

# Нелинейные СВЧ свойства эпитаксиальных пленок ВТСП

Г. А. Мелков, В. Ю. Малышев, С. К. Корсак

*Киевский университет им. Тараса Шевченко, Украина, 252601, г. Киев-33, ул. Владимирская, 64*  
E-mail: melkov@boy.rpd.univ.kiev.ua

Статья поступила в редакцию 27 февраля 1997 г., после переработки 18 апреля 1997 г.

На частоте 8,95 ГГц исследовано поверхностное сопротивление  $R_s$  эпитаксиальных пленок ВТСП  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  на сапфире в присутствии мощного дополнительного микроволнового сигнала частотой 9,4 ГГц, обеспечивающего на пленке амплитуду переменного магнитного поля до 20 Э. Установлено, что  $R_s$  пленки ВТСП увеличивается при увеличении амплитуды такого дополнительного сигнала. При этом величина  $R_s$  пленки ВТСП практически совпадает с величиной нелинейного поверхностного сопротивления пленки при той же амплитуде переменного магнитного поля. То есть поверхностные сопротивления пленки для слабого сигнала в присутствии мощного дополнительного и для одного мощного сигнала являются близкими друг к другу. Предложено объяснение наблюдаемых явлений, основанное на представлении пленки ВТСП как джозефсоновской среды, содержащей различного вида джозефсоновские контакты. Под действием мощного микроволнового сигнала свойства этой среды могут изменяться из-за переключения части контактов, что вызывает переход среды в новое состояние, одинаково проявляющее себя как для слабого, так и для сильного сигналов.

На частоте 8,95 ГГц досліджено поверхневий опір  $R_s$  епітаксіальних плівок ВТНП  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  на сапфірі в присутності потужного додаткового сигналу частотою 9,4 ГГц, що забезпечує на плівці амплітуду змінного магнітного поля до 20 Е. Встановлено, що  $R_s$  плівки ВТНП зростає при збільшенні амплітуди такого додаткового сигналу. При цьому величина  $R_s$  плівки ВТНП практично співпадає з величиною нелінійного поверхневого опору плівки за тієї ж амплітуди змінного магнітного поля. Тобто поверхневі опори плівки для слабого сигналу в присутності потужного додаткового та для самого потужного сигналу є близькими один до іншого. Запропоновано пояснення спостережуваних явищ, яке ґрунтується на уявленні плівки ВТНП як джозефсонівського середовища, що містить різного виду джозефсонівські контакти. Під дією потужного мікрохвильового сигналу властивості цього середовища можуть змінюватися через перемикання частини контактів, що викликає перехід середовища в новий стан, який однаково проявляє себе як для слабого, так і для сильного сигналів.

PACS: 74.30.Gn, 74.20.De, 74.30.Ci, 74.60.Ge

## Введение

В настоящее время наиболее перспективным применением пленок ВТСП является создание на их основе пассивных линейных резонансных структур СВЧ диапазона [1]. Использование пленок ВТСП вместо медных аналогов позволяет существенно улучшить как электрические параметры (потери в полосе пропускания и крутизну фронтов на краях полосы), так и массогабаритные характеристики приборов. Однако для успешного применения устройство на ВТСП должно удовлетворять целому ряду требований, одно из которых состоит в отсутствии

заметных нелинейных изменений его параметров вплоть до мощностей в несколько ватт, что в резонансных системах соответствует весьма большим напряжениям СВЧ магнитных полей, составляющих по порядку величины десятки и даже сотни эрстед [2]. Положение еще более осложняется тем, что в реальной ситуации на пленку ВТСП одновременно действуют несколько сигналов, различающихся по частоте и амплитуде. Для успешного решения проблемы нелинейности необходимо знание физических причин ее возникновения, разработка на основе этого технологии получения эпитаксиальных пленок ВТСП с повышенным диапазоном

