

05:09

Добротность LC-контуров мегагерцового диапазона на основе тонких пленок высокотемпературного сверхпроводника Y–Ba–Cu–O

© Д.В. Мастеров, С.А. Павлов, А.Е. Парафин

Институт физики микроструктур РАН,
603950 Нижний Новгород, Россия
e-mail: SVG@ipm.sci-nnov.ru

(Поступило в Редакцию 6 июля 2007 г.)

Экспериментально исследованы высокочастотные свойства резонансных структур на основе тонких пленок высокотемпературного сверхпроводника $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ в диапазоне частот 30–100 МГц. Резонансные структуры представляют собой планарные катушки индуктивности с собственной емкостью, изготовленные на подложках галата неодима и алюмината лантана. При температуре 77 К на частоте 40 МГц получены значения собственной добротности контура выше $2 \cdot 10^5$. Рассмотрены возможные физические механизмы потерь, определяющие добротность сверхпроводниковых резонансных структур в мегагерцовом диапазоне.

PACS: 74.78.Bz, 85.25.-j.

Введение

Определение причин, ограничивающих добротность колебательных контуров, изготовленных на основе тонких пленок $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO) в диапазонах ВЧ и ОВЧ (3–30 и 30–300 МГц), является нерешенной задачей и представляет научный и практический интерес. В отличие от СВЧ-диапазона, которому посвящено огромное количество работ по исследованию и применению высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) (см., например, обзор [1]), статей, посвященных ВТСП резонансным контурам ВЧ- и ОВЧ-диапазонов, существенно меньше. В разное время несколько ведущих зарубежных групп опубликовали результаты исследований ВТСП резонансных структур в мегагерцовом частотном диапазоне. Эти исследования были направлены на изучение высокочастотных свойств и применение высокотемпературных сверхпроводников в системах связи [2–5] и магнитно-резонансной томографии [6–8]. Экспериментально полученные в этих группах значения собственной добротности находятся в интервале от 10^4 до $4 \cdot 10^4$, тогда как ожидаемая добротность приводимых структур, связанная с оценкой потерь в ВТСП, дает величину более 10^6 , т. е. почти на два порядка превышает экспериментально полученные значения. Данная оценка добротности получена экстраполяцией величины поверхностного сопротивления пленки YBCO $R_S = 1 \text{ m}\Omega$ на частоте $f = 10 \text{ GHz}$ при температуре $T = 77 \text{ K}$ по закону $R_S \sim f^2$. Анализ приведенных выше работ показывает, что до сих пор не определены механизмы потерь, отвечающие за такое резкое различие между расчетными и экспериментальными значениями добротности. Поскольку уровень технологии указанных групп не вызывает сомнений, можно предположить, что в мегагерцовом частотном диапазоне существуют специфические виды потерь, влияние которых в СВЧ-диапазоне мало.

В данной работе предпринята попытка выявить возможные факторы, определяющие добротность колеба-

тельных ВТСП контуров на низких частотах. С этой целью была изготовлена серия идентичных структур, представляющих собой планарные катушки индуктивности, и проведены измерения их добротности. На структурах с высокой исходной добротностью последовательно удалялись внутренние витки, на каждом этапе измерялась добротность, при этом резонансная частота получаемых структур изменялась в диапазоне 40–90 МГц.

Экспериментальная часть

Топология ВТСП резонансных структур мегагерцового диапазона

Пленки высокотемпературного сверхпроводника YBCO для формирования высокочастотных резонансных структур были изготовлены методами лазерного и магнетронного напыления на подложках галата неодима и алюмината лантана. Основные статические параметры пленок измерялись на „свидетелях“ и имели следующие типичные значения: толщина 150–200 нм, величина полуширины кривой качания ($\text{FWHM}\omega$) рентгеновского отражения YBCO (005), характеризующая разориентацию блоков мозаики в направлении оси c , $\Delta\omega < 0.5^\circ$, температура нуля сопротивления $T_c \geq 88 \text{ K}$, отношение сопротивления при температуре $T = 300 \text{ K}$ к сопротивлению при $T = 100 \text{ K}$ $\gamma \approx 3$, плотность критического тока, измеряемого на мостиках шириной $50 \mu\text{m}$ при $T = 77 \text{ K}$, составляла более 1 MA/cm^2 .

