



УДК 621.372.413

С. Н. Артёменко, Г. М. Самойленко

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

## Сверхпроводящий коммутатор охлаждаемого резонансного СВЧ-компрессора<sup>1</sup>

*Рассмотрено прохождение электромагнитной волны через пленку из высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП). Показана возможность использования эффекта быстрого переключения тонких ВТСП-пленок из сверхпроводящего состояния в нормальное для коммутации СВЧ-энергии в системах компрессии СВЧ-импульсов. Рассмотрен вариант СВЧ-компрессора на основе охлаждаемого медного СВЧ-резонатора с пленочным ВТСП-коммутатором.*

### СВЧ-коммутатор, СВЧ-импульс, СВЧ-компрессор, высокотемпературный сверхпроводник

Один из способов улучшения характеристик медных резонансных систем, используемых в устройствах электроники СВЧ больших мощностей, заключается в их глубоком охлаждении, при котором за счет температурной зависимости проводимости меди следует ожидать значительного роста добротности системы. В [1] исследовано охлаждение высокочастотных ускоряющих структур из меди до температур жидкого гелия и показано, что этот прием может обеспечить десятикратное увеличение добротности структуры. Однако аппаратное обеспечение работ при гелиевых температурах является весьма сложным и дорогостоящим. В связи с этим представляется, что для ряда применений полезным и практически более приемлемым может быть охлаждение медных СВЧ-систем до промежуточных (азотных) температур, при котором в диапазоне частот 1...10 ГГц реально повышение добротности в 2.5–3 раза. В системах резонансной компрессии СВЧ-импульсов это приводит к значительному росту их основных энергетических параметров (коэффициента усиления, мощности выходных импульсов, эффективности накопления энергии и КПД устройства в целом), что расширяет область прикладного применения этого вида приборов.

Ключевым элементом резонансного СВЧ-компрессора является коммутатор, переключающий накопительный резонатор из режима накопления энергии в режим вывода. В электронике СВЧ

больших мощностей для целей коммутации СВЧ-энергии обычно используются плазменные или электронно-лучевые переключатели, каждый из которых имеет свои недостатки, в частности, сложность их применения в условиях криогенных температур. В связи с этим актуальной является задача разработки новых типов коммутаторов, в том числе работающих на новых физических принципах.

В рамках общей концепции охлаждаемых СВЧ-систем естественно рассмотреть вопрос о применимости для целей компрессии СВЧ-энергии высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) с критической температурой ( $T_{кр}$ ), превышающей температуру жидкого азота (77 К).

Анализ данных о свойствах и поведении ВТСП в диапазоне СВЧ показывает следующее:

– имеется ряд ВТСП-материалов с критической температурой  $T_{кр} > 90$  К, у которых в диапазоне частот 1...10 ГГц при температуре жидкого азота значения поверхностного сопротивления  $R < 10^{-3}$  Ом, что на порядок ниже  $R$  меди при той же температуре. Критическая плотность тока  $J_{кр 77 К}$  ВТСП достигает  $(2...3)10^6$  А/см<sup>2</sup> [2];

– ВТСП-пленки могут иметь весьма низкие значения времени переключения из сверхпроводящего состояния (S) в нормальное (N) (меньшие  $10^{-10}$ ... $10^{-12}$  с) [3].

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках Государственного задания "Наука" Минобрнауки РФ (проект № 1814).

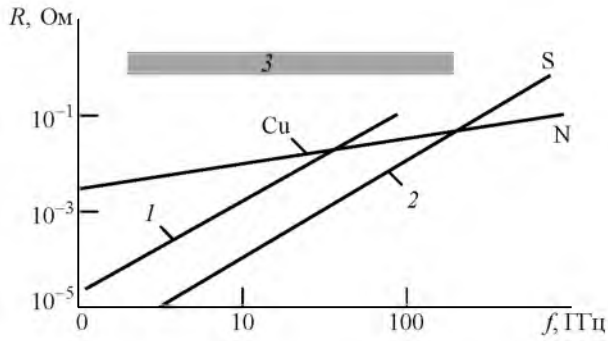


Рис. 1

На рис. 1 приведены частотные зависимости поверхностного сопротивления  $R$  ВТСП-пленок при  $T = 77$  К: 1 – пленка  $YBa_2Cu_3O_7$  [4], 2 – пленка  $Tl_2Ba_2CaCu_2O_8$  [5], 3 – область типичных значений  $R$  ВТСП-пленок в нормальном состоянии [5]. Для сравнения в [5] приведена зависимость  $R(f)$  для меди.

