

07;09

## Синхронизация резонансных СВЧ-компрессоров лазером

© В.А. Августинович, М.С. Артеев, С.Н. Артеменко, С.А. Новиков,  
Ю.Г. Юшков

НИИ ядерной физики Томского политехнического университета  
E-mail: nsa@tpu.ru

Поступило в Редакцию 17 мая 2010 г.

В окончательной редакции 16 июня 2010 г.

Представлены результаты экспериментального исследования синхронизации работы двух СВЧ-компрессоров лазерным лучом. Показана возможность практически полной синхронизации и определены условия ее реализации. На исследованных компрессорах 10-см диапазона длин волн получена суммарная мощность выходных сигналов около 220 MW практически для 100 % суммируемых сигналов. Обоснована возможность увеличения суммарной мощности до 450 MW.

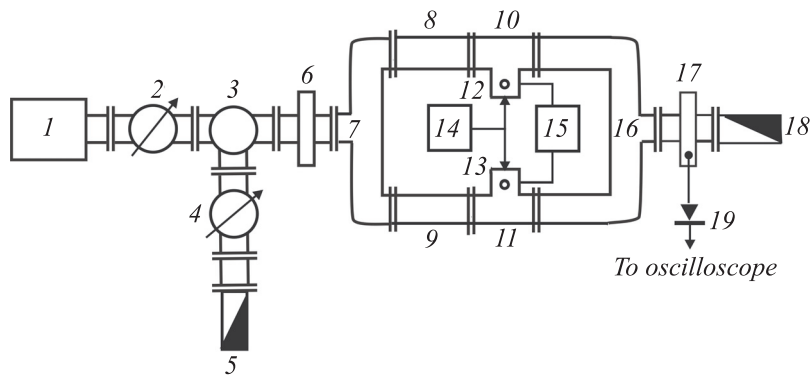
В [1] показана принципиальная возможность синхронизации работы резонансных СВЧ-компрессоров при использовании волноводных СВЧ-коммутаторов с подсветкой разрядного промежутка электрическим разрядом в газовой среде. При таком способе запуска коммутаторов около 70 % выходных СВЧ-сигналов следовали с разбросом во времени не более 1.5 ns. Это позволило обеспечить суммирование значительного количества сигналов с длительностью около 5 ns. Вместе с тем из-за статистической природы процесса развития разряда в разрядниках подсветки заметная часть сигналов выпадала за пределы интервала времени, в течение которого эффективное суммирование было возможно. Другими словами, полученный результат в значительной мере определялся особенностями работы электрических газовых разрядников. Эти особенности проявляются и в степени стабильности параметров выходных сигналов СВЧ-компрессоров. Например, такой параметр, как амплитуда выходных сигналов СВЧ-компрессоров с подсветкой разрядом, как правило, имеет дисперсию 10–15 % и более. В то же время в [2] показано, что более стабильная работа компрессора может быть получена при использовании коммутатора с подсветкой

разрядного промежутка лазерным лучом. Это позволяет надеяться и на возможность более качественной синхронизации при использовании волноводных коммутаторов с лазерной подсветкой. В данной работе приводятся первые результаты экспериментального исследования синхронизации резонансных СВЧ-компрессоров лазерным лучом.

Исследования выполнены на двух компрессорах 10-см диапазона длин волн, в которых для накопления энергии использовались цилиндрические резонаторы диаметром 90 мм и длиной 365 мм, работавшие на  $H_{11(5)}$ -модах колебаний. Накопление энергии в резонаторах осуществлялось от импульсного магнетрона через стандартный волноводный  $H$ -тройник со стороны его бокового плеча и далее через идентичные окна связи, расположенные на входных торцовых стенках резонаторов. Это обеспечивало приблизительное равенство амплитуд поля в резонаторах. Длительность импульсов магнетрона равнялась  $3.2 \mu\text{s}$ , а мощность достигала 2 MW. Несущая частота импульсов могла регулироваться в пределах 2795–2805 МГц. Вывод энергии осуществлялся через интерференционные переключатели на основе  $H$ -тройника из круглого волновода, имеющего тот же диаметр, что и резонатор. Эти же переключатели в режиме накопления служили выходными торцовыми стенками резонаторов. СВЧ-коммутатор в каждом из переключателей располагался в короткозамкнутом боковом плече тройника по диаметру волновода и представлял собой продуваемую газонаполненную кварцевую трубку с внутренним диаметром 8 мм и наружным 12 мм. Подобная конструкция коммутатора детально описана в [3]. Со стороны одного из торцов трубки монтировалось оптически прозрачное окно, через которое осуществлялась подсветка разрядного промежутка волновода. Приблизительное равенство рабочих частот компрессоров обеспечивалось идентичностью исполнения резонаторов. Прецизионная подстройка их частот и прецизионная регулировка амплитуды поля в них осуществлялась с помощью деформируемых мембран, коротко замыкающих боковые плечи  $H$ -тройников интерференционных переключателей. Суммирование выходных сигналов СВЧ-компрессоров производилось в волноводном  $H$ -тройнике из стандартного прямоугольного волновода, прямые плечи которого подсоединялись к выходам компрессоров, а боковое плечо через направленный ответвитель нагружалось согласованной нагрузкой. Сопряжение выходных круглых волноводов компрессоров и прямоугольных волноводов суммирующего тройника осуществлялось плавными волноводными переходами.