Рисунок LC-контуров (планарная катушка индуктивности с собственной емкостью) изготавливался жидкостным химическим травлением. Топология планарной индуктивности показана на рис. 1. Внешний размер структуры — 14 мм, число витков планарной катушки индуктивности — 40, ширина ВТСП полоска на фотшаблоне — $60 \mu\text{m}$, расстояние между полосками — $40 \mu\text{m}$, шаг „намотки“ — $100 \mu\text{m}$. Длина полоска данной структуры составляет 1.3 м. Данная структура

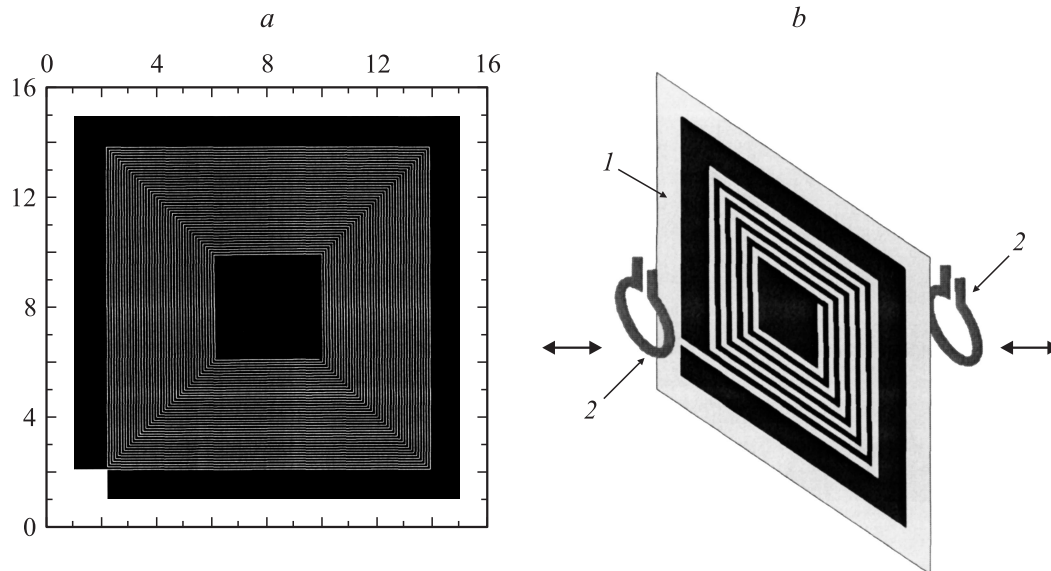


Рис. 1. Топология планарной индуктивности (*a*) и резонансный контур с элементами связи (*b*): 1 — планарная ВТСП индуктивность с собственной емкостью, 2 — индуктивные катушки связи. Размеры указаны в миллиметрах.

разрабатывалась для использования в перестраиваемом контуре [9], поэтому кроме планарной индуктивности здесь присутствуют (внешняя — шириной 1 mm и внутренняя — размером 4×4 mm) емкостные обкладки.

Методика измерения добротности контуров мегагерцового диапазона

Добротность ВТСП контуров определялась из измерений амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) фильтра, представляющего исследуемую структуру с элементами связи, как показано на рис. 1. Связь с контуром осуществлялась по магнитному полю петлями связи. Измерения АЧХ проводились на анализаторе спектра СК4-59 в линейном режиме ВТСП контура при уровне входного сигнала -50 dB. Величина нагруженной добротности Q_L определялась по ширине резонансной кривой, измеренной по уровню -3 dB. Коэффициент передачи определялся как отношение амплитуды сигнала, прошедшего через фильтр, на резонансной частоте к амплитуде входного сигнала.