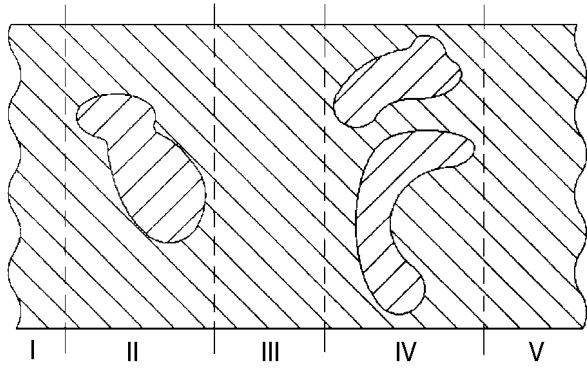


Рис. 1. Модель эпитаксиальной пленки ВТСП.

линейности, а также создание устройств, конструкции которых при заданной мощности обеспечивают наименьшие значения максимальных амплитуд СВЧ магнитных полей и токов [3].

В работе [4] предложена модель эпитаксиальной пленки ВТСП, учитывающая как линейные, так и нелинейные свойства. Согласно этой модели, реальная пленка ВТСП представляет собой набор последовательно соединенных областей, обладающих различными физическими свойствами (рис. 1). Одни из них являются областями идеального бездефектного сверхпроводника (области I, III, V на рис. 1), другие (II, IV) содержат различного рода дефекты, шунтированные участками с идеальной проводимостью, например, разориентированные в базисной плоскости участки сверхпроводника, окруженные высокоугловыми границами. Такие границы образуют слабые связи различных типов и именно они вносят решающий вклад в поверхностное сопротивление эпитаксиальных пленок ВТСП [5]. В силу этого эквивалентная схема реальной сверхпроводящей пленки (см. [4]) должна включать элементы, соответствующие областям с идеальной проводимостью, а также элементы, ответственные за различного рода слабые связи, шунтированные идеальным сверхпроводником, представляющим собой в основном малое индуктивное сопротивление. Предполагается, что слабые связи, возникшие естественным образом при напылении пленки ВТСП, могут быть объединены в два различных типа. Первые из них образуются на низкоомных SNS или мостиковых контактах, вторые — на высокоомных, например туннельных контактах. В линейном режиме при малых амплитудах СВЧ сигнала основной вклад в поверхностное сопротивление эпитаксиальных

пленок ВТСП вносят низкоомные контакты [4], сопротивление которых невелико по сравнению с индуктивным сопротивлением шунтирующих эти контакты участков идеального сверхпроводника. При увеличении амплитуды сигнала, как это следует из нелинейно-резистивной модели туннельных контактов [6], начинается переход этих контактов в низкоомное состояние, что увеличивает их вклад в поверхностное сопротивление — именно такое переключение ответственно за нелинейные свойства реальных пленок ВТСП. Переключение контактов начинается при превышении амплитудой сигнала некоторого порогового значения, при котором напряжение на контакте, шунтированном индуктивным сопротивлением идеального сверхпроводника, достигает целевого напряжения  $V_g$  [6]. Ясно, что из-за наличия шунтирующей индуктивности напряжение на контакте при тех же самых возбуждающих токах в пленке будет увеличиваться с ростом частоты. Отсюда становится понятным обнаруженная в [2], но не объясненная там закономерность, состоящая в том, что нелинейности эпитаксиальных пленок ВТСП проявляются для сигналов с большей частотой при меньших амплитудах переменных токов или соответствующих им значениях переменного магнитного поля на пленке.

Таким образом, в рамках предложенной в [4] модели линейное поверхностное сопротивление обусловлено в основном наличием низкоомных слабых связей, а нелинейное — переключением высокоомных связей в низкоомное состояние. Однако при одновременном воздействии на пленку двух и более микроволновых сигналов первое утверждение, по-видимому, должно быть скорректировано, если амплитуда хотя бы одного из сигналов становится достаточной для переключения контактов. Теперь для другого, даже слабого сигнала, независимо от его амплитуды, часть связей в результате действия сильного сигнала окажется в низкоомном состоянии и эффективное поверхностное сопротивление для слабого сигнала в присутствии сильного должно увеличиться.

