

## ИССЛЕДОВАНИЕ МАКЕТА ИМПУЛЬСНОГО ГИРОКОНА САНТИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

В.В.Балакин, О.Н.Брежнев, М.Н.Захваткин, С.Ю.Казаков,  
А.В.Кожемякин, Н.А.Соляк, В.Л.Клюев, Г.И.Исенов

Институт ядерной физики СО АН СССР, Новосибирск

Для возбуждения ускоряющей структуры ВЛЭПП [1] необходим мощный усилитель СВЧ-колебаний сантиметрового диапазона. Параметры такого источника должны быть следующие:  $P = 10^8$  Вт,  $\tau_{imp} = 1 \cdot 10^{-6}$  с, частота повторений  $F = 10+100$  Гц. Усилитель должен обладать высоким КПД, высокой стабильностью и надежностью, большим коэффициентом усиления (к.у.), что необходимо для фазировки большого количества таких источников ( $\sim 10^3$  шт.).

В Институте ядерной физики СО АН СССР начаты работы по созданию одного из вариантов такого усилителя - гирокон [3]. Гирокон был выбран по двум причинам; во-первых, он обладает высоким КПД, во-вторых, развернутый пучок "размазывается" по большой площади, что уменьшает тепловые нагрузки на коллектор и ослабляет влияние пространственного заряда.

Был рассчитан и изготовлен макет многорезонаторного импульсного гирокон-а сантиметрового диапазона, схема которого приведена на рис.1. Макет сделан разборным, с индиевыми уплотнениями, что обеспечивает в системе вакуум  $10^{-7}$  торр.

Источником РЭП для макета служит ускоритель ЭЛИТ-Л2 [2], со следующими параметрами:  $U = 1,2$  МВ,  $I = 200$  А,  $\tau_{imp} = 1 \cdot 10^{-6}$  с частота повторений  $F = 1+2$  Гц. Фазовый объем пучка составляет  $\Omega = \pi \Delta r \Delta \varphi = 5 \cdot 10^{-2}$  рад·см. С помощью магнитной линзы пучок фокусируется и через диафрагму  $\phi 15$  мм попадает на вход гирокон (рис.1).

Устройство гирокон. Расчет. Система развертки исследуемого макета состоит из входного резонатора, возбуждаемого от генератора и трех пассивных резонаторов (рис.1). Частоты всех резонаторов в системе развертки в два раза ниже, чем рабочая частота гирокон, т.е. макет работает как умножитель частоты. Такой режим выбран затем, чтобы увеличить размер отверстий для пучка в резонаторе развертки до диаметра 30 мм, необходимого для работы с током 200 А. Расчеты показывают, что пучок ЭЛИТ-Л2 может быть проведен по тракту гирокон без потерь, коэффициент усиления составляет 65-70 дБ, что хорошо согласуется с экспериментальными данными.

После системы развертки угол отклонения, приобретенный пучком, составляет  $8^\circ$ , дальнейшее увеличение угла было ограничено электрической прочностью последнего резонатора развертки. Отклоненный от оси пучок с помощью направляющей линзы (рис.1), поворачивается в выходной резонатор. Одновременно эта линза за счет aberrаций фокусирует пучок, размер которого удается уменьшить до диаметра 12 мм в плоскости выходного резонатора. Полученный расчетный КПД гирокон составляет 60+70% при условии полного торможения пучка в резонаторе. Основные причины, ведущие к снижению КПД, следующие: энергетический и угловой разброс в пучке, получившийся в результате развертки ( $\Delta U/U = 15\%$ ,  $\Delta \varphi/\varphi = 12\%$ ), а также неоднородность тормозящего поля в выходном резонаторе на размере пучка. В расчетах не учитывалось влияния пространственного заряда пучка, играющего роль на последних стадиях торможения, а также поперечные силы, действующие на частицы, кроме составляющей поля  $H_z$ , которая может быть скомпенсирована внешним постоянным магнитным полем [3]. Точность расчета КПД составляет 10+15%.