Определение значения собственной добротности Q_0 из величины нагруженной добротности Q_L при известном коэффициенте передачи по напряжению K_U возможно только при симметричной связи контура с входным и выходным элементами. В этом случае собственная добротность определяется по следующей формуле:

$$Q_0 = Q_L / (1 - K_U). \quad (1)$$

При несимметричной связи формула (1) дает заниженное значение собственной добротности. Поэтому обычно проводят измерения при низком коэффициенте передачи, когда обе связи очень слабые, и считают измеренную добротность собственной. При большом уровне

сигнала ВТСП контур будет работать в нелинейном режиме, и если петли связаны с контуром по-разному, коэффициент передачи будет зависеть от направления передачи сигнала. Таким образом, появляется возможность установления симметричных связей. Для этого контур вводится в нелинейный режим, и петли связи устанавливаются так, чтобы АЧХ контура не менялась при смене приемной и передающей петель.

Измерения, как правило, проводились при коэффициенте передачи на резонансной частоте $K_U = -6$ dB. При высоких значениях добротности с целью повышения точности измерения ширины полосы резонансной кривой коэффициент передачи увеличивали таким образом, чтобы ширина резонансной кривой была $\Delta f \approx 0.5$ kHz. Погрешность определения собственной добротности составляла 30%.

Результаты и их обсуждение

Гистограмма измерения серии контуров, изготовленных на подложках галата неодима, приведена на рис. 2. Значения резонансной частоты контуров находятся в интервале 34–38 MHz. Разброс резонансных частот связан с разной толщиной используемых подложек. По вертикальной оси отложено количество контуров, добротность которых попадает в соответствующий интервал, а по горизонтальной — величина добротности. Общее количество измеренных контуров — 54. Как видно из приведенной гистограммы, величина добротности полученных структур меняется в широких пределах. Максимальное значение добротности, полученное в данной серии контуров, составляет $2 \cdot 10^5$.

На двух контурах, изготовленных на подложке галата неодима, с высокой исходной добротностью $2 \cdot 10^5$

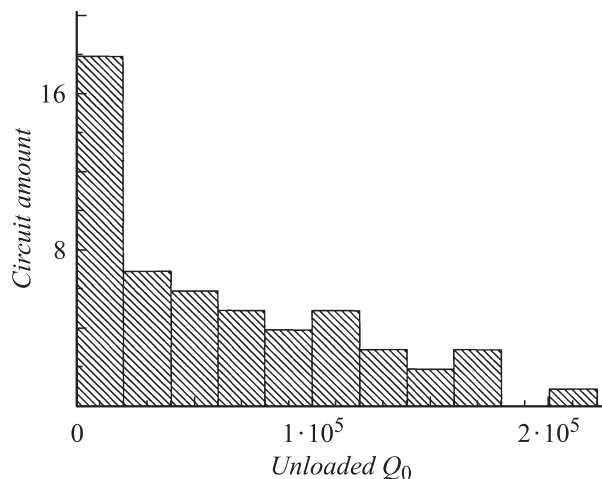


Рис. 2. Значения собственной добротности контуров, изготовленных на подложках из галата неодима. Резонансная частота контуров 34 МГц.

и $1.5 \cdot 10^5$ последовательно вытравливалась часть внутренних витков планарной катушки индуктивности. Таким образом, структура, получаемая в результате очередного травления, представляет собой часть контура, изображенного на рис. 1, у которого удалены внутренние витки. На каждом этапе проводилось измерение добротности, коэффициента передачи и резонансной частоты. Собственная добротность контура вычислялась по формуле (1). Измерения собственной добротности и резонансной частоты структур, полученные при последовательном удалении витков, представлены на рис. 3. Первоначальное количество витков планарной катушки индуктивности — 40, два значения добротности при исходном количестве витков соответствуют структуре с

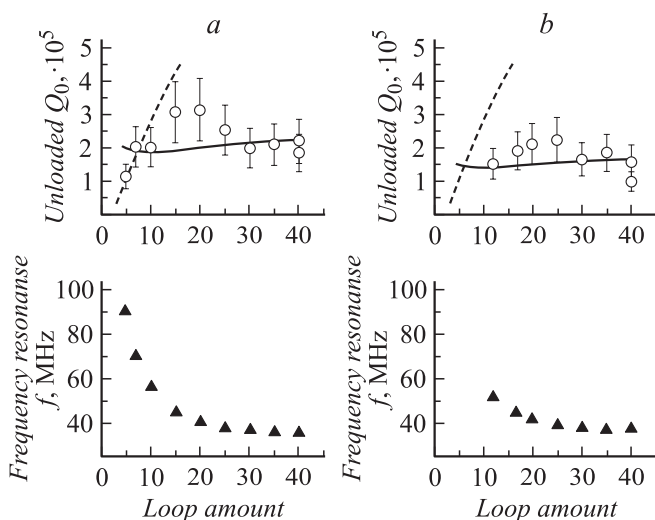


Рис. 3. Значения величины собственной добротности и резонансной частоты двух структур (*a* и *b*) на подложках из галата неодима, полученных последовательным удалением витков. Первоначальное количество витков в структуре — 40.