Для подсветки разрядного промежутка использовался азотный лазер, генерировавший на длине волны 337.1 nm импульсы с энергией около 1 mJ, длительностью 5 ns и частотой следования до 100 Hz. Исходный лазерный луч делился на два идентичных луча, каждый из которых фокусировался в области максимального электрического поля (у оси волновода) в разрядных трубках коммутаторов каждого из компрессоров. В области фокальной перетяжки каустики линзы размерами около  $0.5 \times 0.5 \times 20$  mm, плотность потока мощности лазерного излучения в каждом из коммутаторов составляла около  $2 \text{ MW/cm}^2$ . Такой поток был достаточным для инициации пробоя газа в разрядных трубках в условиях эксперимента. Собственные рабочие частоты компрессоров на воздухе при атмосферном давлении составляли 2803.4 и 2805.5 МГц. С помощью коротко замыкающих мембран переключателей компрессоры были приведены к общей частоте 2805.5 МГц. Резонаторы заполнялись азотом под давлением до 4–4.5 bar с добавлением 15–20 % элегаза. Трубки коммутаторов последовательно включались в тракт системы принудительного продува и заполнялись азотом под давлением 2–3 bar. При мощности входных СВЧ-импульсов 1 MW расчетная напряженность электрического поля в резонаторах составляла около 130 kV/cm. Это существенно выше пробивной напряженности газовой среды, использованной в коммутаторах. Однако так как объем среды с пониженной электрической прочностью был мал ( $\sim 4.5 \text{ cm}^3$ ) и непрерывно продувался, то вероятность самопробоя была невелика, что обеспечивало управляемость переключения.

Схема экспериментальной установки, на которой выполнялись исследования, приведена на рис. 1. Некоторые особенности установки, связанные с наличием фазовращателя в цепи отраженного сигнала и направленного ответвителя на входе компрессоров, обусловлены соответственно отличием от единицы коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) согласованной нагрузки и использованным методом измерения мощности выходных сигналов. Отличие КСВН от единицы приводит к возврату к генератору заметной доли излученной мощности, влияющей на стабильность работы генератора. Введение дополнительного фазовращателя обеспечивает регулирование уровня этой мощности и практически устраняет это влияние. Направленный ответвитель на входе компрессоров использовался для определения мощности выходных сигналов методом сравнения, наиболее простым и удобным для измерения мощности сигналов наносекундной длительности.



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки: 1 — магнетронный генератор; 2, 4 — фазовращатели; 3 — циркулятор; 5, 18 — согласованные нагрузки; 6, 17 — направленные ответвители; 7, 16 — входной (делящий) и выходной (суммирующий)  $H$ -тройники; 8, 9 — накопительные резонаторы компрессоров; 10, 11 — интерференционные переключатели на основе  $H$ -тройников; 12, 13 — коммутаторы; 14 — лазер; 15 — система продува.

В результате проведенных экспериментов было зафиксировано, что при точной настройке обоих резонаторов на частоту магнетрона наблюдалась практически абсолютная синхронизация выходных импульсов каждого из компрессоров без какого-либо заметного временного разброса (рис. 2). Это приводило к полному суммированию импульсов на общей нагрузке и, следовательно, удвоению мощности выходного импульса. Достаточно высокая нагруженная добротность накопительных резонаторов ( $\sim 8000$ ) обуславливала требование их точной настройки на рабочую частоту магнетрона — даже незначительная расстройка какого-либо из резонаторов (20–30 КHz) приводила к существенному уменьшению напряженности СВЧ-поля в этом резонаторе, в результате чего нарушалась синхронность работы коммутаторов. Как видно из осциллограмм (рис. 3), запаздывание развития коммутирующего разряда в расстроенном резонаторе приводило к разнесению во времени выходных импульсов на величину  $\sim 10$ – $15$  ns, причем наблюдалась значительная нестабильность амплитудно-временных характеристик выходных импульсов с этого резонатора. Этот результат вполне объясним, если принять во внимание, что лазерное излучение ответственно

