



УДК 621.37

С. Н. Артёменко, Г. М. Самойленко
Физико-технический институт

Национального исследовательского Томского политехнического университета

Охлаждаемые резонансные системы компрессии СВЧ-импульсов

Приведены результаты расчетов основных параметров криогенного варианта резонансного СВЧ-компрессора. Показано, что охлаждение до температур жидкого азота позволяет существенно улучшить энергетические параметры традиционных медных систем резонансной компрессии СВЧ-импульсов. Приведены результаты экспериментального исследования охлаждаемого СВЧ-компрессора 10-см диапазона.

СВЧ-Энергия, СВЧ-импульс, компрессия

В [1] был предложен, а впоследствии развит и реализован в ряде устройств практического применения, способ формирования мощных СВЧ-импульсов, основанный на накоплении энергии относительно длинного СВЧ-импульса в резонансном объеме с последующим ее быстрым выводом в нагрузку. Энергетические параметры таких устройств определяются главным образом добротностью и электрической прочностью накопительного резонатора.

К настоящему времени в резонансных СВЧ-компрессорах диапазона 1...10 ГГц достигнуты значения мощности выходных импульсов до 1 ГВт при длительности импульсов в единицы наносекунд. При изготовлении накопительных резонаторов из традиционного для техники СВЧ материала – меди и применении вакуумной или газовой изоляции рабочего объема резонаторов этот уровень мощности импульсов близок к теоретическому пределу.

Дальнейшее повышение основных энергетических параметров систем резонансной компрессии (КПД и коэффициента усиления) ограничено, поскольку практически исчерпаны возможности повышения добротности резонаторов за счет выбора оптимальной геометрии, рабочего вида колебаний и технологии изготовления. Это обстоятельство сужает область возможного применения резонансных СВЧ-компрессоров. Например применительно к системам высокочастотного питания линейных ускорителей, для уверенного обеспечения требуемых параметров питающих СВЧ-импульсов

желательно кратное увеличение собственной добротности накопительных резонаторов и существенное повышение плотности запасаемой в них энергии.

Радикальный путь повышения параметров систем резонансной компрессии заключается в применении для целей накопления энергии сверхпроводящих резонаторов (СПР) СВЧ, работающих при температуре жидкого гелия, что позволяет повысить усиление мощности устройств резонансной компрессии на 5–6 порядков [2]. Однако технология СПР с высоким уровнем накапливаемой энергии, а также аппаратное обеспечение работ при гелиевых температурах, являются весьма сложными и дорогостоящими.

В связи с этим представляется, что для ряда применений полезным и практически более приемлемым может служить глубокое охлаждение накопительных резонаторов, изготовленных из обычных материалов, при котором за счет увеличения проводимости материала резонатора также следует ожидать заметного увеличения его добротности.

В настоящей статье рассмотрены возможности улучшения энергетических параметров резонансных СВЧ-компрессоров понижением их рабочей температуры до температуры жидкого азота (77 К).

Оценку параметров охлаждаемых резонансных СВЧ-компрессоров проведем на примере распространенной схемы резонансного компрессора с накопительным резонатором на основе отрезка волновода и с интерференционным пере-

¹ Работа выполнена в рамках Государственного задания "Наука" Минобрнауки РФ (договор 0.1323.2014).

ключателем в виде волноводного *H*-тройника с плазменным коммутатором, размещенным в боковом плече тройника [1].

Основные параметры резонансного компрессора и его элементов описываются следующими соотношениями.

Накопленная в резонансном объеме энергия

$$W = \frac{\varepsilon E^2 (V_0 + V_1/2)}{8} = P_{ctw} \left(t_0 + \frac{t_1}{2} \right),$$

где ε – диэлектрическая проницаемость заполняющей резонатор среды; E – напряженность электрического поля в резонаторе; V_0, V_1 – объемы накопительного резонатора и бокового плеча *H*-тройника соответственно; P_{ctw} – мощность бегущей волны в резонаторе; t_0, t_1 – времена двойного пробега волны вдоль накопительного резонатора и вдоль бокового плеча *H*-тройника соответственно.

