

09;12

Экспериментальное исследование макета 25-мегаваттного СВЧ компрессора трехсантиметрового диапазона длин волн

© С.Н. Артеменко, В.А. Августинович, В.Л. Каминский, П.Ю. Чумерин, Ю.Г. Юшков

Научно-исследовательский институт ядерной физики при Томском политехническом университете, 634050 Томск, Россия

(Поступило в Редакцию 16 февраля 2000 г.)

Представлены результаты экспериментального исследования резонансного СВЧ компрессора трехсантиметрового диапазона длин волн с газовой изоляцией и выводом энергии через сверхразмерный коаксиальный интерференционный переключатель, расчетной мощностью выходных сигналов ~ 25 MW, длительностью сигналов 2 ns, коэффициентом усиления 26 dB и КПД $\sim 57\%$. Достигнут коэффициент усиления 20 dB при пиковой мощности выходных сигналов 12 MW, длительности 2 ns, КПД $\sim 24\%$ и мощности бегущей волны резонатора 24 MW.

1. Мощность выходных сигналов известных резонансных СВЧ компрессоров с одинаковыми накопительными резонаторами с газовой изоляцией и выводом энергии через интерференционные переключатели на основе волноводных тройников составляет 1–3 MW в 3 см диапазоне длин волн и 50–200 MW в 10 см диапазоне, а коэффициент усиления соответственно 13–15 dB и 15–17 dB при длительности сигналов ~ 2 –5 ns [1]. Заметно более высокие характеристики таких компрессоров не могут быть получены из-за низкой собственной добротности Q_0 одноволновых резонаторов и малой площади S их поперечного сечения. Это следует из выражений для предельного значения коэффициента усиления M^2 резонансных компрессоров

$$M^2 = Q_0 / \omega T \quad (1)$$

и мощности P , передаваемой по волноводу электромагнитной волны,

$$P = AE^2S, \quad (2)$$

где ω — циклическая рабочая частота резонатора; T — время двойного пробега волны вдоль резонатора; A — числовой коэффициент, определяемый геометрией волновода и типом распространяющейся волны; E — напряженность электрической составляющей волны.

Из (1), (2) видно, что при заданных ω , T и E единственным путем повышения коэффициента усиления и мощности компрессора является использование резонаторов с более высокой добротностью и большей площадью сечения, что означает необходимость применения сверхразмерных резонаторов с большим объемом. В этом случае, например, для цилиндрических резонаторов коэффициент усиления будет расти пропорционально радиусу резонатора, а мощность — квадрату радиуса. Как показывают расчеты, в 3 см диапазоне длин волн сверхразмерные цилиндрические резонаторы с $H_{01(p)}$ -видами колебаний могут иметь добротность $Q_0 \sim 1$ – $1.5 \cdot 10^5$ при площади сечения ~ 50 – 100 cm². Поэтому при $T = 2$ –5 ns коэффициент усиления компрессора с такими резонаторами может достигать ~ 30 dB, а мощность

выходных сигналов ~ 10 – 100 W и более. Однако создание систем с такими характеристиками сдерживается отсутствием эффективных способов и устройств быстрого вывода энергии из сверхразмерных резонаторов.

В [2] сообщалось о возможности быстрого вывода энергии из крупногабаритных (многоволновых) осесимметричных резонаторов через интерференционные переключатели на основе сверхразмерных коаксиальных линий, в которых регулирование связи резонатора с нагрузкой обеспечивается управлением с помощью коммутатора интерференцией волн, излучаемых в нагрузку из линии и радиального зазора, образованного разрывом внутреннего проводника линии. Там же приведены результаты первых экспериментов, которые подтвердили работоспособность таких переключателей.

В настоящей работе представлены новые данные исследования вывода энергии из многоволнового цилиндрического резонатора с $H_{01(p)}$ -видом колебаний через сверхразмерный коаксиальный интерференционный переключатель с рабочей волной типа H_{01} . Целью исследований являлась разработка макета СВЧ компрессора 3 см диапазона с коэффициентом усиления и мощностью выходных сигналов, на порядок превышающих аналогичные характеристики известных компрессоров.

