

04;12

## **Плазменный переключатель для мощных СВЧ-компрессоров сантиметрового диапазона, основанный на преобразовании мод $TE_{02} \rightarrow TE_{01}$ круглого волновода**

© А.Л. Вихарев, А.М. Горбачев, О.А. Иванов,  
В.А. Исаев, С.В. Кузиков, М.А. Лобаев

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  
E-mail: ioleg@appl.sci-nnov.ru

Поступило в Редакцию 7 марта 2007 г.

Предложен новый тип плазменного переключателя, обеспечивающего модуляцию добротности накопительного резонатора мощного СВЧ-компрессора и обладающего высокой электропрочностью на всех стадиях работы компрессора. Накопление энергии в компрессоре с таким переключателем происходит на моде  $TE_{02}$ , а вывод энергии — на моде  $TE_{01}$  круглого волновода. Принцип действия переключателя основан на резком увеличении коэффициента трансформации мод  $TE_{02} \rightarrow TE_{01}$  при создании плазмы в размещенном в переключателе управляемом газовом разряднике. Высокая электропрочность переключателя обеспечивается размещением поверхности разрядника в узле поля возникающей в переключателе стоячей волны.

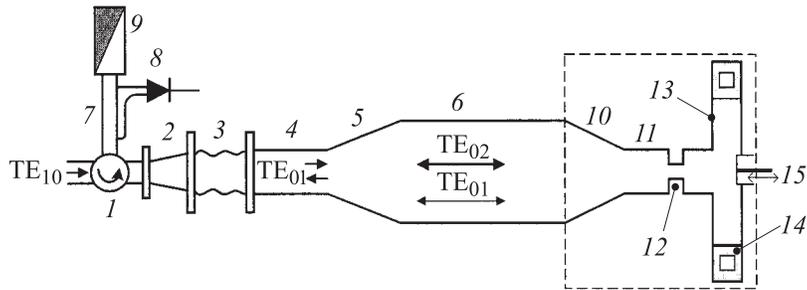
PACS: 84.90.+a

Одним из эффективных методов получения мощных наносекундных СВЧ-импульсов является временная компрессия импульсов с использованием накопительных резонаторов с модулированной добротностью [1]. Для увеличения мощности сжатых импульсов применяются высокодобротные сверхразмерные цилиндрические резонаторы, возбуждаемые на осесимметричных модах с низкими омическими потерями. Модуляция добротности таких резонаторов может быть осуществлена электрически управляемыми плазменными переключателями [2]. Этот метод реализован в СВЧ-компрессоре, работающем на  $TE_{01}$ -моды и использующем резонансный рефлектор в виде скачкообразного расширения волновода

с кольцевыми газоразрядными трубками [3,4]. Применение коммутатора, обладающего резонансными свойствами, позволяет существенно снизить требования на величину плотности и однородность плазмы в разряднике. Недостатком такого переключателя является возрастание в нем напряженности электрического поля на стадии вывода энергии из компрессора. В результате на поверхности кварцевых газоразрядных трубок может возникнуть мультипакторный разряд, что приводит к ограничению длительности и амплитуды сжатого импульса.

В данной работе предложен новый тип плазменного переключателя, основанного на трансформации мод  $TE_{02} \rightarrow TE_{01}$  круглого волновода и обладающего высокой электропрочностью на всех стадиях работы компрессора. Накопление энергии в резонаторе с таким переключателем происходит на моде  $TE_{02}$ , имеющей высокую добротность и электропрочность, а вывод энергии — на моде  $TE_{01}$ . Принцип действия переключателя основан на резком увеличении коэффициента трансформации мод  $TE_{02} \rightarrow TE_{01}$  при создании плазмы в размещенной в переключателе кварцевой газоразрядной трубке. Переключатель обладает резонансными свойствами, что позволяет существенно снизить напряженность электрического поля на стадии накопления энергии в компрессоре. Высокая электропрочность переключателя на стадии вывода энергии из компрессора обеспечивается размещением поверхности кварцевой трубки в узле поля, возникающей в переключателе стоячей волны. Эта особенность позволяет предотвратить развитие на поверхности диэлектрика мультипакторного разряда, обычно ограничивающего коммутируемую мощность в других типах переключателей.