Мощность бегущей волны в резонаторе $P_{ctw} = W/t_0$.

Максимальный коэффициент усиления

$$G_0 = \frac{z_0 \sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{4a^2}}}{R_s \left[\frac{2L+l}{b} \left(1 + \frac{b \lambda^2}{2 a^3} \right) + 3 \right]} = \frac{1}{(2L+l)\alpha + 3\alpha_{sw}},$$

где $z_0 = 377$ Ом – импеданс свободного пространства; λ – длина рабочей волны; a, b – поперечные размеры волновода; R_s – поверхностное сопротивление материала СВЧ-системы; L – длина накопительного резонатора; l – длина бокового плеча тройника;

$$\alpha = \frac{R_s \left[1 + (b/2) \left(\lambda^2/a^3 \right) \right]}{z_0 b \sqrt{1 - \lambda^2/(4a^2)}}$$

– постоянная затухания волны на единицу длины резонатора;

$$\alpha_{sw} = \frac{4R_s \sqrt{1 - \lambda^2/(4a^2)}}{z_0}$$

– затухание из-за потерь в торцевой стенке резонатора и бокового плеча тройника.

Собственная добротность системы накопления

$$Q_0 = \frac{2\pi z_0}{R_s \left\{ (\lambda/b) \left[1 + (b/2) \left(\lambda^2/a^3 \right) \right] + 3 \right\}}$$

Постоянная времени хранения накопленной энергии: $\tau_p = Q_0/\omega_0$, где ω_0 – резонансная частота системы.

Переходное ослабление волноводного *H*-тройника

$$|R|^2 = \frac{\left[R_s \left((l/b) \left\{ 1 + \left[b \lambda^2 / (2a^3) \right] \right\} + 2 \right) \right]^2}{4z_0^2 \left[1 - \lambda^2 / (4a^2) \right]}$$

Из приведенных соотношений следует, что все основные параметры систем резонансной компрессии находятся в сильной зависимости от значения R_s материала резонансной системы.

Как известно [3], величина поверхностного сопротивления проводника R_s связана с проводимостью на постоянном токе σ и с частотой ω соотношением $R_s = \sqrt{\omega \mu / (2\sigma)}$.

Известно также [3], что при глубоком охлаждении чистых металлов значительному снижению поверхностного сопротивления в диапазоне СВЧ препятствует явление аномального скин-эффекта. На рис. 1 приведены расчетные зависимости поверхностного сопротивления $R_s(T)$ меди на частоте 1 и 10 ГГц для случая аномального скин-эффекта [4]. Из приведенных зависимостей следует, что при охлаждении традиционных медных СВЧ-резонаторов до температур жидкого азота (77 К) возможно увеличение их добротности в 2.5–3 раза.

В [5] исследовано поверхностное сопротивление R_s меди в областях классического и аномального скин-эффектов и показана возможность повышения добротности медных ускоряющих структур примерно в 10 раз, но при условии охлаждения до температур жидкого гелия (4.2 К) и только в области частот ниже 350 МГц.

Проведенные эксперименты по глубокому охлаждению медных СВЧ-резонаторов 3- и 10-см

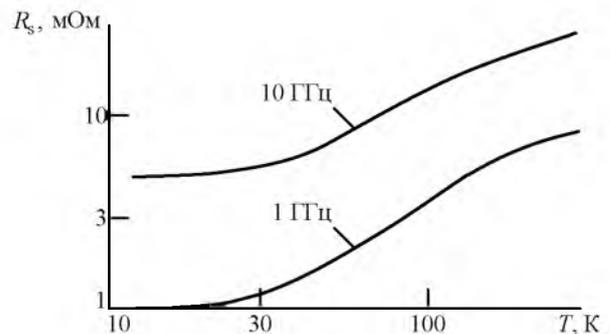


Рис. 1

Таблица 1

Вид обработки резонатора	λ , см		
	3	10	3
	T , К		
	77		4.2
K			
Расчетное значение	2.4...2.5	2.9...3.0	5.2
Механическая обработка	2	2.1	–
То же, химическая полировка	–	2.6	–
<< <<, вакуумный отжиг	2.3	–	3.2
<< <<, химическая полировка, вакуумный отжиг	2.35	2.7	4.05