2. Исследованный макет компрессора ориентирован на работу с газовой электроизоляцией накопительного объема, упрощающей решение проблемы переключения системы из режима накопления в режим вывода, и уровень мощности выходных сигналов ~ 25 MW при длительности ~ 2 ns. Так как предельная плотность потока мощности передаваемой по волноводу электромагнитной волны при газовой изоляции равна ~ 1 – 5 MW/cm² [3], то площадь сечения резонатора должна составлять не менее 25 cm². Поэтому в экспериментах использовались резонатор с площадью сечения ~ 65 cm² (диаметром 9 см) и переключатель с площадью передающей части коаксиальной линии ~ 50 cm². Для обеспечения времени двойного пробега волны вдоль резонатора, сравнимого с требуемой длительностью выходных сигналов, длина резонатора была выбрана равной ~ 25 см.

С целью снижения влияния межвидового взаимодействия колебаний на окна связи резонатора с питающим трактом энергия к резонатору подводилась через согласованный E -тройник и возбуждение рабочего вида осуществлялось через два окна, расположенных на серединах радиусов одного диаметра торцевой стенки резонатора. При таком способе возбуждения добротность резонатора без переключателя на $H_{01(p)}$ -видах колебаний в диапазоне частот 8.2–11.2 GHz составляла $0.9–1.2 \cdot 10^5$. "Разброс" добротности, скорее всего, связан с неравномерностью плотности спектра колебаний в указанном диапазоне частот и соответственно различной степенью влияния межвидового взаимодействия на рабочий вид.

Для выявления влияния переключателя на добротность была исследована ее зависимость от частоты для резонатора с расположенным в нем внутренним проводником переключателя, который крепился соосно с резонатором к торцевой стенке, свободной от входных окон связи. Проводник имел диаметр 4.5 см и длину ~ 9 см, оптимальные для переключателя с рабочей частотой 9.12 GHz. Было установлено, что по мере роста частоты добротность рабочего вида монотонно растет от $4 \cdot 10^4$ при 8.2 GHz до $7 \cdot 10^4$ при 11.2 GHz, что, скорее всего, обусловлено частотной зависимостью постоянной затухания H_{01} -волны в коаксиальной линии. На частотах, близких к критической (6.8 GHz), постоянная велика и снижение добротности существенно. По мере роста частоты постоянная падает и добротность растет. Такое влияние затухания означает необходимость применения переключателя с минимальной длиной и частотой, существенно превышающей критическую.

Замена торцевой стенки резонатора переключателем не приводила к заметному снижению добротности резонатора, составлявшей около $5 \cdot 10^4$. Длины входного и выходного плеч переключателя при этом равнялись 4.5 см, высота радиального зазора ~ 2.45 см, а диаметр внешнего проводника совпадал с диаметром резонатора и составлял 9 см. В объеме резонатора возбуждался $H_{01(12)}$ -вид колебаний, во входном плече переключателя — $H_{01(2)}$ и в радиальном зазоре — $H_{01(1)}$. Расчеты показывают, что при достигнутой добротности системы ее коэффициент усиления может составлять ~ 26 dB.

Переходное затухание переключателя сильно зависит от высоты радиального зазора и перекосов его стенок. Изменение высоты зазора на 5–10% или перекося стенок на $2–3^\circ$ приводят к практически полному открыванию резонатора. Зависимость добротности резонатора от высоты зазора приведена на рис. 1. Отметим также, что за счет потерь на излучение переключатель устранял практически все нерабочие виды колебаний, радиально разрежая спектр резонатора.

3. На высоком уровне мощности исследования выполнены на установке, схема которой представлена на рис. 2, где 1 — СВЧ генератор, 2 — циркулятор, 3 — направленные ответвители, 4 — фазовращатель, 5 — волноводный E -тройник, 6 — входные окна, 7 — резонатор,

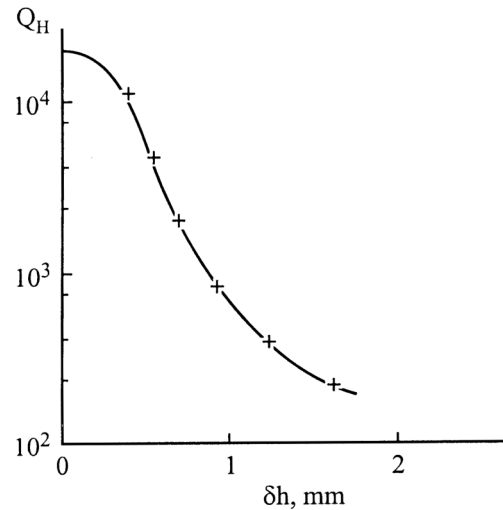


Рис. 1. Зависимость добротности резонатора от изменения высоты радиального зазора переключателя.