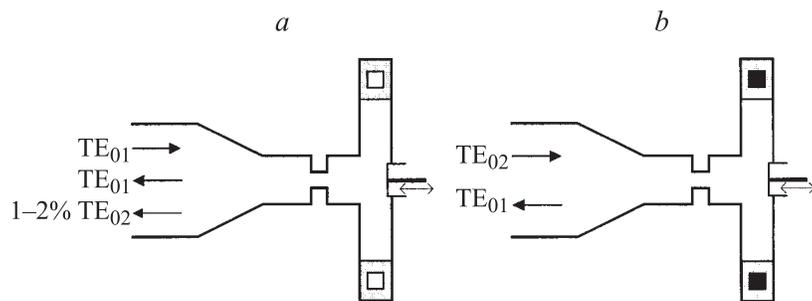
Конструкция и принцип работы СВЧ-компрессора с новым переключателем поясняются на рис. 1. Излучение от СВЧ-генератора в виде моды  $TE_{10}^{\square}$  прямоугольного волновода преобразуется в моду  $TE_{01}^{\circ}$  круглого волновода с помощью преобразователей моды 2, 3 и поступает на вход компрессора на частоте 11.4 GHz. Компрессор состоит из устройства связи 4 (входной и выходной волновод, в котором волна  $TE_{02}$  не распространяется), входного рупора 5, отрезка цилиндрического волновода 6 длиной 100 см и диаметром 8 см и плазменного переключателя 10–15. Входной рупор, цилиндрический волновод и переключатель образуют накопительный резонатор для моды  $TE_{02}$ . Цилиндрический волновод включает секцию, длину которой можно изменять с помощью специальной механической настройки и таким образом настраивать резонатор на рабочую частоту. В режиме на-



**Рис. 1.** Схема активного СВЧ-компрессора с плазменным переключателем на основе трансформации мод  $TE_{02} \rightarrow TE_{01}$ : 1 — циркулятор, 2 — конус, 3 — преобразователь моды  $TE_{11} \rightarrow TE_{01}$ , 4 — входной и выходной волновод, 5 — входной рупор, 6 — цилиндрический резонатор, 7 — направленный ответвитель, 8 — детектор, 9 — согласованная нагрузка, 10 — коническое сужение, 11 — отрезок круглого волновода, 12 — диафрагма, 13 — скачкообразное расширение волновода, 14 — газоразрядная трубка, 15 — настроечный поршень.

копления энергии небольшая часть волны  $TE_{01} \sim 2-3\%$ , поступающая от СВЧ-генератора через входной волновод, с помощью плазменного переключателя трансформируется в волну  $TE_{02}$ , которая полностью отражается от входного рупора 5 благодаря закритическому сужению 4. В результате СВЧ-энергия накапливается в резонаторе на моде  $TE_{02}$ . Генерируемый при срабатывании плазменного переключателя сжатый импульс выводится к нагрузке 9 через циркулятор 1 и регистрируется с помощью направленного ответвителя 7 и детектора 8.

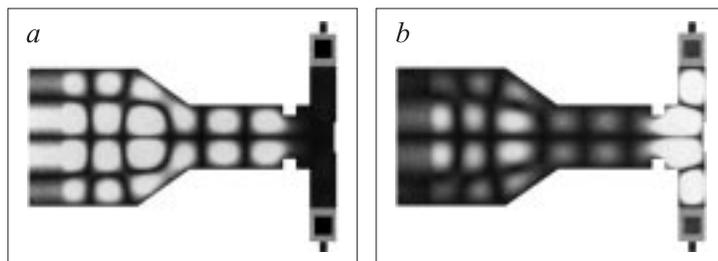
Плазменный переключатель состоял из конического сужения 10, соединенного отрезком круглого волновода 11 диаметром 3.8 см с диафрагмой 12 и скачкообразным расширением круглого волновода 13. Внутри расширения располагалась кольцевая кварцевая газоразрядная трубка специальной конструкции 14 с металлическими электродами. Электроды выводились наружу из рефлектора через отверстия в его стенках. Трубка имела прямоугольное сечение и была изготовлена из цельного кварцевого диска, что обеспечивало высокую точность ее изготовления. Объем рефлектора мог изменяться с помощью подвижного настроечного поршня 15.