Таблица 2

Параметр	T , К	
	300	77
Собственная добротность резонансной системы	15 700	44 000
Нагруженная добротность резонансной системы	7000	9800
Длительность входного импульса, мкс	3.5	3.5
Длительность выходного импульса, около, нс	50	50
Мощность выходного импульса, МВт	18	27
Эффективность накопления	0.28	0.47
КПД	0.23	0.35

диапазонов показали, что при использовании в технологии изготовления резонаторов операций прецизионной механической обработки, химического или электрохимического полирования и вакуумного отжига их деталей достижение указанных коэффициентов улучшения добротности становится вполне реальным. Результаты экспериментов обобщены в табл. 1, где приведены значения коэффициента улучшения добротности $K = Q_T / Q_{300\text{ К}}$ медных СВЧ-резонаторов 3- и 10-см диапазона, подвергнутых различным видам технологической обработки. Температурные зависимости добротности $Q(T)$ медного 3-см H_{011} -резонатора приведены на рис. 2 (кривая 1 – механическая обработка, 2 – вакуумный отжиг, 3 – химическая полировка и вакуумный отжиг, 4 – расчетная зависимость).

В табл. 2 приведены предварительные результаты экспериментальной проверки влияния глубокого охлаждения на параметры резонансного СВЧ-компрессора 10-см диапазона (частота 2.8 ГГц), изготовленного по схеме накопительного резонатора в виде отрезка стандартного медного волновода сечением 72×34 мм и с интерференционным переключателем на основе волноводного H -тройника с плазменным коммутатором в боковом плече [1]. В эксперименте характеристики компрессора, снятые при комнатной температуре, сравнивались с аналогичными характеристиками, полученными при охлаждении бокового плеча H -тройника компрессора до температуры жидкого азота.

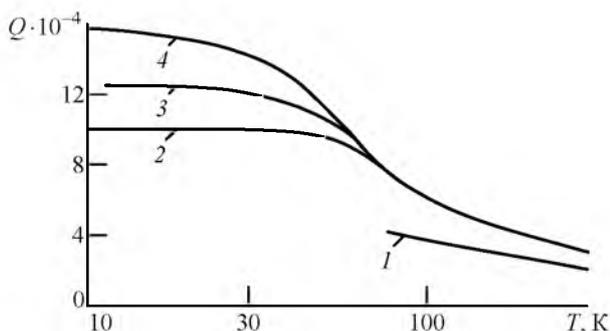


Рис. 2

Как следует из данных табл. 2, охлаждение привело к увеличению добротности резонансной системы в 2.8 раза и к повышению мощности выходного импульса, эффективности накопления и КПД компрессора в 1.5 раза. Потери при выводе энергии в обоих случаях были несколько более 1 дБ.

Охлаждение привело также к значительному изменению формы, к улучшению стабильности выходного импульса компрессора и к уменьшению величины послеимпульса. На рис. 3 приведены огибающие выходного импульса компрессора (a – при температуре бокового плеча H -тройника 77 К, b – при температуре бокового плеча 300 К).