В настоящее время надежных технологий изготовления объемных ВТСП-резонаторов СВЧ, тем более предназначенных для работы в сильных СВЧ-полях, не создано, однако имеются промышленные технологии получения крупноразмерных ВТСП-пленок со значениями  $T_{кр} > 90$  К,  $J_{кр\ 77\ К} > 10^6$  А/см<sup>2</sup> и  $R_{77\ К} < 10^{-3}$  Ом. Указанные физические характеристики пленочных ВТСП могут служить исходными данными для оценки возможных параметров и разработки быстродействующих коммутаторов для СВЧ-устройств.

Принцип действия пленочных ВТСП-коммутаторов основан на разнице глубины проникновения ( $\delta$ ) электромагнитного поля в сверхпроводник в N- и S-состояниях. Например, для ВТСП-системы  $YBa_2Cu_3O_7$   $\delta_S$  порядка 100 нм [6]. При этом  $\delta_N$ , определенная из формул для классического скин-эффекта обычных проводников с учетом данных о проводимости ВТСП вблизи температуры перехода в N-состоянии  $\sigma_N = 10^{-5} \dots 10^{-6}$  Ом<sup>-1</sup> · м<sup>-1</sup> [6], имеет значение порядка 10 мкм. Отсюда следует соотношение  $\delta_N/\delta_S$  в СВЧ-диапазоне порядка 100, поэтому при толщине образца ВТСП  $d \ll \delta_N$  он может работать как ключевой элемент с управляемой прозрачностью для СВЧ-поля.

Рассмотрим СВЧ-компрессор со сверхпроводящим коммутатором в виде охлажденного до температуры жидкого азота медного СВЧ-резонатора, одна из стенок которого выполнена из ВТСП-пленки толщиной  $d \approx \delta_S$ . В S-состоянии

ВТСП-пленка является элементом СВЧ-резонатора с резонансной частотой  $f_0$  и добротностью  $Q$ .

Быстрый перевод пленки тем или иным способом в N-состояние (например, импульсом тока, лазерным излучением или СВЧ-полем резонатора, превышающим некоторое пороговое значение) увеличивает глубину проникновения поля от  $\delta_S$  до  $\delta_N$ . При этом пленка становится прозрачной для СВЧ-поля и накопленная в резонаторе СВЧ-энергия излучается в нагрузку. Под быстрым переводом понимается интервал времени много меньше времени пробега волны вдоль резонатора.

Оценим изменение коэффициента передачи ВТСП-пленки при ее S/N-переключении, а также возможные параметры СВЧ-импульсов, формируемых при таком способе переключения СВЧ-резонатора из режима накопления энергии в режим вывода. Для этого рассмотрим пленку как отрезок волновода с входным коэффициентом передачи  $k_S$  в S-состоянии и  $k_N$  в N-состоянии и, соответственно, выходными коэффициентами передачи  $h_S$  и  $h_N$ . Кроме того, полагаем, что электрическая длина отрезка в S- и N-состояниях составляет  $\varphi_S$  и  $\varphi_N$  соответственно. Для упрощения вычислений полагаем также, что волновод сверхразмерный и его волновое сопротивление равно волновому сопротивлению свободного пространства. При указанных условиях, используя матрицы рассеяния для волн на входе и на выходе отрезка и известные выражения для коэффициента отражения электромагнитной волны от металлической пленки с проводимостью  $\sigma$  [7], получим следующие выражения для коэффициентов передачи по мощности ( $A_S$  и  $A_N$ ) пленки в S- и N-состояниях соответственно:

$$A_S = (16R_S^2/z_0^2) \exp(-d/\delta_S)/Z;$$

$$A_N = (16R_N^2/z_0^2) \exp(-d/\delta_N)/Z, \quad (1)$$

где  $R_S$  и  $R_N$  – поверхностное сопротивление в S- и N-состояниях соответственно;  $z_0 = 377$  Ом – импеданс свободного пространства;

$$Z = 1 - 2(1 - 4R_N/z_0) \exp(-d/\delta_N) \cos(-d/\delta_N) + (1 - 4R_N/z_0)^2 \exp(-2d/\delta_N).$$

Из полученных формул следует, что при заданных значениях  $R$  коэффициент передачи определяется только отношением толщины пленки к глубине проникновения поля.

