

09

## Активный компрессор СВЧ-импульсов на осесимметричной моде круглого волновода

© А.Л. Вихарев, А.М. Горбачев, О.А. Иванов, В.А. Исаев,  
С.В. Кузиков, А.Л. Колыско, М.И. Петелин

Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

Поступило в Редакцию 14 апреля 1998 г.

Реализован и исследован новый активный компрессор СВЧ-импульсов в виде осесимметричной полости, образованной: а) брэгговским отражателем, б) цилиндрической секцией и в) выходным резонансным рефлектором, включающим в себя электрически управляемый газовый разрядник. Компрессор возбуждался  $TE_{01}$ -модой круглого волновода на частоте 9.4 GHz. Работая при атмосферном давлении, компрессор имел на выходе импульсы мощностью 1.8 MW и длительностью 25 ns при коэффициенте сжатия около 20.

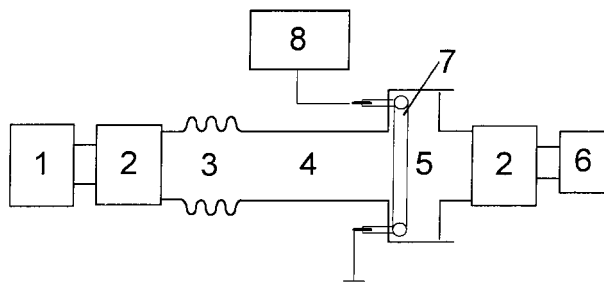
### 1. Введение

В настоящее время один из способов получения мощных СВЧ-импульсов состоит в использовании накопительных резонаторов с модулированной добротностью [1–4], причем для модуляции добротности применяются интерференционные коммутаторы: электрически управляемые или же работающие на самопробое волноводные  $H$ -тройники. В таких компрессорах при одноступенчатом сжатии на частотах порядка 3 GHz получены СВЧ-импульсы с мощностью до 200 MW. Однако при масштабном моделировании в более высокочастотные диапазоны мощность таких компрессоров быстро падает. В работе [5] для увеличения мощности сжатых высокочастотных импульсов было предложено использовать осесимметричные моды сверхразмерных брэгговских резонаторов. Коммутация брэгговского рефлектора может быть осуществлена, в частности, распределенным набором электрически управляемых газоразрядных трубок. При этом, очевидно, необходимо, чтобы плазма, возникающая при пробое в газе, обладала высокой степенью однородно-

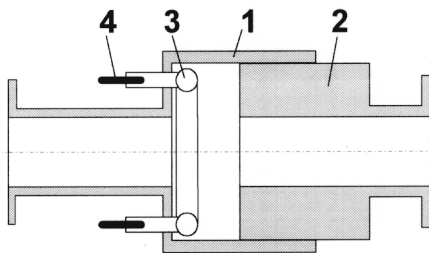
сти. Последнее требование можно ослабить, если электродинамическая структура выходного рефлектора обладает резонансными свойствами и соответственно для нарушения резонанса достаточно относительно небольшого изменения параметров среды, заполняющей трубки. Этот метод можно реализовать в осесимметричном СВЧ-компрессоре, работающем на  $TE_{01}$ -моды и использующем управляемый выходной рефлектор в виде расширения волновода с включением газового разрядника. Запертый в расширении тип колебаний в полосе частот, определяемой его нагруженной добротностью, создает отражение с коэффициентом, близким к единице [6]. Подбором конфигурации расширения можно, не достигая порога самопробоя газоразрядной трубки, обеспечить управляемое переключение компрессора с помощью минимального объема газоразрядной плазмы. Отметим, что использование моды  $TE_{01}$  благоприятно как для обеспечения электропрочности, так и для снижения потерь в стенках компрессора.