Для получения высоких плотностей накопленной в резонаторе СВЧ-энергии W_H необходимо принимать меры по обеспечению высокой электрической прочности как самого накопительного резонатора, так и подводющих СВЧ-линий. Для этих целей в системах компрессии наиболее часто используется заполнение СВЧ-тракта и резонансной системы газообразным азотом, элегазом или их смесью [6] под давлением до 0.6...0.8 МПа с применением мер усиления механической жесткости элементов установки, находящихся под давлением (бандажирования). Это позволяет достичь рабочих напряженностей СВЧ-полей около 100...200 кВ/см, что соответствует уровню накопленной в резонаторе энергии порядка 1...3 Дж/л. Возможности повышения рабочего давления газовой изоляции (и, соответственно, плотности накопленной энергии) вы-

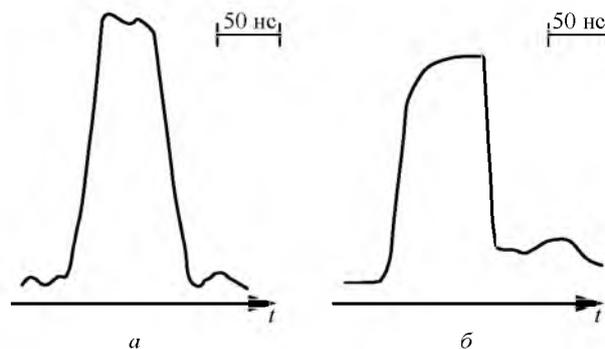


Рис. 3

Таблица 3

Параметр	T, К	
	300	77
Частота, МГц	1250	
Рабочий вид колебаний	H_{107}	
Время двойного пробега волны вдоль резонатора, нс	6	
Собственная добротность системы накопления	$3.3 \cdot 10^4$	10^5
Постоянная времени хранения энергии, мкс	4.2	12.7
Постоянная затухания, 1/м	$7.3 \cdot 10^{-4}$	$2.4 \cdot 10^{-4}$
Максимальный коэффициент усиления, дБ	26.8	32.8
Напряженность СВЧ-поля в резонаторе, кВ/см	100...200	До 400*
Накопленная в резонаторе энергия, Дж	0.85...3.35	До 13.5*
Мощность бегущей волны в резонаторе, ГВт	0.14...0.56	2.25
Переходное ослабление тройника, дБ	78.5	88.5
Оптимальная связь**	9.4	Около 32
Эффективность накопления**	0.73	0.77
Коэффициент усиления, дБ**	17.3	17.8

*Для системы с заполнением жидким азотом.

**При длительности входного импульса 1 мкс.

ше отмеченного уровня ограничены механической прочностью СВЧ-окон и сложностью обеспечения механической устойчивости всей конструкции.

Известно [7], что по степени влияния на электрическую прочность газа понижение его температуры при неизменном давлении равносильно повышению давления при постоянной температуре. В связи с этим следует ожидать, что при охлаждении накопительного резонатора с газовой изоляцией одновременно с увеличением его добротности станет возможным и повышение уровня пробивных электрических полей при умеренных значениях давления газа в резонаторе. С другой стороны, жидкий азот имеет значение $\varepsilon_{77\text{ К}} = 1.43$ [8] и импульсную электрическую прочность $E_{\text{пр}}$ порядка 400 кВ/см [9]. Это дает основания полагать, что при прочих равных условиях заполнение СВЧ-систем жидким азотом даст возможность существенно (в несколько раз) повысить плотность запасенной в них энергии $W_{\text{н}}$.

Для оценки возможностей использования жидкого азота в качестве заполняющей диэлектрической среды охлаждаемых СВЧ-систем выполнены измерения диэлектрической проницаемости ε и диэлектрических потерь жидкого азота $\text{tg } \delta$ по резонаторной методике, использованной ранее при исследовании жидкого гелия [10]. Установлено, что для жидкого азота технической чистоты (99.8 %) $\text{tg } \delta < 10^{-5}$ на частоте 3.1 ГГц. При повышении чи-

стоты поступающего на заполнение резонатора жидкого азота следует ожидать значительного снижения $\text{tg } \delta$. Это означает, что диэлектрические потери в жидком азоте на СВЧ будут незначительными. Из экспериментальной зависимости $\varepsilon(T)$ также следует, что применение жидкого азота в качестве заполняющей среды требует термостабилизации устройства на уровне $10^{-2} \dots 10^{-3}$ К, что технически вполне решаемо. При этом следует отметить, что вследствие высоких значений теплоемкости жидкого азота (2 Дж/(г·К)) и теплоты его испарения (200 Дж/г) [5], а также доступности жидкого азота, затраты на охлаждение оказываются вполне приемлемыми.