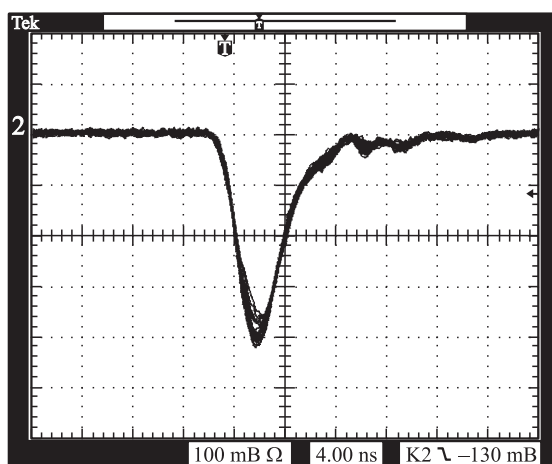


Рис. 2. Осциллограммы выходных сигналов при точной настройке резонаторов.

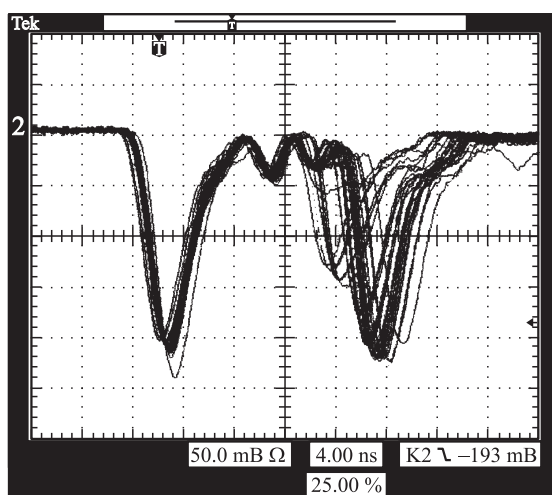


Рис. 3. Осциллограммы выходных сигналов при расстройке одного из резонаторов.

за образование первичных электронов, а электрическое СВЧ-поле в резонаторе — за дальнейшее развитие лавины коммутирующего разряда. Как показывают оценки, учитывающие основные реакции фотовозбуждения и ионизации, а также столкновительные процессы в газе, за время действия лазерного импульса в наших условиях в области фокальной перетяжки каждого коммутатора образуется несколько десятков электронов. Значительное уменьшение напряженности СВЧ-поля в одном из коммутаторов вследствие расстройки резонатора приводило к существенному уменьшению скорости нарастания лавины разряда и соответственно наблюдавшейся задержке и нестабильности выходных импульсов одного из компрессоров.

Уровень коммутирующей мощности в исследованных компрессорах составлял около 250 MW. Суммарная мощность выходных сигналов длительностью около 3 ns достигала 220 MW, что близко к полученной в предвзятых экспериментах выходной мощности каждого из компрессоров ( $\sim 270$  MW) при их отдельном возбуждении импульсами мощностью 2 MW. Это означает, что в исследованной системе мощность входных импульсов СВЧ может быть повышена вдвое и, следовательно, при использовании синхронизации работы компрессоров лазерным лучом суммарная мощность их выходных сигналов может быть доведена до уровня около 450 MW. Такой вывод следует из способности каждого из исследованных компрессоров работать при входной мощности 2 MW и известного свойства суммирующего  $H$ -тройника обеспечивать удвоение мощности сигналов на его выходе при удвоении мощности сигналов на входах [4].

Авторы благодарят В.Ф. Лосева (ИСЭ СО РАН) за предоставление использованного в работе лазера и В.Ф. Дьяченко за помощь при выполнении экспериментов.

## Список литературы

- [1] Новиков С.А., Разин С.В., Чумерин П.Ю., Юшков Ю.Г. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 20. С. 46–48.
- [2] Артеев М.С., Юшков Ю.Г. // ПТЭ. 1997. № 1. С. 99–100.
- [3] Августинovich В.А., Артёменко С.Н., Дьяченко В.Ф. и др. // ПТЭ. 2009. № 4. С. 106–109.
- [4] Альтман Дж. Устройство СВЧ. М.: Мир, 1968. 488 с.