

13

Синхронный вывод СВЧ-энергии из резонаторов через пакет интерференционных переключателей

© С.Н. Артёменко, В.А. Августинович, М.С. Артеев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Физико-технический институт, Томск
E-mail: snartemenko@mail.ru

Поступило в Редакцию 13 июня 2013 г.

Представлены результаты экспериментального исследования синхронного вывода СВЧ-энергии из объемных резонаторов 3-см диапазона длин волн через компактный пакет из пяти интерференционных переключателей на основе *H*-тройников. Показана возможность полной синхронизации переключателей и определены условия ее реализации. При синхронном выводе энергии из пяти одномодовых резонаторов получены СВЧ-импульсы мощностью ~ 0.8 MW с коэффициентом усиления ~ 12 dB и длительностью ~ 3.2 ns, а также импульсы СВЧ мощностью ~ 2.2 MW с коэффициентом усиления ~ 16.5 dB и длительностью ~ 3.5 ns при синхронном выводе из одного сверхразмерного резонатора. Оценены предельные возможности СВЧ-компрессоров 3- и 10-см диапазонов длин волн с выводом энергии через пакет.

В способе формирования мощных СВЧ-импульсов, основанном на накоплении энергии импульса в резонансном объеме и быстром ее выводе в нагрузку [1], мощность формируемых импульсов тем выше, чем больше накоплено энергии и меньше время вывода. Значительный запас энергии можно получать, используя накопительный резонатор с большим объемом. Однако предельно быстрый вывод энергии из резонаторов большого объема до настоящего времени остается практически нерешенной проблемой.

Известное устройство вывода в виде переключателя на основе *H*-тройника эффективно только при выводе энергии из одномодовых резонаторов [1]. Мощность компрессоров с таким переключателем ограничена площадью сечения и электрической прочностью волновода, из которого изготовлен тройник. Другие известные устройства, исполь-

зубые в различных системах [2–5], также решают проблему не в полной мере.

Наряду с этим известна идея вывода энергии через пакет синхронизованных переключателей [6]. Теоретически такой пакет может обеспечить вывод из больших объемов за время, близкое к времени T двойного пробега волны вдоль объема. В [6] для этого использовано четыре переключателя, равномерно распределенные на одной из стенок сверхразмерного резонатора. Показана принципиальная возможность синхронного вывода с уменьшением времени вывода при увеличении числа переключателей, но с разбросом во времени, превышающим время двойного пробега волны вдоль резонатора.

В данной работе исследуется вывод через компактный пакет из параллельных, плотно прилегающих друг к другу переключателей. При такой компоновке переключателей проще обеспечить условия, способствующие синхронной работе и быстрому выводу. Приводятся результаты исследования вывода энергии из пачки одномодовых, а также сверхразмерного резонатора через пакет переключателей из пяти H -тройников.

При решении проблемы синхронного вывода одним из основных является вопрос об идентичности условий коммутации. Прежде всего это вопрос о равенстве напряженности поля в переключателях. Его решение зависит от выбора геометрии резонатора, типа рабочей волны, связи переключателей с резонатором и качества рабочей поверхности волноводов. Для исследуемого пакета наиболее приемлемой представляется H_{01} -волна призматического резонатора. Поле в этой волне вдоль широкой стенки волновода постоянно. Это способствует получению одинаковой напряженности поля в переключателях. Кроме того, важно, что волны H_{01} и H_{10} легко преобразуются друг в друга. Это позволяет достаточно просто осуществлять суммирование выводимой энергии.

Второй важный вопрос касается допустимого количества переключателей в пакете, определяющего предельную мощность формируемых импульсов. Его можно оценить исходя из следующего. При последовательном развитии разрядов в пакете время переключения пропорционально количеству переключателей. Для эффективного вывода переключение должно осуществляться за время, не большее времени T . Если t — характерное время развития разряда в переключателе, то предельное количество определяется неравенством $n < T/t$. Например, в 3-см диапазоне длин волн при $T = 5$ ns и $t \sim 1$ –2 ns допустимое

количество составляет $n < 2-5$, т.е. даже при таком мягком условии число переключателей невелико. Вместо с тем из неравенства следует, что применение пакета может быть достаточно эффективным в коротковолновой части диапазона СВЧ, где $t < 1$ ns и при заданном T допустимое количество переключателей больше.

