторов между собой определяется точностью системы автоподстройки резонаторов. Для фазирования суммарного ускоряющего напряжения резонаторов канала по отношению к инжектору, из напряжений с измерительных петель резонаторов синтезируется ВЧ-сигнал, представляющий суммарное ускоряющее напряжение резонаторов для пучка. Фазометр сравнивает по фазе этот сигнал с общим опорным сигналом ВЧ-системы от задающего генератора. Выход фазометра управляет электронным фазовращателем в тракте усиления ВЧ-мощности генератора. Начальная установка фазы канала производится с помощью фазовращателя опорного ВЧ-напряжения, включенного между задающим генератором и фазометром.

Состояние работ

На инжекторе получен ток ускоренных электронов 45 мА при энергии 2 МэВ. При этом напряжение на группирующем резонаторе было 100 кВ, на каждом ускоряющем резонаторе – 770 кВ, мощность, передаваемая пучку в ускоряющем резонаторе, – 31.5 кВт. Подробное описание ВЧ-системы инжектора и результаты работы с пучком даны в [6].

В ускоряющий промежуток микротрона установлены 10 резонаторов (5 секций). 2 резонатора (1 секция) испытаны и подготовлены к установке. Производство резонаторов заканчивается в этом году. Всего для различных установок был изготовлен 21 такой резонатор.

Ведется монтаж мощного ВЧ-генератора. Аналогичный генератор был испытан в ВЧ-системе накопителя ВЭПП-4. При испытании была получена мощность 500 кВт при КПД каскада 53 %.

Список литературы

- [1] Б.А. Баклаков и др. “Статус лазера на свободных электронах для Сибирского центра фотохимических исследований”. XIII Российская конференция по использованию синхротронного излучения, сборник трудов, Новосибирск, 17-21 июля 2000, с.24-29.
- [2] N. Gavrilov et al. “RF Cavity for the Novosibirsk Race-Track Microtron-Recuperator”, препринт ИЯФ им Г.И.Будкера СО РАН 94-92, Новосибирск, 1994.
- [3] E. Kenjebulatov et al. “Setup for Measuring RF Characteristics of Accelerating Cavities”. Proceedings of XVII International Conference on High Energy Accelerators, September 7-12, 1998, Dubna, Russia, p.131-133.
- [4] В.С. Арбузов и др. “Мощный УКВ генератор модульной конструкции для накопителей и ускорителей”. XVI Собрание по ускорителям заряженных частиц, октябрь 1998, Протвино.
- [5] В.А. Ваклаков et al. “The 8 kV Power Supply for RF Generators Anode Feeding”. XVII International Conference on High Energy Accelerators, 1998, Dubna, Russia.
- [6] V. Arbuzov et al. “RF System of Electron Injector for the Race-Track Microtron-Recuperator and Results of its Operation with Electron Beam”. 16th International Workshop on Charged Particles Linear Accelerators, September 6-12, 1999, Alushta, Ukraine, Вопросы атомной науки и техники, №4, серия Ядерно-физические исследования (35), с.26-28, НИЦ ХФТИ, Харьков, Украина.