Задачей настоящей работы было экспериментальное исследование линейного поверхностного сопротивления эпитаксиальной пленки ВТСП для слабого сигнала в присутствии мощного дополнительного микроволнового сигнала, отличающегося от первого по частоте и амплитуде. Полученные экспериментальные зависимости показали, что линейное

поверхностное сопротивление действительно увеличивается при увеличении амплитуды дополнительного сигнала; при этом величина линейного поверхностного сопротивления для слабого сигнала практически совпадает с величиной нелинейного поверхностного сопротивления для мощного дополнительного сигнала.

### Эксперимент

В работе исследовалось поверхностное сопротивление *S*-ориентированных пленок ВТСП  $YBa_2Cu_3O_{7-8}$  на сапфире, полученных методом лазерного напыления [7]. Толщина пленок 0,1–0,15 мкм, величина критического тока в области гелиевых температур более  $10^7$  А/см<sup>2</sup>, критическая температура  $T_c \sim 89$  К, остаточное поверхностное сопротивление составляло для разных пленок 100–500 мкОм в трехсантиметровом диапазоне длин волн. Согласно [5], объемная доля высокоугловых границ в исследованных нами пленках не превышала 0,3–4%.

Для определения относительного изменения поверхностного сопротивления  $R_S$  пленки ВТСП в присутствии дополнительного сигнала конечной амплитуды  $h$  использовался метод открытого диэлектрического резонатора (ОДР) [4,8], состоящий в измерении добротности ОДР с прижатой к одной из его граней пленкой ВТСП.

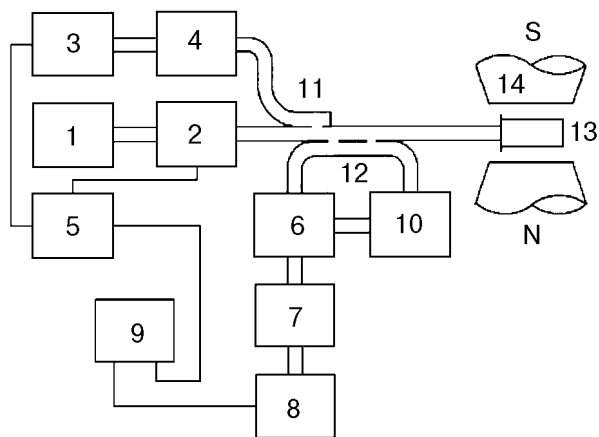


Рис. 2. Блок-схема измерительной установки: 1 – маломощный СВЧ генератор; 2 – модулятор СВЧ; 3 – магнетронный генератор; 4 – прецизионный аттенюатор; 5 – низкочастотный импульсный модулятор; 6 – волноводный переключатель; 7 – полосно-пропускающий фильтр; 8 – усилитель СВЧ на лампе бегущей волны и импульсный детектор; 9 – осциллограф; 10 – прецизионный аттенюатор; 11 – направленный ответвитель; 12 – двунаправленный ответвитель; 13 – измерительная секция в магнитном поле; 14 – магнит.

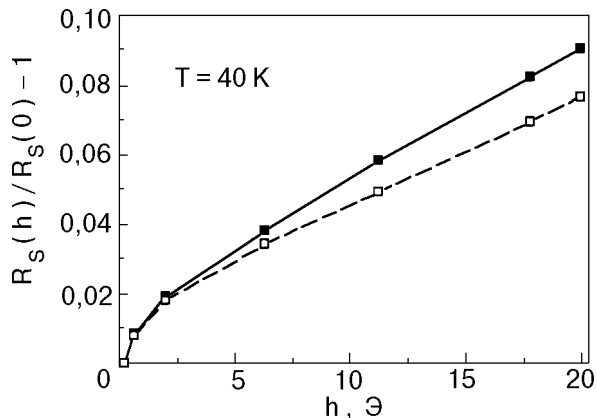


Рис. 3. Зависимость относительного линейного поверхностного сопротивления эпитаксиальной пленки ВТСП на частоте 8,95 ГГц от амплитуды  $h$  мощного дополнительного сигнала на частоте 9,4 ГГц (■, сплошная линия); для сравнения пунктирной линией (□) приведена экспериментальная зависимость нелинейного поверхностного сопротивления той же пленки ВТСП для сигнала частотой 9,4 ГГц от амплитуды этого сигнала.