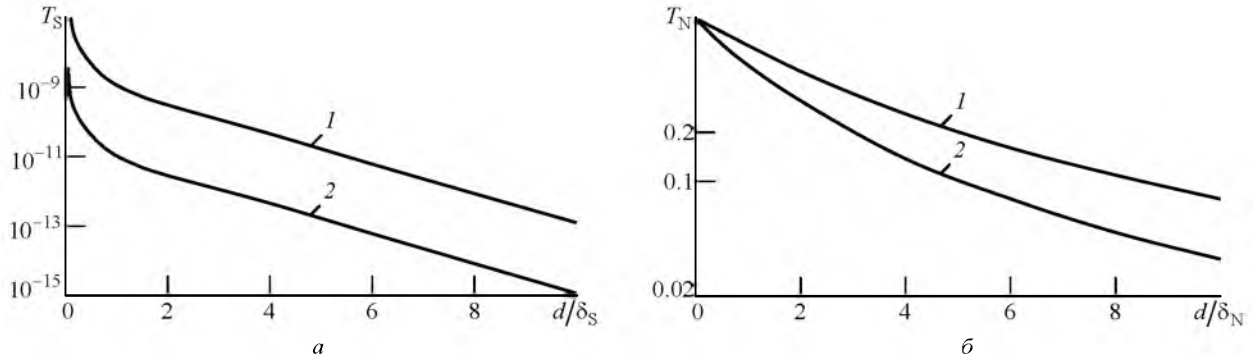


Рис. 2

На рис. 2 представлены зависимости коэффициента передачи по мощности ВТСП-пленки в сверхпроводящем (рис. 2, а) и нормальном (рис. 2, б) состояниях от отношения  $d/\delta$  при различных значениях параметра  $x = 4R/z_0$ : а –  $x = 5 \cdot 10^{-5}$  (медная пленка 1);  $x = 5 \cdot 10^{-6}$  (ВТСП-пленка 2); б – ВТСП-пленка: 1 –  $x = 2.5 \cdot 10^{-2}$ , 2 –  $x = 1.5 \cdot 10^{-2}$ .

Из рис. 2 следует:

– при толщине вплоть до 5...10 нм ВТСП-пленка, находящаяся в S-состоянии, практически не влияет на значение добротности охлажденного медного резонатора;

– в N-состоянии при малых толщинах и значениях параметра  $x$ , соответствующих реальным значениям  $R_N$  ВТСП-пленок, через пленку возможна достаточно эффективная передача энергии.

Следует отметить, что результаты расчетов  $A_N$  по соотношению (1) для заданных значений  $R_N$  представляют поведение коэффициента передачи для фиксированных значений частоты и проводимости. Для получения оценок в более широком диапазоне частот формулу (1) следует записывать с учетом зависимости  $R_N$  и  $\delta_N$  от  $\sigma$  и  $f$ .

Для анализа процесса вывода энергии из резонатора с ВТСП-пленкой смоделируем закон изменения коэффициента передачи пленки в N-состоянии от времени функцией вида

$$h^2(t) = A_N^2 [1 - \exp(-t/\tau_{II})],$$

где  $\tau_{II}$  – характерное время процесса S/N-переключения.

Используя стандартные процедуры метода матрицы рассеяния [8], можно показать, что после отключения генератора амплитуда рабочей волны в резонаторе ( $b_2$ ) изменяется во времени по закону, даваемому решением дифференциального уравнения вида

$$db(t)/dt + b(t)/\tau = 0 \quad (2)$$

с начальным условием  $b(0) = \frac{jk}{1 - \sqrt{1 - k^2} \cdot \exp(-\alpha_S)}$

и с постоянной времени

$$\tau(t) = \frac{T_{II}}{1 - \sqrt{1 - k^2} \cdot \sqrt{1 - h^2(t)} \cdot \exp(-\alpha_S)},$$

где  $T_{II}$  – время двойного пробега волны в резонаторе;  $k$  и  $h(t)$  – коэффициенты передачи входной и выходной связей резонатора соответственно;  $\alpha_S$  – постоянная затухания резонатора. В процессе накопления энергии в резонаторе  $h^2(t) = A_S \approx 0$ , а в процессе вывода энергии  $h^2(t)$  изменяется и приобретает значение  $A_N$ .