В табл. 3 приведены результаты расчетов основных параметров волноводной системы накопления резонансного СВЧ компрессора 30-см диапазона длин волн, описанного в [8], выполненные для рабочих температур компрессора 300 и 77 К. Длительность импульса возбуждения принималась много больше постоянной времени хранения энергии.

Сравнение данных расчета показывает, что охлаждение до температур жидкого азота позволяет существенно повысить энергетические параметры традиционных медных систем резонансной компрессии СВЧ-энергии, что может значительно расширить область практического применения.

Авторы выражают признательность Ю. Г. Юшкову за полезные замечания при обсуждении работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Генерирование мощных СВЧ-импульсов наносекундной длительности / А. Н. Диденко, В. И. Зелен-

цов, Ю. Г. Штейн, Ю. Г. Юшков // Радиотехника и электроника. 1972. Т. 17, № 7. С. 1545–1547.

2. Артёменко С. Н., Каминский В. Л., Самойленко Г. М. Компрессия СВЧ-импульсов в сверхпроводящих резонаторах // Изв. вузов. Физика. 2012. Т. 55, № 11/2. С. 112–117.

3. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ / под ред. Н. Д. Девяткова: в 2 т. М.: Высш. шк., 1970. Т. 1. 440 с.

4. Менде Ф. Ф., Спицын А. И. Поверхностный импеданс сверхпроводников. Киев: Наук. думка, 1985. 240 с.

5. Кутовой В. А., Егоров А. М. Концепция создания криогенных ускоряющих структур ускорителя из меди // ЖТФ. 2008. Т. 78, вып. 3. С. 86–90.

6. Формирование мощных импульсов при накоплении СВЧ энергии в резонаторе / Н. Д. Девятков, А. Н. Диденко, Л. Я. Замятина и др. // Радиотехника и электроника. 1980. № 6. С. 1227–1230.

7. Техника высоких напряжений / под ред. Д. В. Разевица. М.: Энергия, 1976. 488 с.

8. Справочник по физико-техническим основам криогеники / под ред. М. П. Малкова. М.: Энергия, 1973. 392 с.

9. Барабошкин В. В., Диденко А. Н., Юшков Ю. Г. О влиянии материала электродов на импульсную электрическую прочность криогенных жидкостей // Изв. вузов. Физика. 1981. № 1. С. 91–94.

10. К вопросу использования жидкого гелия в качестве заполняющей среды сверхпроводящих СВЧ-систем / С. Н. Артёменко, В. Л. Каминский, Г. М. Самойленко, Ю. Г. Юшков // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10, вып. 11. С. 700–702.

11. Резонансная компрессия СВЧ импульсов в L-диапазоне / С. Н. Артёменко, В. А. Августинович, В. Л. Каминский и др. // Изв. вузов. Физика. 2013. Т. 56, № 11/2. С. 231–234.

S. N. Artjomenko, G. M. Samoylnko

Physics and technology institute of National research Tomsk polytechnical university

Cooled resonant systems for microwave pulses compression

Results of calculations of key parameters of cryogenic resonant microwave compressor are given. It is shown that cooling up to liquid nitrogen temperatures allows to improve significantly energetic parameters of traditional copper systems of a resonant compression of microwave pulses. Results of the experimental study of the cooled microwave compressor of the 10-cm range are given.

Microwave energy, microwave pulse, compression

Статья поступила в редакцию 31 марта 2014 г.