**Рис. 2.** Плазменный переключатель в режиме накопления (а) и вывода энергии (b) из компрессора.

Рассмотрим принцип работы плазменного переключателя (рис. 2). В режиме накопления (рис. 2, а) энергии волна  $TE_{02}$  отражается от переключателя практически полностью, и лишь малая часть ее трансформируется в волну  $TE_{01}$ . Последнее достигается взаимной компенсацией двух потоков излучения на этой моде. Один формируется при отражении от конического сужения 10, а другой — от диафрагмы 12. Действительно, при отражении волны  $TE_{02}$  от конического сужения происходит ее частичная трансформация в волну  $TE_{01}$ , распространяющуюся в сторону входного рупора, и волну  $TE_{01}$ , распространяющуюся к диафрагме. Коэффициент трансформации определяется при этом параметрами сужения. Для заданного размера диафрагмы длина волновода 11 подбирается так, чтобы  $TE_{01}$  волны, отраженные от диафрагмы и конического сужения, складывались на выходе компрессора в противофазе. В результате суммарный коэффициент трансформации волны  $TE_{02}$  в волну  $TE_{01}$  на переключателе составляет величину 2–3%. Такой коэффициент связи является оптимальным для накопления энергии в резонаторе при его возбуждении СВЧ-импульсами длительностью 1–2  $\mu$ s.

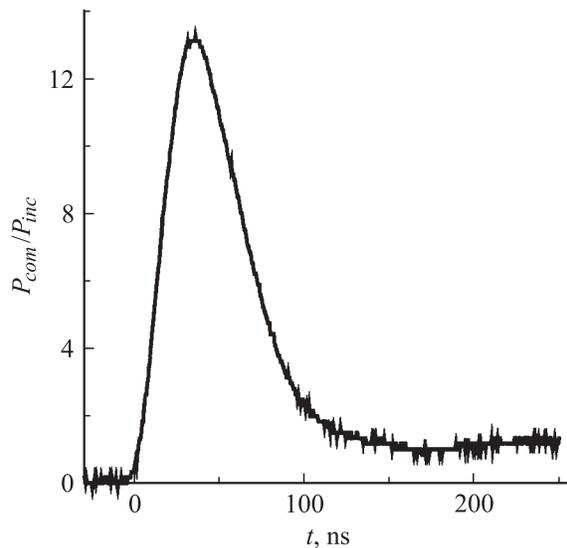
Скачкообразное расширение круглого волновода с газоразрядной трубкой и диафрагмой образует низкодобротный резонатор. Размеры скачкообразного расширения кварцевой трубки и диафрагмы рассчитываются так, что в режиме накопления энергии рабочая частота компрессора находится вне резонанса переключателя. При подаче на



**Рис. 3.** Мгновенное распределение электрического поля в плазменном переключателе на основе трансформации мод  $TE_{02} \rightarrow TE_{01}$ : *a* — в режиме накопления энергии; *b* — в режиме вывода СВЧ-импульса.

электроды высоковольтных импульсов в кварцевой трубке образуется плазма и резонансная частота скачкообразного расширения изменяется. Сдвиг частоты зависит от концентрации электронов в плазме и положения настроечного поршня. Эти параметры подбираются так, что создание плазмы вводит переключатель в резонанс с рабочей частотой компрессора. При резонансе фаза отраженной от диафрагмы волны  $TE_{01}$  меняется на  $180^\circ$  и складывается с отраженной от конического сужения  $TE_{01}$  волной в фазе. При этом суммарный коэффициент трансформации мод  $TE_{02} \rightarrow TE_{01}$  возрастает до 35–40%. В результате накопленная в резонаторе на моде  $TE_{02}$  СВЧ-энергия излучается через входной рупор на моде  $TE_{01}$  (рис. 2, *b*). Характерное время переключения определяется нагруженной добротностью скачкообразного расширения и составляет 10–15 ns. Отметим, что при резонансе напряженность электрического поля в скачкообразном расширении существенно возрастает. Поэтому размеры газоразрядной трубки рассчитывались таким образом, чтобы ее внутренняя поверхность оказалась в нуле поля возбуждаемой в переключателе моды.