Решение уравнения (2) относительно мощности, нормированной на мощность бегущей волны резонатора, имеет вид

$$P(t) = \frac{G(t) [1 - \exp(-t/\tau_{II})]}{[1 - \sqrt{1 - k^2} \cdot \exp(-\alpha_S)]^2}; \quad (3)$$

где при  $m = T_N = 1$

$$G(t) = k^2 \times \exp \left\{ \frac{2}{T_{II}} \left[ t + 2\tau_{II} \sqrt{1 - k^2} \cdot \exp \left( -\alpha_N - \frac{t}{\tau_{II}} \right) \right] \right\},$$

а при  $m = T_N < 1$

$$G(t) = mk^2 \exp \left( \frac{2t}{T_{II}} \right) \left\{ t + 2\tau_{II} \sqrt{1 - k^2} \times \exp(-\alpha_N) \sqrt{1 - m} \left[ 2\mu + \ln \left( \frac{\mu - 1}{\mu + 1} \right) \right] \right\},$$

причем  $\mu = \sqrt{1 + \frac{m \exp(-t/\tau_{II})}{1 - m}}$ .

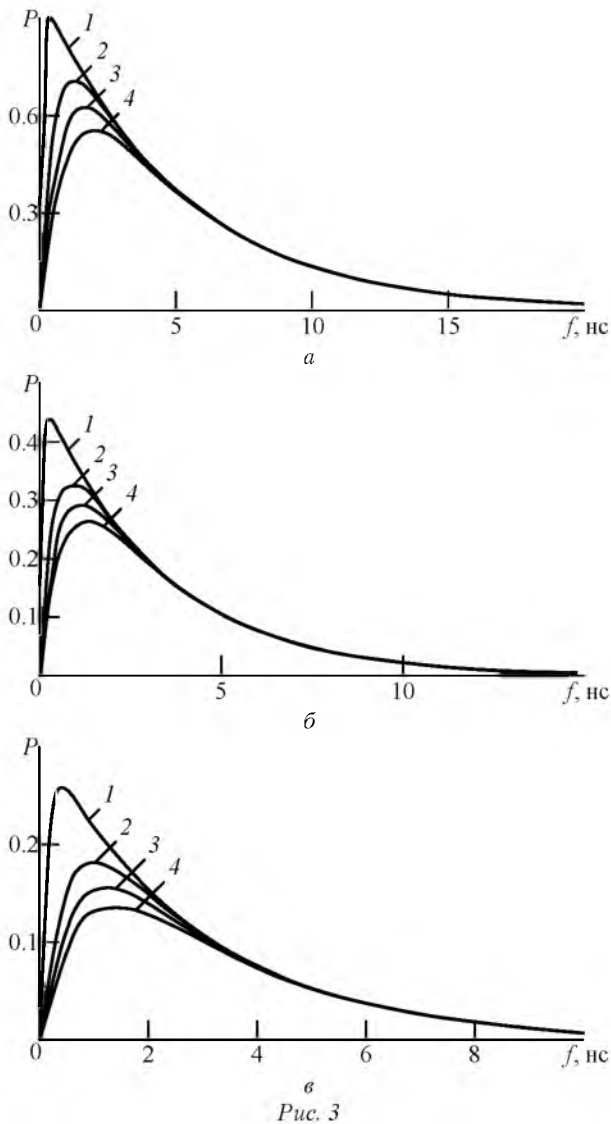


Рис. 3

На рис. 3 приведены расчетные огибающие выходных импульсов, формируемых при S/N-переключении ВТСП-пленки, в виде временной зависимости мощности, нормированной к мощности бегущей волны накопительного резонатора: а –  $m = 1$ ; б –  $m = 0.25$  ( $x = 2.5 \cdot 10^{-2}$ ); в –  $m = 0.12$  ( $x = 1.5 \cdot 10^{-2}$ ). Зависимости построены для нескольких значений времени переключения  $\tau_{II}$ : кривые 1 – 0.1 нс, кривые 2 – 0.5 нс, кривые