8 — сверхразмерный коаксиальный интерференционный переключатель ($8a$ — входное плечо, $8b$ — радиальный зазор, $8c$ — выходное плечо), 9 — коммутатор, 10 — разрядники коммутатора, 11 — волноводные переходы, 12 — согласованные нагрузки, 13 — детекторы.

Система питалась от импульсного магнетрона мощностью до 120 kW с длительностью импульсов $\sim 1 \mu s$. Вывод накопленной СВЧ энергии осуществлялся через переключатель, заканчивавшийся "пакетом" из четырех идентичных плавных волноводных переходов (рис. 2), которые располагались через 90° и трансформировали рабочую H_{01} -волну переключателя в волну H_{10} прямоугольных волноводов каждого из переходов. К выходам переходов подсоединялись элементы волноводных трактов (направленные ответвители, нагрузки и т.п.), необходимые для измерения характеристик излучения (мощности, длительности, типа волны). Вывод через пакет осуществлялся с целью достаточно точного определения параметров выходных сигналов.

Переключение системы из режима накопления в режим вывода выполнялось коммутатором тригatronного типа, включение которого вызывало развитие СВЧ разряда в максимуме φ -й электрической составляющей поля в радиальном зазоре параллельно силовым линиям. Разряд приводил к инверсии фазы волны, излучаемой из зазора, суммированию этой волны в фазе с волной из резонатора и, таким образом, открыванию резонатора. Зажигался разряд в воздухе либо аргоне, заполнявшем резонатор и переключатель при атмосферном давлении. При коммутации на воздухе длительность импульсов составляла 10–20 ns, что в 5–10 раз больше длительности при коммутации в аргоне. Соответственно и амплитуда выходных импульсов на воздухе была заметно (\sim на порядок) меньше, чем на аргоне. Такое отличие связано с особенностями СВЧ разряда в воздухе и аргоне.

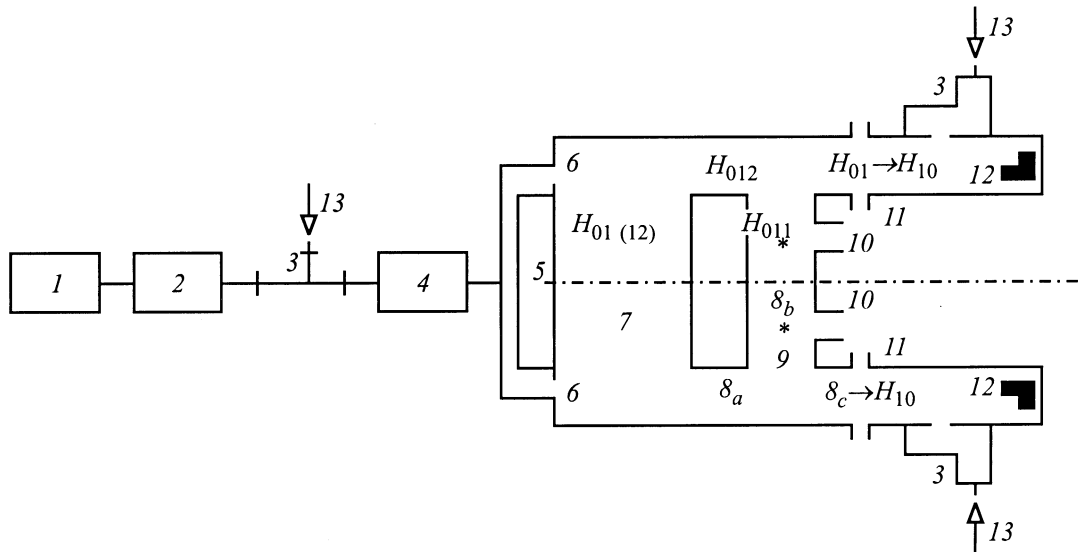


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для исследования макета СВЧ компрессора на высоком уровне мощности.