Моделирование работы плазменного переключателя проводилось методом FDTD [5]. На рис. 3 представлено мгновенное распределение среднеквадратичного электрического поля в переключателе, в режимах накопления и вывода энергии из компрессора. Из рис. 3, *a* видно, что при накоплении энергии СВЧ-мощность практически полностью отражается диафрагмой. В режиме вывода СВЧ-импульса появление плазмы в трубке приводит к тому, что полость, образованная участком



**Рис. 4.** Осциллограмма сжатого импульса ( $P_{com}$  — мощность в сжатом импульсе,  $P_{inc}$  — входная мощность, давление азота в газоразрядной трубке  $p = 0.25$  Torr).

волновода со скачкообразным расширением, становится резонатором на частоте падающей волны. При этом поле в переключателе возрастает, но поверхность кварцевой трубки попадает в минимум электрического поля (рис. 3, *b*). Расчеты показали, что при падающей на переключатель мощности 325 MW среднеквадратичная напряженность электрического поля вблизи поверхности трубки не превышает 6.5 kV/cm в режиме накопления и 35 kV/cm в режиме вывода энергии. Такие напряженности электрических полей еще не приводят к возникновению разрядных поверхностных эффектов. Поэтому при указанной падающей мощности возможно достижение мощности сжатого импульса, превышающей 100 MW.

Работа компрессора (рис. 1) с новым переключателем исследовалась экспериментально на низком уровне мощности. Возбуждение компрессора осуществлялось с помощью маломощного СВЧ-генератора, работающего в непрерывном режиме на частоте 11.424 GHz. Экс-

периментально измеренная нагруженная добротность накопительного резонатора составляла величину  $Q_L = 2.6 \cdot 10^4$ . Давление азота в газоразрядной трубке изменялось в диапазоне  $p = 0.01 - 1$  Торр. Поджиг разряда в трубке осуществлялся через два диаметрально противоположных электрода, на которые подавался высоковольтный импульс с амплитудой 40 кВ, длительностью 100 ns и фронтом длительностью 10 ns. Характерная осциллограмма сжатого импульса при давлении азота  $p = 0.25$  Торр приведена на рис. 4. На приведенном графике мощность в сжатом импульсе  $P_{com}$  отнормирована на величину мощности  $P_{inc}$ , подаваемой на вход компрессора. Достигнутый в экспериментах коэффициент усиления по мощности составлял величину  $K = 12 - 14$  при длительности сжатого импульса 50–70 ns.

Таким образом, в результате проведенных исследований разработан и испытан на низком уровне мощности новый тип плазменного переключателя, обеспечивающий модуляцию добротности накопительного резонатора СВЧ-компрессора за счет трансформации осесимметричных мод  $TE_{02} \rightarrow TE_{01}$  круглого волновода. Данный переключатель является перспективным для применения в активных СВЧ-компрессорах большой мощности.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант 05-08-50246.

## Список литературы

- [1] Диденко А.Н., Юшков Ю.Г. Мощные СВЧ-импульсы наносекундной длительности. М.: Энергоатомиздат, 1984.
- [2] Вихарев А.Л., Горбачев А.М., Иванов О.А. и др. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 20. С. 6.
- [3] Вихарев А.Л., Горбачев А.М., Иванов О.А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т. XLVI. № 8–9. С. 897.
- [4] Vikharev A.L., Ivanov O.A., Gorbachev A.M. et al. // NATO Science. Ser. II. V. 203. Quasi-Optical Control of Intense Microwave Transmission / Ed. J.L. Hirshfield and M.I. Petelin. 2005. P. 199.
- [5] Taflov A. Advances in computational electrodynamics. The Finite-Difference Time-Domain Method. Boston, London, Artech House, 1998. 724 p.