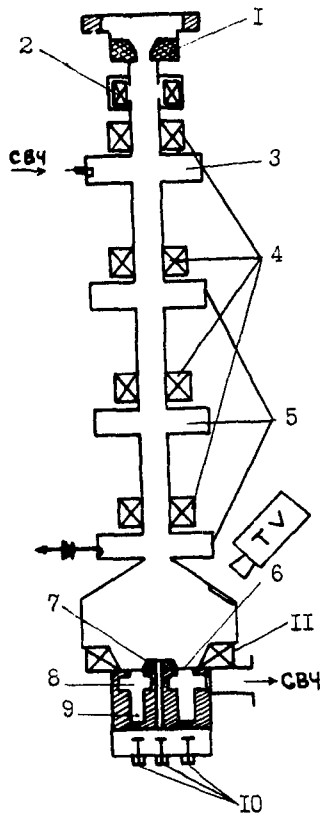


Рис. I. Схема гирокона :

I - графитовая диафрагма, 2 - пояс Роговского, 3 - входной резонатор, 4 - магнитная линза, 5 - пассивный резонатор, 6 - фольга, 7 - графитовый приемник пучка, 8 - выходной резонатор, 9 - коллектор, 10 - токовые датчики, II - направляющая линза.

Экспериментальное исследование. При работе с макетом гирокона было обнаружено, что в промежуточных резонаторах системы развертки возникает мультипакторный разряд, который удалось подавить, покрывая резонаторы сажей. Не покрывались входной и последний резонаторы развертки, где напряжения ниже и выше порога горения мультипактора.

Вторым явлением, с которым столкнулись при работе с макетом - самовозбуждение, возникающее при токе пучка  $\approx 100$  А. Дальнейшее увеличение тока приводило к укорочению его длительности, одновременно детектором через окно в конусе регистрировался СВЧ-сигнал. Основная мощность излучения наблюдалась на длине волны 4 см, что совпадает с основной модой  $E_{010}$  пролетных труб. Добротность труб оказалась высокой  $Q = 300-400$ , а обратная связь приводила к самовозбуждению. После уменьшения добротности пролетных труб ферритовыми поглотителями удалось избавиться от этого явления.

Выходной резонатор представляет собой кольцевой резонатор бегущей волны, имеющий в верхней и нижней стенках щели для проведения пучка (рис.2). Рабочей модой является колебание типа  $E_{210}$  с частотой в два раза выше частоты развертки. Для вывода СВЧ-энергии в резонаторе сделаны два окна связи под углом  $132^\circ$ , каждое из которых отводит мощность в отдельный волновод.

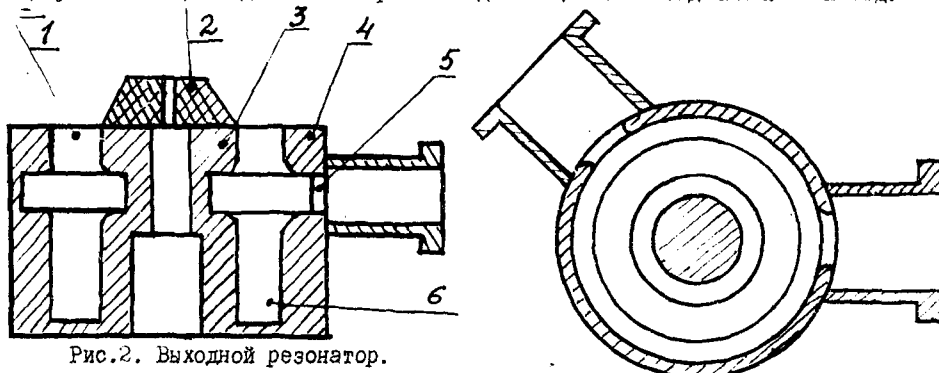


Рис.2. Выходной резонатор.

1 - фольга, 2 - графитовый приемник пучка, 3 - внутренний электрод, 4 - внешний электрод, 5 - окно связи, 6 - коллектор.

Неточное расположение щели для пучка приводит к перекачке мощности из волны  $E_{210}$  в одну из мод  $H_{11} + H_{51}$ , для которых щель не является заперделной. Это приводит к излучению мощности из резонатора через щели и снижению его КПД. Но даже при правильном выборе положения щели возмущение полей окнами связи оказывается значительным и излучение из резонатора все равно возникает. Избежать этого позволяет либо распределенный по азимуту вывод энергии, либо сетка, исключающая излучение из резонатора. В резонаторе (рис.2), который использовался в гироконе, входная щель для пучка была заварена алюминиевой фольгой толщиной 10 мкм. Дополнительный угловой разброс, вносимый фольгой, не превышает 0,05 рад.