Для увеличения числа переключателей требуется более жесткая синхронизация разрядов. Представляется, что такая синхронизация может быть реализована при использовании общей коммутирующей области как единой колебательной системы в виде общего коммутирующего плеча. В таком плече процесс переключения осуществляется одним разрядом и отпадает необходимость в синхронизации разрядов; требуется только быстрое, в масштабе времени T , изменение резонансной частоты плеча за пределы полосы резонанса коммутирующего плеча. Это может быть осуществлено каналом разряда с длиной много меньшей общей длины каналов при коммутации в несвязанных плечах. Время пробега волны вдоль общего плеча много меньше времени развития разрядов в плечах. Это обеспечит практически синхронную инверсию фазы отраженных от плеча волн и синхронный перевод пакета в режим „открыто“, а допустимое количество переключателей оценочно будет определяться неравенством $n < L/b$, где L — длина резонатора, а b — размер узкой стенки волновода тройника.

Первые экспериментальные исследования пакета выполнены при выводе энергии из пачки одномодовых резонаторов. Результаты этих исследований позволили выявить условия, при которых пакет работает наиболее эффективно. Пакет, внешний вид которого представлен на рис. 1, был выполнен из пяти идентичных H -тройников 3-см диапазона длин волн из волновода сечением 23×10 mm. Выбор количества переключателей обусловлен размерами плавного перехода с выходным сечением 58×25 mm, использованного в экспериментах по выводу энергии из сверхразмерного резонатора. Коммутирующими были короткозамкнутые боковые плечи. В плечах в месте максимума электрического поля параллельно силовым линиям располагалась газоразрядная кварцевая трубка, через которую в разрядные промежутки подавался аргон или азот под атмосферным давлением. Подсветка промежутков осуществлялась лучом лазера или искрой электрического разряда. Боковые плечи в пакете выполнялись в различных вариантах — от плеч изолированных, до плеч сильно связанных, вплоть до замены секцией волновода сечением 58×25 mm.

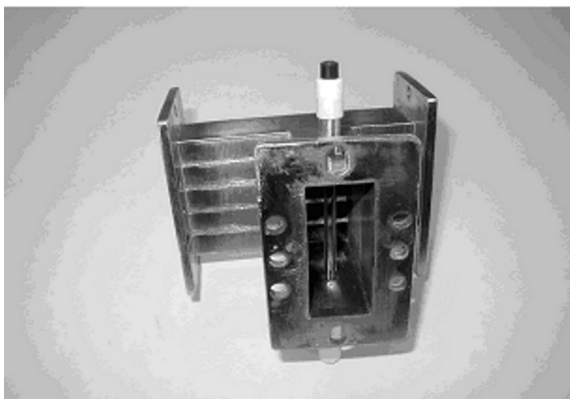


Рис. 1. Пакет переключателей с общим боковым плечом.

Пачка из пяти одномодовых резонаторов 3-см диапазона длин волн также была изготовлена из волноводов сечением $23 \times 10 \text{ mm}^2$. Волноводы располагались параллельно и подсоединялись непосредственно к пакету. Резонаторы работали на воздухе при атмосферном давлении. Их возбуждение осуществлялось через окна связи на торцевой стенке. Энергия подводилась по рупорному переходу на H_{01} -волне. К выходу пакета подсоединялся переход, идентичный входному. Он осуществлял суммирование и обратное преобразование волны H_{01} в волну H_{10} выходного тракта.

С учетом результатов исследования вывода из пачки одномодовых резонаторов в системе со сверхразмерным накопительным объемом использовался пакет тройников с боковым плечом из сверхразмерного волновода сечением $58 \times 25 \text{ mm}$. Энергия накапливалась в резонаторе из прямоугольного волновода сечением $72 \times 34 \text{ mm}$. Отрезок этого волновода сопрягался с плавным переходом на волновод сечением $58 \times 25 \text{ mm}$. К выходу перехода подсоединялся пакет, а к входу и выходу системы — рупорные переходы.