3 – 0.75 нс, кривые 4 – 1 нс. Расчеты проведены с использованием данных рис. 2 при  $T_{IIp} = 10$  нс,  $d/\delta_N = 0.01$ ,  $\alpha_N = 0.1$ . Поскольку длительности выходных импульсов сопоставимы с временем двойного пробега  $T_{IIp}$ , решение уравнения (3) является не совсем корректным и приводит к заниженным результатам. В связи с этим полученные зависимости имеют качественный характер, подтверждающий работоспособность рассматриваемой схемы. Для получения более точных оценок расчеты огибающей выходного импульса следует проводить через рекуррентные соотношения между амплитудами волн в системе.

Из полученных зависимостей следует, что высокая эффективность передачи СВЧ-энергии через ВТСП-пленку может достигаться при времени ее переключения менее  $10^{-10}$  с. В [9] показана реальность достижения такого быстродействия при токовом управлении состоянием сверхпроводниковой пленки в режиме электронного разогрева в резистивном состоянии. Условием обеспечения режима электронного разогрева является выполнение переключающего элемента в виде совокупности узких и тонких ( $d \approx \delta_S$ ) пленок сверхпроводника, сформированных на диэлектрической подложке с высокой теплопроводностью.

Анализ задачи о прохождении электромагнитной волны через ВТСП-пленки показал возможность использования эффекта S/N-переключения тонких ВТСП-пленок для быстрого вывода энергии, накопленной в охлажденных до криогенных температур СВЧ-резонаторах.

Интегрирование охлаждаемых резонансных систем накопления СВЧ-энергии с быстродействующими устройствами коммутации на основе пленок ВТСП дает возможность создания новых типов приборов для импульсной СВЧ-электроники больших мощностей.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кутовой В. А, Егоров А. М. Концепция создания криогенных ускоряющих структур ускорителя из меди // ЖТФ. 2008. Т. 78, вып. 3. С. 86–90.
2. Epitaxial YBCO HTS Thin Film Up to 3" (75 mm) / MTI Corp. URL: <http://www.mtixtl.com/YBCO-500nm-Film-LaAlO3-76D05.aspx>
3. Козырев А. Б., Самойлова Т. Б., Шаферова С. Ю. Быстрое токовое S/N-переключение пленок  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

- и его применение для амплитудной модуляции СВЧ-сигнала // СФХТ. 1993. Т. 6, № 4. С. 823–827.
4. Low surface resistance in  $YBa_2Cu_3O_x$  melt-processed thick films / N. McN. Alford, T. W. Button, M. J. Adams et al. // Nature. 1991. Vol. 349, № 6311. P. 680–683.
5. Козырев А. Б. Эффект быстрого переключения сверхпроводниковых пленок и возможности его ис-

пользования в СВЧ-микрорелектронике // Соросовский образовательный журн. 2004. Т. 8, № 1. С. 93–100.

6. Пухов А. А. Пороговая интенсивность микроволнового излучения, вызывающего S-N-переход тонкой ВТСП-пленки // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22, вып. 12. С. 55–59.

7. Никольский В. В. Теория электромагнитного поля. М.: Высш. шк., 1961. 371 с.

8. Альтман Дж. Устройства СВЧ. М.: Мир, 1968. 487 с.

9. Сверхпроводниковый СВЧ-ограничитель на основе электронного разогрева / Е. М. Гершензон, Г. Н. Гольцман, А. Л. Дзарданов, Е. А. Кузнецов // СФХТ. 1992. Т. 5, № 11. С. 2164–2170.

S. N. Artemenko, G. M. Samoilenko  
*National research Tomsk polytechnic university*

### **Superconducting switch of cooled resonant microwave compressor**

*The problem of electromagnetic wave transmission through a high temperature superconducting (HTSC) film is studied. The fast transition of thin HTSC film from superconducting state into normal one (S/N transition) is shown as effect possibly becoming for microwave energy switching in a cooled compressor. The version of the microwave compressor design on the basis of a cooled copper cavity with the HTSC film is considered.*

Microwave switch, microwave impulse, microwave compressor, high temperature superconductor

Статья поступила в редакцию 15 апреля 2014 г.