Настройка и измерения. Настройка заключалась в подборе режима магнито-оптической системы гирокона для максимального прохождения РЭП без СВЧ-возбуждения и подборе фаз и амплитуд возбуждения для проведения развернутого пучка через выходной резонатор. Оценка коэффициента токопрохождения осуществлялась сравнением токовых сигналов с входного и выходного поясов Роговского (рис.1). Практически весь ток, прошедший через входную диафрагму, достигает выходного резонатора. По сигналу с датчика тока, расположенного под центральным электродом выходного резонатора, а также визуально с помощью телекамеры, работающей в ИК-диапазоне, электронный пучок посредством корректирующих катушек нацеливался в центр (без СВЧ) (см.рис.1).

Настройка фаз и амплитуд возбуждения производилась по показаниям токового датчика, находящегося под коллектором. Он представляет собой 32 графитовые ламели, равномерно расположенные по азимуту на радиусе канала коллектора, на них попадает малая часть тока из коллектора через отверстия  $\phi$  1 мм. Гистограмма заряда с ламелей за импульс выводилась на осциллограф. Задача настройки заключалась в получении максимально однородной осциллограммы максимальной амплитуды, что достигалось подстройкой аттенкаторов и фазовращателя в системе возбуждения.

СВЧ-мощность на выходе гирокона поглощалась в нагрузках и измерялась с помощью калориметра МЗ-47. Одновременно малая доля мощности отводилась

петлей и после детектирования, огибающая СВЧ-сигнала с нагрузки наблюдалась на осциллографе. Настройка на максимум мощности осуществлялась как по показаниям калориметра, так и по настройке на максимум сигналов с обеих нагрузок.

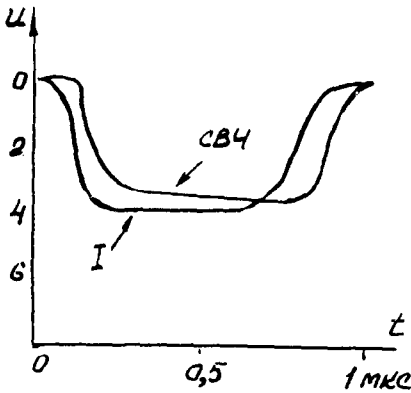


Рис.3. Осциллограммы тока и огибающей СВЧ-импульса в нагрузке.

В последующих экспериментах был использован резонатор с распределенным по азимуту выводом энергии в огибающий волновод. Такой способ вывода, а также подбор длины коллектора и расположения входной и выходной щели позволили устранить паразитное излучение в щель и отказаться от алюминиевой фольги. Кроме того, соответствующим выбором размеров огибающего волновода и расположения отверстий связи можно добиться направленного излучения мощности из резонатора в волновод. При работе с данным резонатором была зафиксирована мощность 60 МВт в один вывод.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Балакин В.Е., Будкер Г.И., Скринский А.Н. О возможности создания установки со встречными электрон-позитронными пучками на сверхвысокие энергии. Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, ОИЯИ, Дубна, 1979, с.140. Препринт ИЯФ СО АН СССР 78-101, Новосибирск, 1978.
2. Балакин В.Е., Бамбуров Ю.Г., Долгушин В.М. и др. Генератор электронного пучка ЭЛИТ-12. IV Всесоюзный симпозиум по сильноточной электронике. Тезисы докладов т.П, Томск, Институт сильноточн. электроники СО АН СССР, 1982.
3. Г.И.Будкер, М.М.Карлинер, И.Г.Макаров и др. Гирокоин-мощный СВЧ-генератор с высоким КПД. Препринт ИЯФ СО АН СССР 78-9, Новосибирск 1978.

Результаты. На рис.3 представлены осциллограммы огибающих СВЧ-импульса с нагрузки и тока в коллекторе. В экспериментах была получена мощность 50 МВт, измеренная с помощью калориметра. КПД при этом составляет 20% и ограничен, в основном, пробоями в выходном резонаторе. Дальнейшее повышение КПД требует более тщательного выбора параметров и местоположения направляющей линзы для проведения полного тока через щель выходного резонатора и использования нескольких резонаторов для полного торможения развернутого пучка. Измеренная полоча частот составляет 3+4 МГц.