

05.4;09;12

## Высокодобротный перестраиваемый сверхпроводящий контур ВЧ диапазона

© Е.А. Вopilкин, А.Е. Парафин, С.А. Павлов,  
Л.И. Пономарев, А.Ю. Ганицев, А.С. Жуков,  
В.В. Владимиров, А.Г. Летаго, В.В. Паршиков

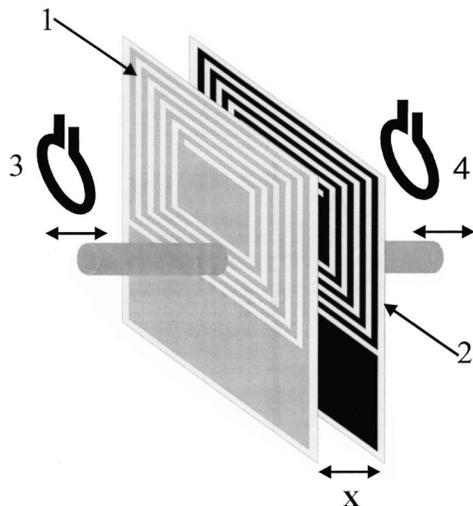
Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород  
E-mail: vorilkin@ipm.sci-nnov.ru

Поступило в Редакцию 13 марта 2001 г.

Рассмотрена возможность создания высокодобротного ( $Q \sim 10^5$ ) механически перестраиваемого в широкой полосе частот колебательного контура ВЧ диапазона. Перестраиваемый контур состоит из двух одиночных контуров, изготовленных на пленках YBaCuO. При изготовлении одиночных контуров рассмотрена возможность использования подложек алюмината лантана, галата неодима и титаната стронция.

Высокое качество устройств на основе ВТСП пленок определяется малой величиной их поверхностного сопротивления ( $R_s$ ) [1–2]. Резонаторы, фильтры и другие приборы, изготовленные на пленках YBaCuO, как правило, применяются в гигагерцевом диапазоне [3]. В области более низких частот — ВЧ диапазоне также существует потребность в высокодобротных фильтрах [4,5]. В [6] представлены перестраиваемые контуры с резонансными частотами от 5 до 35 МГц, изготовленные на подложках алюмината лантана. Добротность контуров составляла около 16 000. В [7] рассмотрены резонатор на частоту 24.5 МГц с добротностью 40 000 и фильтр из трех таких резонаторов. В качестве подложек также использовался алюминат лантана.

При изготовлении одиночных контуров нами рассмотрены три вида подложек: LaAlO, GaNdO и SrTiO. Пленки YBaCuO наносились методом лазерного напыления [8] и имели типичные параметры: толщина  $d \sim 150$  nm, температура перехода  $T_c \geq 88$  K, плотность критического тока  $j_c \sim 1$  MA/cm<sup>2</sup> (на коротких мостах). Рисунок по ВТСП пленке создавался методом фотолитографии, травление пленки проводилось в 1%-ном растворе фосфорной кислоты.



**Рис. 1.** Перестраиваемый контур: 1, 2 — подложки с пленками, 3, 4 — петли связи, X — расстояние между пленками.

На рис. 1 видна топология катушки индуктивности и емкостных площадок, образующих одиночный контур. Число витков в плоской катушке индуктивности — 20, на фотошаблоне ширина сверхпроводящего полоска катушки составляет  $60\ \mu\text{m}$ , ширина зазора между полосками  $40\ \mu\text{m}$ . Размеры емкостных площадок  $4.6 \times 4.6$  и  $5 \times 8.6\ \text{mm}$ . При травлении рисунка уход размеров составлял  $2\text{--}5\ \mu\text{m}$  на сторону.

Перестраиваемый контур (рис. 1) состоит из двух подложек, на поверхности которых, обращенных одна к другой, нанесены одиночные контуры. Частота контура перестраивается за счет изменения расстояния X (емкости) между подложками. Минимальное расстояние, на которое можно сдвинуть одиночные контуры, определяется точностью установки подложек и кривизной их поверхности.

Измерения характеристик контуров проводились на анализаторе спектра СК4-59. Связь с контуром осуществлялась петлями связи. Меняя местоположение петель связи и их ориентацию, можно изменять коэффициент связи с контуром. Коэффициент передачи с передающей на приемную петли связи во всем диапазоне перестройки поддерживался

Тип подложки	$f_p$ , MHz	$\Delta f_p$ , kHz	$Q$
LaAlO	68.6	5	$1.4 \cdot 10^4$
GaNdO	67.1	0.75	$89.5 \cdot 10^4$
SrTiO	8.4	3	$2.8 \cdot 10^4$

на уровне 20 dB. Мощность генератора, нагруженного на передающую петлю связи, составляла 50 dBmW.