В качестве источника входных импульсов использовался импульсный магнетрон мощностью 50 kW при длительности импульсов $\sim 1 \mu\text{s}$. Генератор высоковольтных импульсов разрядника подсветки обеспечивал формирование импульсов напряжения до 6 kV . Азотный лазер с дли-

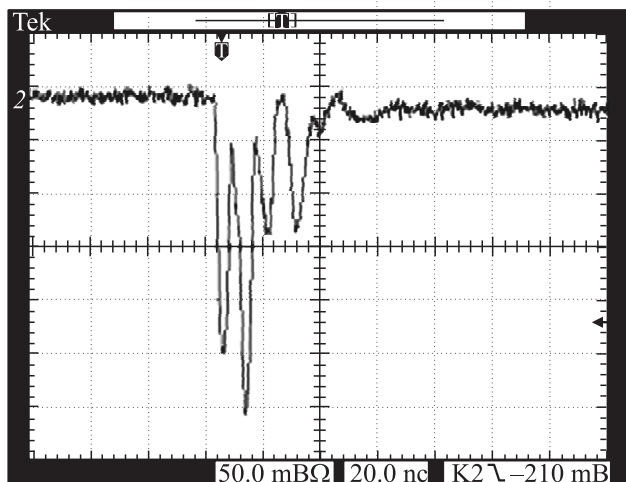


Рис. 2. Осциллограммы выходных импульсов при выводе энергии через пакет из пачки одномодовых резонаторов при несвязанных боковых плечах.

ной волны 337.1 nm генерировал импульсы излучения длительностью 2.5 ns с энергией в импульсе около 1 mJ .

Пачка одномодовых резонаторов работала на частоте $f = 9080 \text{ MHz}$ на виде колебаний $H_{01}(16)$ и имела собственную добротность $Q_0 \approx 7.8 \cdot 10^3$. Расчетное время двойного пробега рабочей волны вдоль резонатора составляло 3.8 ns . Поэтому расчетный коэффициент усиления системы, равный отношению $Q_0/2\pi fT$, составлял 15.6 dB . С учетом потерь при выводе ожидаемый коэффициент усиления равнялся $\sim 13 \text{ dB}$.

Исследования на высоком уровне мощности подтвердили, что необходимым условием полной синхронизации является сильная связь между коммутирующими плечами. Связь формировалась разными способами — отверстием в стенках соседних переключателей, щелью между торцами боковых плеч и короткозамыкателем и заменой пакета плеч общим плечом в виде секции сверхразмерного волновода сечением $58 \times 25 \text{ mm}$. При этом степень синхронизма росла по мере увеличения связи между плечами. На рис. 2 представлена огибающая импульсов с выводом через пакет с несвязанными плечами. Для пакета с несвязанными плечами характерна нестабильная картина вывода энергии с разбросом импульсов во времени. Причем независимо от способа

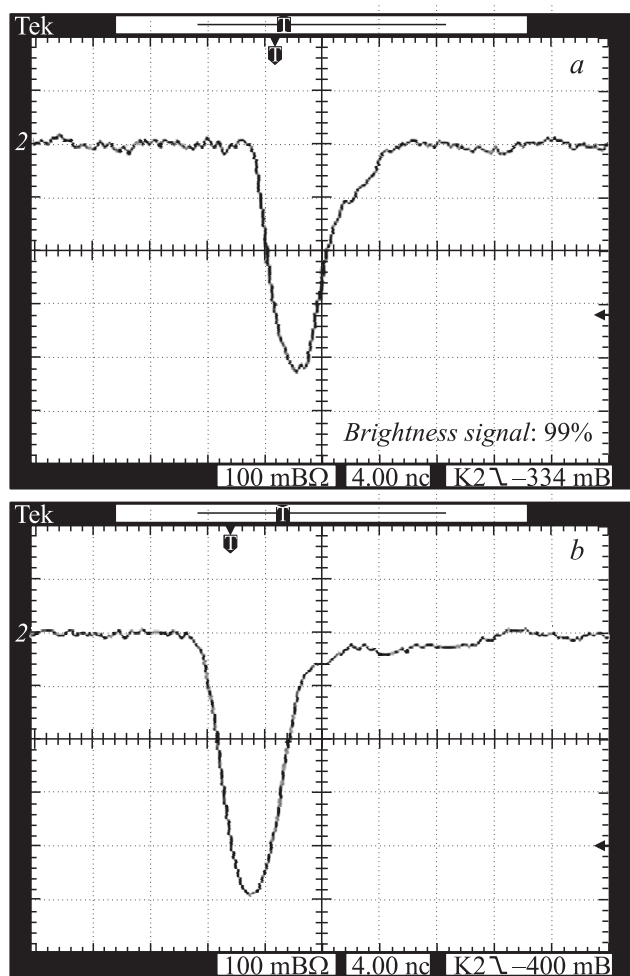


Рис. 3. Осциллограммы выходных импульсов при выводе энергии через пакет из пачки одномодовых (*a*) и сверхразмерного (*b*) резонаторов с коммутацией в общем боковом плече.