Размеры прямоугольного резонатора выбирались таким образом, чтобы одновременно обеспечить резонанс как на частоте  $\omega_s$ , на которой проводятся измерения поверхностного сопротивления в режиме слабого сигнала, так и на частоте дополнительного сигнала большой амплитуды  $\omega_l$ . При этом использовались низшие колебания магнитного типа  $H_{\delta 11}$  и  $H_{1\delta 1}$ , магнитные поля которых на пленке были ортогональны друг другу. Пленка с ОДР помещалась в середину стандартного трехсантиметрового прямоугольного волновода в пучность переменного магнитного поля волновода, касательного к плоскости пленки. Для измерений нами использовался ОДР, изготовленный из термостабильной керамики с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon \sim 80$ , его размеры составляли  $3 \times 2,6 \times 3,5$  мм, что обеспечивало резонанс на частотах  $\omega_s / 2\pi \sim 8,95$  ГГц и  $\omega_l / 2\pi \sim 9,4$  ГГц.

Блок-схема экспериментальной установки изображена на рис. 2. Максимальная амплитуда магнитного поля частотой  $\omega_l$  на пленке ВТСП достигала 20 Э. Во избежание нагревания пленки электромагнитной мощностью все измерения проводились в импульсном режиме. Длительность импульсов – 2 мкс, частота повторения – 50 Гц.

На рис. 3 представлена величина относительного изменения линейного поверхностного сопротивления пленки ВТСП

$R_S(h)/R_S(0) - 1$  на частоте  $\omega_s/2\pi = 8,95$  ГГц в присутствии дополнительного сигнала СВЧ частотой  $\omega_l/2\pi = 9,4$  ГГц в зависимости от амплитуды СВЧ магнитного поля дополнительного сигнала  $h$ . Здесь  $R_S(h)$  и  $R_S(0)$  — соответственно линейное поверхностное сопротивление пленки ВТСП при наличии мощного дополнительного сигнала амплитудой  $h$  и в его отсутствие. На этом же рисунке для сравнения пунктирной линией изображена экспериментальная зависимость относительного изменения нелинейного поверхностного сопротивления той же пленки ВТСП для сигнала частотой 9,4 ГГц при изменении амплитуды этого сигнала. Напомним, что такие зависимости подробно изучены в [4]. В данном случае  $R_S(h)$  есть поверхностное сопротивление пленки ВТСП при амплитуде переменного магнитного поля равной  $h$ , измеренное с помощью одного (служившего при основных измерениях дополнительным) сигнала. На рис. 3 хорошо видно, что количественно линейное поверхностное сопротивление пленки ВТСП в присутствии мощного дополнительного сигнала СВЧ амплитудой  $h$  и нелинейное поверхностное сопротивление пленки при той же амплитуде практически совпадают; одинаков и качественный ход зависимостей от амплитуды переменного магнитного поля  $h$ . Эти результаты находятся в полном согласии с предложенной в [4] моделью эпитаксиальной пленки ВТСП и с изложенными в начале данной работы рассуждениями, сводящимися к тому, что всякая реальная пленка ВТСП фактически является джозефсоновской средой. Свойства этой среды зависят от состояния

образующих ее слабых связей, которые переключаются из одного состояния в другое как самим измерительным сигналом, так и с помощью мощного дополнительного сигнала. В первом случае будет иметь место нелинейное поверхностное сопротивление, во втором — такое же по величине линейное, не зависящее от амплитуды измерительного сигнала поверхностное сопротивление, определяемое амплитудой дополнительного сигнала.