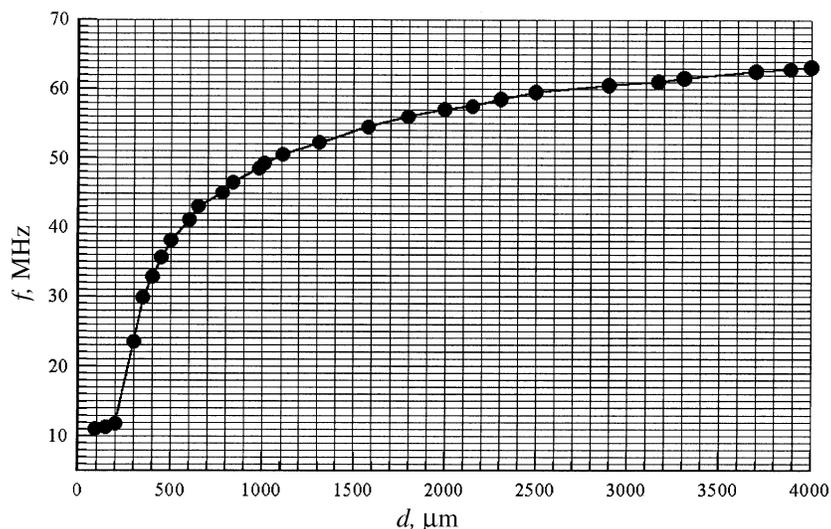
В таблице приведены результаты измерений резонансных частот и ненагруженных добротностей одиночных контуров, изготовленных на различных подложках. Очевидно, что величины резонансной частоты и ненагруженной добротности существенно зависят от диэлектрической проницаемости и тангенса потерь материала подложки. Различие в добротностях контуров на подложках алюмината лантана: около 15 000 в [6] и в нашей работе и 40 000 в [7], вероятно, связано с технологией изготовления подложек.

Измеренная индуктивность у одиночных контуров составила около  $3.5 \mu\text{H}$ , таким образом, собственная емкость одиночного контура на подложках алюмината лантана и галата неодима составляет около 1.5 pF.

Для получения перестраиваемого контура были взяты одиночные контуры, изготовленные на подложках галата неодима, их параметры аналогичны приведенным в таблице. Во время измерений подложки, погруженные в жидкий азот, были приморожены к кварцевым держателям. Расстояние между держателями изменялось микрометрическим винтом и измерялось прибором "Микрон 1" с точностью до одного микрона.

На рис. 2 показан график экспериментальной зависимости резонансной частоты  $f_p$  перестраиваемого контура от расстояния  $X$  между одиночными контурами. Максимальная частота равна 63 MHz, минимальная 12 MHz и соответствует касанию подложек.

При уменьшении частоты быстро растет скорость перестройки. Можно оценить скорость перестройки частоты, если считать, что она в основном определяется изменением емкости между емкостными площадками одиночных контуров ( $C \sim 1/X$ ). Максимальная частота перестраиваемого контура близка к частоте одиночного контура, поэтому можно считать, что при максимальном расстоянии между подложками емкость конденсаторов, образованных емкостными площадками, много меньше собственной емкости одиночных контуров. На частоте, равной



**Рис. 2.** Зависимость резонансной частоты перестраиваемого контура от расстояния между пластинами.

половине максимальной, производную можно оценить по формуле:  $df/dX \approx (0.6f_{\text{max}}C_0)/(\varepsilon\varepsilon_0S)$ , где  $C_0$  — собственная емкость одиночного контура;  $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость жидкого азота;  $S$  — эффективная площадь последовательно включенных емкостей, образованных центральными и боковыми площадками одиночных контуров. Такая оценка дает величину около  $30 \text{ Hz}/\text{\AA}$ . Экспериментально полученное значение скорости изменения емкости составляет около  $10 \text{ Hz}/\text{\AA}$ . Тем не менее скорость изменения частоты очень велика и при построении перестраиваемого фильтра потребуются очень точная механика для перемещения подложек.

Механические колебания в нашей системе затрудняли измерение добротности при малых расстояниях между подложками. Для определения добротности на низкой частоте был собран перестраиваемый составной контур, состоящий из двух одиночных контуров, разделенных чистой подложкой из NdGaO толщиной  $d = 0.5 \text{ mm}$ . Добротность контура составила 68 000 на резонансной частоте 6.88 МГц.

## Список литературы

- [1] Thomson F.S., Mansour R.R., Ye S. et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 1998. V. 8. N 2. P. 85–93.
- [2] Rolfes M. // Superconductor Industry. Winter 1995. P. 24–30.
- [3] Liang G.-C., Zhang D., Shih C.-F. et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 1995. V. 5. N 2. P. 2652–2655.
- [4] Пономарев Л.И., Ганицев А.Ю., Паришиков В.В. и др. // Антенны. 2000. № 3.
- [5] Пономарев Л.И., Ганицев А.Ю. // Антенны. 1998. № 1(40).
- [6] Withers R.S., Liang G.-C., Cole B.F. et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 1993. V. 3. N 1. P. 2450–2453.
- [7] Erzhen Gao, Shapur Sahba, Hui Xu et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 1998. V. 9. N 2. P. 3066–3069.
- [8] Вopilкин Е.А., Павлов С.А., Панин А.Н. и др. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. В. 8. С. 83–87.