внутренней емкостной площадкой и без нее. Удаление емкостной площадки приводит к увеличению добротности, резонансная частота при этом изменяется слабо. Возрастание добротности может быть связано с увеличением области, занимаемой магнитным полем, что приводит к увеличению запасенной энергии.

Приведенные зависимости добротности от числа витков могут быть связаны как с геометрией структуры — соотношением между индуктивностью системы и длиной сверхпроводящего полоска, так и с какими-либо физическими механизмами. Поэтому оценим величину добротности рассматриваемой структуры и ее изменение при удалении внутренних витков при двух различных механизмах потерь. При оценке пренебрежем потерями в подложке, радиационными потерями и неоднородным распределением тока по длине сверхпроводящего полоска. Собственная добротность LC-контура определяется формулой

$$Q_0 = \omega L / r, \quad (2)$$

где $\omega = 2\pi f$, f — резонансная частота, L — индуктивность соответствующей планарной катушки, r — сопротивление полоска. Индуктивность определим по формуле для круглой планарной катушки [10,11]:

$$L[nH] = N^2 \frac{5(D_{\max} + D_{\min})^2}{15D_{\max} - 7D_{\min}}, \quad (3)$$

где N — число витков катушки индуктивности. В качестве наружного D_{\max} и внутреннего D_{\min} диаметров примем внешний и внутренний размеры планарной индуктивности, получаемой в результате травления [11]. Размеры в мм, значение индуктивности в нН.

Сопротивление полоска оценим по формуле

$$r = k \frac{l}{w} R_S, \quad (4)$$

где l — длина сверхпроводящего полоска структуры, w — ширина полоска, R_S — поверхностное сопротивление сверхпроводящей пленки, пересчитанное с частоты 10 GHz на частоту измерения по зависимости ω^2 , k — поправка, связанная с неоднородным распределением тока в поперечном сечении полоска. Учет неоднородного распределения тока в поперечном сечении полоска [12] при ширине полоска $60 \mu\text{m}$, толщине пленки $0.2 \mu\text{m}$ и лондоновской глубине проникновения $0.2 \mu\text{m}$ [13] увеличивает погонное сопротивление полоска в 3 раза по сравнению со случаем однородного распределения тока. В результате такой оценки при поверхностном сопротивлении пленки, равном $1 \text{ m}\Omega$, на 10 GHz при 77 K [13] величина добротности исходной структуры, включающей 40 витков, должна составлять $4 \cdot 10^6$, а при последовательном удалении витков добротность должна уменьшаться до $3 \cdot 10^5$ при пяти оставшихся витках. Измеренные величины добротности составляют $2 \cdot 10^5$ при 40 витках и $1 \cdot 10^5$ — при 5 витках, что ниже расчетных значений соответственно в двадцать и в три раза. На рис. 3 пунктиром

показана зависимость добротности контура от числа витков, вычисленная по формуле (2) в предположении, что сопротивление полоска пропорционально ω^2 . Данная кривая совмещена с левой (высокочастотной) частью экспериментальной зависимости (рис. 3, а). Для иллюстрации эта же зависимость приведена на рис. 3, б. Сплошной линией показаны зависимости, вычисленные по формуле (2) в предположении, что сопротивление полоска не зависит от частоты. Такое не зависящее от частоты поведение сопротивления полоска может быть обусловлено потерями, возникающими при колебании замороженных вихрей в среде с вязким трением [14]. Кривые совмещены с правыми (низкочастотными) частями экспериментальных зависимостей. Таким образом, сравнение экспериментальных данных и приведенных оценок показывает, что на низких частотах в структурах ВТСП может доминировать вихревой механизм потерь, а при повышении частоты становится доминирующим вклад потерь на нормальных носителях. Именно поэтому экстраполяция потерь из СВЧ-диапазона в мегагерцовый диапазон дает заниженное значение потерь.