инициации процесса переключения — искрой разряда или лучом лазера. Такой же результат имеет место и при выводе из сверхразмерного резонатора. Введение сильной связи между плечами обеспечивает

одновременный вывод из пачки (рис. 3, *a*) за время двойного пробега. При этом максимальное усиление получено при коммутации в аргоне. Коэффициент усиления составил 12 dB при длительности импульсов 3.2 ns и пиковой мощности 0.8 MW.

При исследовании вывода из сверхразмерного резонатора основное внимание было уделено получению „чистого“ рабочего вида колебаний, что необходимо для обеспечения требуемого значения переходного ослабления пакета в режиме накопления. Поэтому были приняты меры для сохранения правильной геометрии системы и доминирующего возбуждения рабочей волны. Длина системы была выбрана такой, что на частоте 8850 MW в полосе частот ± 25 MHz находился только рабочий $H_{01}(28)$ вид колебаний. Измеренная собственная добротность системы была близка к $2 \cdot 10^4$. Расчетное время пробега волны вдоль резонатора составило ~ 4 ns. Поэтому расчетный коэффициент усиления равнялся ~ 19.5 dB. С учетом потерь при выводе ожидаемое усиление составило ~ 17 dB, что практически было получено в экспериментах при коммутации в аргоне (~ 16.5 dB). Пиковая мощность импульсов достигала 2.2 MW при длительности 3.5 ns (рис. 3, *b*).

Таким образом, продемонстрирована возможность быстрого вывода СВЧ-энергии из пачки резонаторов через пакет синхронизованных переключателей на основе H -тройников. Установлено, что для полной синхронизации коммутирующие плечи тройников должны быть сильно связаны. Предельное количество переключателей в пакете пропорционально отношению длины резонатора к размеру узкой стенки волновода H -тройника. Поэтому при заданной длине резонатора наиболее эффективным применение пакета может быть в коротковолновой части диапазона СВЧ. Так, согласно оценкам, в 3-см диапазоне длин волн вывод энергии через пакет с числом переключателей $\sim 5-7$ может обеспечить формирование импульсов мощностью до 0.1 GW. В 10-см диапазоне в системе, аналогичной исследованной, возможно формирование импульсов мощностью $\sim 1-2$ GW.

Пакет с одномодовыми резонаторами и несвязанными коммутирующими плечами может быть использован для формирования наносекундных СВЧ-импульсов с высокой частотой следования. Пакет может быть использован и для увеличения энергии импульсов резонансных СВЧ-компрессоров с крупными накопительными объемами питаемыми от разных источников и объединенными через пакет.

В заключение авторы выражают признательность Ю.Г. Юшкову и В.Л. Каминскому за постоянную поддержку и полезные дискуссии, а также А.Ю. Арбузову за помощь в проведении экспериментов.

Работа выполнена в рамках государственного задания „Наука“ Минобрнауки РФ № 2.3408.2011.

Список литературы

- [1] Диденко А.Н., Юшков Ю.Г. Мощные СВЧ импульсы наносекундной длительности. М.: Энергоатомиздат, 1984. 112 с.
- [2] Артёменко С.Н., Каминский В.Л., Юшков Ю.Г. // ЖТФ. 1993. Т. 63. № 7. С. 107–112; *Artemenko S.N., Kaminskij V.L., Yuskov Y.G.* // Tech. Phys. 1993. V. 38. P. 111.
- [3] Вихарев А.Л., Горбачев А.М., Исаев О.А., Кузиков С.В., Колданов В.А., Хиришилд Дж.К., Голд С.Х. // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51. N 8. С. 1–15.
- [4] Августинович В.А., Артёменко С.Н., Игумнов В.С., Новиков С.А., Юшков Ю.Г. // Изв. вузов. Физика. 2011. Т. 54. № 11/2. С. 224–229.
- [5] Августинович В.А., Артёменко С.Н., Жуков А.А. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. В. 10. С. 89–95; *Avgustinovich V.A., Artemenko S.N., Zhukov A.A.* // Tech. Phys. Lett. 2013. V. 39. P. 492.
- [6] Артёменко С.Н., Августинович В.А., Чумерин П.Ю., Юшков Ю.Г. // ЖТФ. 2000. Т. 70. В. 11. С. 105–107; *Artemenko S.N., Avgustinovich V.A., Chumerin P.Yu., Yuskov Yu.G.* // Tech. Phys. 2000. V. 45. P. 1475.