## 2. Конструкция СВЧ-компрессора

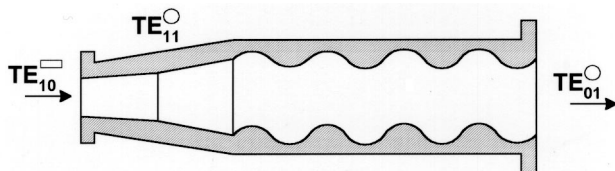
Исследованный в данной работе осесимметричный компрессор (рис. 1) состоял из входного брэгговского рефлектора, отрезка цилиндрического волновода длиной 1 м и диаметром 50 мм и выходного рефлектора, основанного на скачкообразном расширении круглого волновода [6] с включением газового разрядника. Входной брэгговский



**Рис. 1.** Блок-схема компрессора: 1 — СВЧ-генератор, 2 — волноводный трансформатор, 3 — входной брэгговский рефлектор, 4 — отрезок цилиндрического волновода, 5 — управляемый рефлектор, 6 — нагрузка, 7 — газоразрядная трубка, 8 — генератор высоковольтных импульсов.



**Рис. 2.** Выходной резонансный рефлектор: 1 — волновод с диаметром 130 мм, 2 — волновод с диаметром 50 мм, 3 — кварцевая кольцевая трубка, 4 — электрод.



**Рис. 3.** Преобразователь моды  $TE_{10}^{\square}$  прямоугольного волновода в моду  $TE_{01}^{\circ}$  круглого волновода.

рефлектор представлял собой отрезок цилиндрического волновода диаметром 50 мм с неглубокой синусоидальной гофрировкой. Центральная частота рефлектора была равна 9.4 GHz, а ширина полосы запираания (по половинному уровню проходящей мощности) составляла 600 MHz. Вблизи центральной частоты коэффициент отражения по мощности равнялся  $98.5 \pm 0.5\%$ . Выходной рефлектор (рис. 2) был выполнен в виде цилиндрической полости диаметром 130 мм, резонировавшей на моде  $TE_{021}$ . Вблизи передней стенки резонатора располагалась газоразрядная кварцевая трубка в форме кольца диаметром 120 мм. Трубка сечением 10 мм имела два патрубка для откачки и напуска воздуха, давление которого варьировалось от 1 до 10 Torr. Поджиг разряда в трубке проводился через два диаметрально противоположных электрода, на которые подавался импульс с амплитудой 40 kV, длительностью 100 ns и фронтом 10 ns. Ширина резонансной кривой накопительного резонатора

в сборе, измеренная на частоте 9.4 GHz, равнялась  $\Delta f = 0.6$  MHz, что соответствует нагруженной добротности  $Q = 1.5 \cdot 10^4$ . Накопительный резонатор возбуждался от магнетрона с выходной мощностью до 130 kW, длительностью СВЧ-импульсов  $\tau = 5 \mu s$  и частотой повторения  $F = 1$  Hz. Мощность из магнетрона выводилась волной TE<sub>10</sub> прямоугольного волновода. Эта волна в адиабатическом переходе преобразовывалась в моду TE<sub>11</sub> круглого волновода, которая затем поступала в волновод с неглубокой гофрировкой, синусоидальной в плоскости широкой стенки исходного прямоугольного волновода (рис. 3), где преобразовывалась [7,8] в моду TE<sub>01</sub>.

### 3. Результаты испытаний

Предварительная настройка компрессора осуществлялась регулировкой длины цилиндрической секции с помощью свип-генератора так, чтобы минимум отраженного от компрессора СВЧ-сигнала приходился на рабочую частоту магнетрона. Настроенный компрессор запитывался от магнетрона через циркулятор. В момент окончания запитывающего импульса на электроды кварцевой трубки подавался импульс высокого напряжения. При создании в ней плазмы изменялись собственная частота

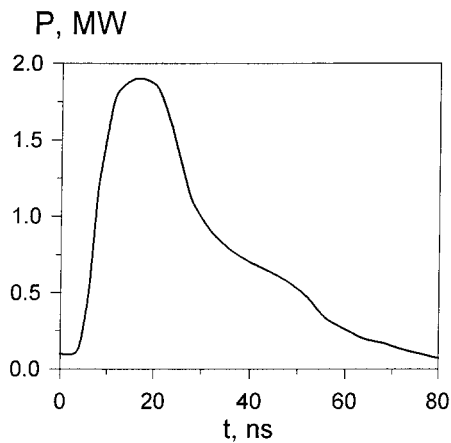


Рис. 4. Осциллограмма выходного СВЧ-импульса.