Еще одним доказательством правильности выдвинутых здесь и в [4] предположений является приведенная на рис. 4 температурная зависимость относительного поверхностного сопротивления эпитаксиальной пленки ВТСП в присутствии мощного дополнительного сигнала. Эта зависимость во многом напоминает температурные зависимости нелинейного поверхностного сопротивления эпитаксиальных пленок ВТСП, измеренные в работе [8]. К аналогичным выводам приводит и проведенное нами изучение влияния постоянного магнитного поля величиной до 4 кЭ, приложенного как касательно к пленке ВТСП, так и нормально к ее поверхности, на зависимости, приведенные на рис. 3, 4. Влияние постоянных магнитных полей на поверхностное сопротивление эпитаксиальных пленок ВТСП в присутствии дополнительного сигнала оказалось аналогичным влиянию этих полей на нелинейный импеданс пленок ВТСП, изученному в работах [4,8].

Кроме описанного выше переключения джозефсоновских слабых связей в новое состояние дополнительным сигналом СВЧ, была сделана попытка такого переключения посредством мощного видеоимпульса. Для этого на одну из пленок ВТСП были нанесены омические контакты, служащие для пропускания через пленку низкочастотных импульсов тока. Длительность импульсов, как и в случае СВЧ сигналов, составляла 2 мкс, амплитуда тока  $\sim 5$  А. Это обеспечивало значение магнитного поля на пленке порядка десяти эрстед, что близко по порядку величины к параметрам, обеспечиваемым с помощью мощного дополнительного сигнала СВЧ. Однако не удалось получить какого-либо заметного влияния дополнительного сигнала на линейные СВЧ свойства пленки даже при параметрах низкочастотных токов, близких к максимальным токам, создаваемым дополнительным СВЧ сигналом. Этот факт также находит объяснение в рамках предложенной модели эпитаксиальной пленки ВТСП. Как указывалось во введении,

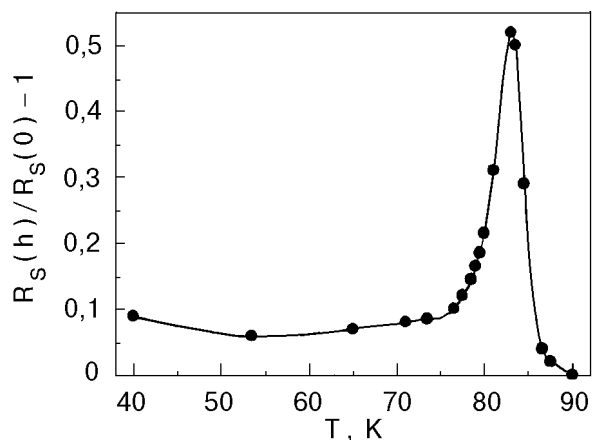


Рис. 4. Температурная зависимость относительного поверхностного сопротивления той же пленки ВТСП, что и на рис. 4, для частоты 8,95 ГГц в присутствии дополнительного сигнала частотой 9,4 ГГц с амплитудой СВЧ магнитного поля  $h = 20$  Э.

напряжение на джозефсоновских контактах определяется величиной шунтирующих индуктивностей и растет пропорционально частоте сигнала; ясно, что частота спектральных компонентов видеоимпульса длительностью 2 мкс существенно меньше частоты дополнительного сигнала СВЧ, которая составляла 9,4 ГГц. Таким образом, подтвержден факт существенной зависимости нелинейных свойств эпитаксиальных пленок ВТСП от частоты сигнала — они тем сильнее, чем выше его частота.

### Выводы

Экспериментально показано, что линейное поверхностное сопротивление эпитаксиальной пленки ВТСП может быть изменено с помощью мощного дополнительного внешнего сигнала СВЧ, отличающегося от слабого измерительного сигнала по частоте и амплитуде. Оказалось, что как линейное поверхностное сопротивление для слабого сигнала в присутствии сильного сигнала, так и нелинейное поверхностное сопротивление для последнего соответствуют друг другу и количественно, и качественно. Причем это соответствие сохраняется и в присутствии постоянных магнитных полей. Влияние дополнительного сигнала на линейное поверхностное сопротивление зависит от частоты дополнительного сигнала и для видеоимпульсов длительностью 2 мкс не было обнаружено.