Кроме контуров на подложках из галата неодима было изготовлено несколько структур на алюминате лантана. Максимальное значение собственной добротности, полученное на таких структурах, составило $1.5 \cdot 10^5$ на частоте 39 МГц.

Благодаря высокой диэлектрической проницаемости галата неодима ($\epsilon = 23$ [15]) и алюмината лантана ($\epsilon = 23.6$ [16]) можно считать, что практически вся энергия электрического поля в рассматриваемых структурах запасена в подложке. Следовательно, полученные значения собственной добротности $(2-3) \cdot 10^5$ на галате неодима и $1.5 \cdot 10^5$ на алюминате лантана дают оценку сверху тангенса диэлектрических потерь $\text{tg } \delta \sim 5 \cdot 10^{-6}$ для галата неодима, и $\text{tg } \delta \sim 7 \cdot 10^{-6}$ для алюмината лантана в мегагерцовом диапазоне при температуре 77 К.

Заключение

В настоящей работе показано, что в мегагерцовом диапазоне могут быть достигнуты величины собственной добротности резонансного контура на основе высокотемпературного сверхпроводника YBCO более $2 \cdot 10^5$ (частота 40 МГц, температура 77 К).

Показано, что аномальная зависимость потерь от частоты в резонансных контурах мегагерцового диапазона может быть вызвана колебаниями вихрей в среде с вязким трением.

Полученные максимальные значения собственной добротности YBCO контуров на галате неодима $(2-3) \cdot 10^5$ и алюминате лантана $1.5 \cdot 10^5$ дают оценку сверху тангенса диэлектрических потерь $\text{tg } \delta \sim 5 \cdot 10^{-6}$ — для галата неодима, и $\text{tg } \delta \sim 7 \cdot 10^{-6}$ — для алюмината лантана в мегагерцовом диапазоне при температуре 77 К.

Список литературы

- [1] Mansour R.R. // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techn. 2002. Vol. 50. N 3. P. 750.
- [2] Мухортов В.М., Следков В.А., Мухортов В.М. // Микросистемная техника. 2002. № 8. С. 20.
- [3] Мухортов В.М., Следков В.А., Мухортов В.М. // Микросистемная техника. 2002. № 9. С. 11.
- [4] Gao E.A. // IEEE Trans. on Appl. Superconduct. 1999. Vol. 9. N 2. P. 3066.
- [5] Xu H., Gao E., Ma Q.Y. // IEEE Trans. on Appl. Superconduct. 2001. Vol. 11. N 1. P. 353.
- [6] Withers R.S., Liang G.-C., Cole B.F. et al. // IEEE Trans. on Appl. Superconduct. 1993. Vol. 3. N 1. P. 2450.
- [7] Bracanovic D., Esmail A.A., Penn S.J. et al. // IEEE Trans. on Appl. Superconduct. 2001. Vol. 11. N 1. P. 2422.
- [8] Ginefri J.-K., Darrasse L., Crozat P. // IEEE Trans. on Appl. Superconduct. 2001. Vol. 9. N 4. P. 4695.
- [9] Волгунов Д.Г., Вопилкин Е.А., Парафин А.Е. и др. // Микросистемная техника. 2002. № 7. С. 3.
- [10] Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств / Под ред. В.И. Вольмана. М.: Радио и связь, 1982.
- [11] Калатаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей. Л.: Энергоатомиздат, 1986.
- [12] Вендик О.Г., Попов А.Ю. // ЖТФ. 1993. Т. 63. Вып. 7. С. 1.
- [13] Варганов А.В., Вопилкин Е.А., Вышеславцев П.П. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1996. Т. 63. Вып. 8. С. 608.
- [14] Шмидт В.В. Введение в физику сверхпроводников. М.: Наука, 1982.
- [15] Hollman E.K., Vendik O.G., Zaitsev A.G. et al. // Superconduct. Sci. and Techn. 1994. Vol. 7. P. 609.
- [16] Zuccaro C., Winter M., Klein N. et al. // J. Appl. Phys. 1997. Vol. 82. N 11. P. 5695.