## Результаты испытаний компрессора

|                                 |                  |
|---------------------------------|------------------|
| Частота                         | 9.4 GHz          |
| Рабочая мода                    | $TE_{01}^0$      |
| Добротность резонатора          | $1.5 \cdot 10^4$ |
| Входная мощность                | 90 kW            |
| Выходная мощность               | 1.8 MW           |
| Длительность выходного импульса | 25 ns            |
| КПД                             | 30%              |

та и добротность выходного рефлектора, что приводило к быстрому увеличению коэффициента пропускания. Энергия из компрессора высвечивалась на моде  $TE_{01}^0$  круглого волновода. В эксперименте варьировались как давление воздуха в разряднике, так и напряжение управляющего высоковольтного импульса, что наряду с длительностью переднего фронта напряжения определяет, согласно [9], скорость распространения фронта ионизации в трубке. Максимальный коэффициент сжатия (отношение мощностей сжатого и первичного импульсов) составил 13–14 dB, при этом длительность сжатого СВЧ-импульса по полувисоте равнялась 25–30 ns (рис. 4). Итоговые результаты эксперимента сведены в таблицу. Ширина спектра генерации использованного магнетрона составляла 1.3 MHz и таким образом вдвое превосходила ширину резонансной кривой накопительного резонатора, что главным образом и ограничивало КПД компрессора. Мощность компрессора ограничивалась тем, что его основной объем был заполнен воздухом при атмосферном давлении. Как показывают оценки, вакуумирование компрессора или, наоборот, повышение давления газа в нем при увеличении мощности первичных импульсов до 1 MW и повышении давления в газоразрядной трубке до величины порядка 100 Torr (во избежание самопробоя) позволят поднять уровень выходной мощности до нескольких десятков мегаватт.

Авторы благодарны В.Е. Балакину, Н.Ф. Ковалеву, А.Г. Литваку, а также Д. Клуни (Англия), Дж. Хиршфилду (США) за полезные обсуждения.

## Список литературы

- [1] Диденко А.Н., Юшков Ю.Г. Мощные СВЧ-импульсы наносекундной длительности. М.: Энергоатомиздат, 1984. 112 с.
- [2] Диденко А.Н., Новиков С.А., Разин С.В., Чумерин П.Ю., Юшков Ю.Г. // Доклады АН. 1991. Т. 321. N 3. С. 518–520.
- [3] Альварес Р.А., Берн Д.П., Джонсон Р.М. // Приборы для научных исследований. 1986. № 10. С. 60–66.
- [4] Августинович В.А., Новиков С.А., Разин С.В., Юшков Ю.Г. // Изв. вузов. Радиофизика. 1985. Т. 28. № 10. С. 1347–1348.
- [5] Вихарев А.Л., Ковалев Н.Ф., Петелин М.И. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. В. 19. С. 41–46.
- [6] Denisov G.G., Kuzikov S.V., Lukovnikov D.A. // Intern. J. of Infrared and Millimeter Waves. 1995. V. 16. N 7. P. 1231–1238.
- [7] Ковалев Н.Ф., Орлова И.М., Петелин М.И. // Изв. вузов. Радиофизика. 1968. Т. 11. № 6. С. 783–786.
- [8] Kuzikov S.V. et al. // Proc. 7th Intern. Workshop on Linear Colliders. Zvenigorod, Russia, 1997. Branch INP 97-07.
- [9] Асиновский Э.И., Василяк Л.М., Марковец В.В. // Теплофизика высоких температур. 1983. Т. 21. В. 3. С. 577–590.