При максимальной мощности входных импульсов ~ 120 kW мощность бегущей волны резонатора достигала 24 MW. В этом случае при выводе энергии с коммутацией в аргоне на выходе системы на H_{01} -волне коаксиальной линии формировались импульсы длительностью ~ 2 ns по уровню 0.5 и мощностью до 12 MW (~ 3 MW на каждый канал пакета переходов), а КПД системы достигал 24%. Типичная осциллограмма огибающей выходных сигналов приведена на рис. 3.

Эффективный диаметр резонатора радиального зазора, вычисленный по рабочей частоте системы и высоте зазора, составлял ~ 5.6 см. Площадь поперечного сечения такого резонатора равна ~ 20 см². Поэтому при газовой изоляции мощность его бегущей волны может достигать ~ 20 –200 MW. Такого же порядка в зависимости от типа используемого газа будет и предельный уровень мощности выходных сигналов системы.

В заключение отметим имеющиеся в системе проблемы со стабилизацией СВЧ разряда по φ -й электрической составляющей поля в радиальном зазоре. Нестабильность плазменного канала разряда частот приводит к значительному разбросу амплитуды и длительности

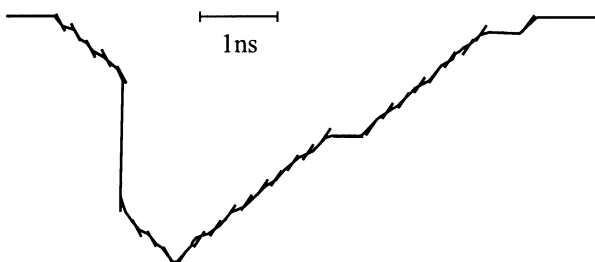


Рис. 3. Огибающая выходных СВЧ импульсов.

выходных сигналов. На данном этапе исследований эти проблемы являются наиболее серьезными.

4. Таким образом в работе продемонстрирована возможность создания СВЧ компрессоров 3 см диапазона длин волн с уровнем мощности выходных сигналов более 10 MW. На высоком уровне мощности показана возможность применения сверхразмерного коаксиального интерференционного переключателя с рабочей волной типа H_{01} как эффективного элемента быстрого вывода энергии. Такой переключатель может быть использован как для формирования мощных и коротких наносекундных импульсов СВЧ, так и для получения мощных и энергоемких (длинных) СВЧ импульсов при выводе энергии из крупногабаритных резонаторов, в том числе из резонаторов совмещенных систем, разработанных, например, на основе обычных коаксиальных либо коаксиальных релятивистских магнетронов.

Представляется реальным, что при увеличении мощности генератора до 250 kW и повышении электрической прочности резонатора увеличением давления аргона мощность сигналов исследованного компрессора может быть повышена до 25 MW. В случае заполнения системы элегазом и увеличения входной мощности до 2–3 MW мощность сигналов может быть увеличена еще приблизительно на порядок. Представляется также реальным, что при использовании исследованной системы в качестве элемента вывода энергии из крупногабаритных резонаторов с объемом ~ 10 –30 л возможны ее питание от генераторов мощностью ~ 10 –30 MW и получение импульсов мощностью 100–200 MW при длительности ~ 50 –100 ns.

Кроме того, представляется возможным мощность выходных сигналов системы повысить до 500 MW путем замены газовой изоляции вакуумной с коммутацией в газонаполненной трубке, как это предложено в [4]. Такая

возможность обусловлена практически полным открыванием переключателя при небольшом изменении высоты радиального зазора (рис. 1), что позволяет располагать разрядник не в максимуме электрической составляющей поля в зазоре. В 10 см диапазоне мощность системы может быть на порядок выше, чем в 3 см.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 97-02-16461).

Список литературы

- [1] Диденко А.Н., Юшков Ю.Г. Мощные СВЧ импульсы наносекундной длительности. М.: Энергоатомиздат, 1984. 112 с.
- [2] Артеменко С.Н., Каминский В.Л., Юшков Ю.Г. // ЖТФ. 1993. Т. 63. Вып. 2. С. 105–112.
- [3] Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р., Смирнов В.П. Справочник по элементам волноводной техники. М.;Л.: ГЭИ, 1963. 359 с.
- [4] Вихарев А.Л., Горбачев А.М., Иванов О.А. и др. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. Вып. 20. С. 6–11.