Причина обнаруженных явлений заключается в том, что эпитаксиальная пленка представляет собой джозефсоновскую среду, состоящую из различного рода джозефсоновских контактов: SNS, мостиковых, туннельных и др. При малых амплитудах поля СВЧ поверхностное сопротивление пленки определяется в основном низкоомными контактами (SNS, мостиковые). При больших амплитудах начинается переход высокоомных контактов в низкоомное состояние и они также начинают вносить свой вклад в поверхностное сопротивление, в результате чего оно начинает увеличиваться. Причем это увеличение будет практически одинаковым как для сильного сигнала, так и для слабого в присутствии сильного, который и в том и в другом случае осуществляет переход джозефсоновской среды в новое состояние. Этот переход зависит от частоты мощного сигнала из-за шунтирования джозефсоновских контактов участками идеального сверхпроводника, на которых падение напряжения зависит от частоты,

и чем больше частота, тем легче будут достигаться потенциалы, необходимые для переключения туннельных контактов.

1. N. Newman and W. G. Lyons, *J. Supercond.* **6**, 119 (1993).
2. P. P. Nguyen, D. E. Oates, G. Dresselhaus, and M. S. Dresselhaus, *Phys. Rev.* **B43**, 6400 (1993).
3. G. Liang, D. Zhang, C. Shih, M. E. Johansson et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **5**, 2656 (1995).
4. Г. А. Мелков, В. Ю. Малышев, А. В. Багада, *ФНТ* **21**, 1192 (1995).
5. S. S. Laderman, R. C. Taber, R. D. Jacowitz, V. J. L. Moll, C. B. Eom, T. L. Hylton, A. F. Marshall, T. H. Feballe, and M. R. Beasley, *Phys. Rev.* **43**, 2922 (1991).
6. К. К. Лихарев, *Введение в динамику джозефсоновских переходов*, Наука, Москва (1985).
7. O. D. Pustylnik, A. A. Dymnikov, I. V. Voinovsky, O. A. Khimenko, and V. F. Vratskikh, *Proc. SPIE — The International Society for Optical Engineering*, v. **2104**, *Eighteenth International Conference on Infrared and Millimeter Waves*, Colchester, UK (1993).
8. Г. А. Мелков, А. Л. Касаткин, В. Ю. Малышев, *ФНТ* **20**, 868 (1994).
9. М. Е. Ильченко, Е. В. Кудинов, *Ферритовые диэлектрические резонаторы СВЧ*, Изд-во КГУ, Киев (1973).
10. Э. Л. Гинзтон, *Измерения на сантиметровых волнах*, Изд-во иностр. лит., Москва (1960).

### Nonlinear microwave properties of epitaxial HTSC films

G. A. Melkov, V. Yu. Malyshev, and S. K. Korsak

Surface resistance  $R_s$  of epitaxial HTSC films of  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  on sapphire at the frequency 8.95 GHz is measured in the presence of a powerful additional 9.4 GHz signal ensuring the amplitude of ac magnetic field on a film up to 20 Oe. It is found that the surface resistance of a HTSC film increases with increasing the additional signal amplitude. Moreover, the magnitude of  $R_s$  of a HTSC film is practically equal to the value of nonlinear surface resistance of the film with the same amplitude of ac magnetic field. That is the surface resistances of a film for a weak signal in the presence of a powerful additional signal and for a powerful signal are close to each other. An explanation of the phenomena observed is proposed which is based on the idea that a HTSC film is a Josephson medium, containing various types of Josephson junctions. Under the influence of a powerful microwave signal, the properties of this medium may change because of the switching of a part of the junctions, resulting in the transition of the medium to a new state which manifests itself equally both for weak and for powerful signals.