

05.4

Влияние циклических отжигов на статические и высокочастотные характеристики структур на основе пленок Y–Ba–Cu–O

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

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

Поступило в Редакцию 24 сентября 2007 г.

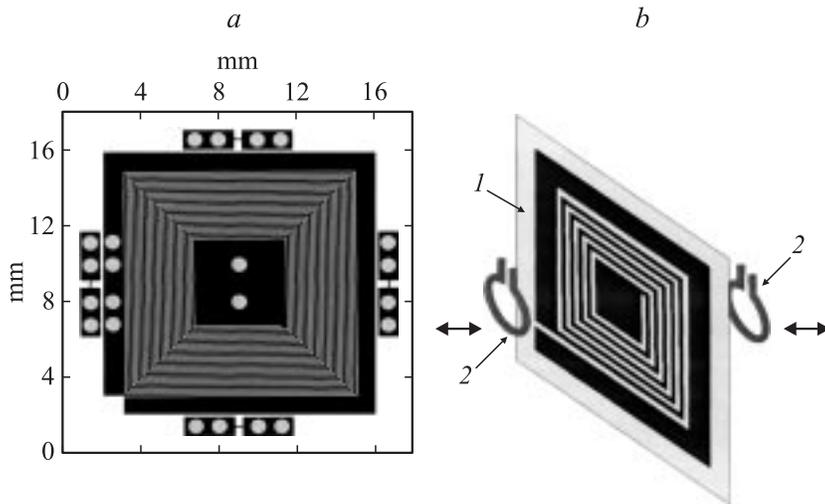
Исследуются корреляции между статическими параметрами и добротностью резонансных контуров мегагерцового диапазона. Контуров представляют собой планарные катушки индуктивности с собственной емкостью, изготавливаемые на основе тонких пленок высокотемпературного сверхпроводника Y–Ba–Cu–O. Показано, что статические характеристики исследуемого контура обратимо изменяются при циклических отжигках, в то время как добротность контура этим свойством не обладает.

PACS: 74.78.Bz, 74.25.Nf

Низкое поверхностное сопротивление R_{eff} пленок высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП) $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (YBCO) делает перспективным их применение в приборах ВЧ- и СВЧ-диапазона. Резонансные контуры ВЧ-диапазона представляют собой планарные катушки индуктивности с межвитковой емкостью (см. рисунок, *a*). При анализе работ, посвященных применению резонансных YBCO контуров в ВЧ-диапазоне, обращает на себя внимание факт, что часто используемая для СВЧ-диапазона квадратичная зависимость поверхностного сопротивления ВТСП-пленки от частоты тока $R_{eff} \sim \omega^2$, по-видимому, не является верной в ВЧ-диапазоне, поскольку экспериментальные значения собственной добротности контуров значительно ниже ожидаемых согласно оценке по этой зависимости (см., например, работы [1,2]).

Оценку собственной добротности резонансного ВТСП-контура можно провести по формуле

$$Q_0 = \omega L/R, \quad (1)$$



Топология планарной индуктивности (a) и резонансный контур с элементами связи (b): 1 — планарная ВТСП индуктивность с собственной емкостью; 2 — индуктивные катушки связи.

где $\omega = 2\pi f$, f — резонансная частота, L — индуктивность структуры, R — сопротивление ВТСП полоска, которое определим по формуле

$$R = (l/w)R_{eff}. \quad (2)$$

Здесь l — длина полоска; w — ширина полоска; R_{eff} — эффективное поверхностное сопротивление на резонансной частоте контура. Если исходить из значения поверхностного сопротивления $R_{eff} = 1 \text{ m}\Omega$ на частоте $f = 10 \text{ GHz}$ и воспользоваться зависимостью $R_{eff} \sim \omega^2$, то добротность контуров мегагерцового диапазона должна иметь величину $Q_0 > 10^6$. В то же время в известных нам работах ведущих зарубежных групп [1–4] для ВЧ-диапазона приводятся максимальные значения $Q_0 \sim 40\,000$.

Авторами настоящей статьи была исследована большая серия LC-контуров мегагерцового диапазона на основе тонких пленок высокотемпературного сверхпроводника Y–Ba–Cu–O в диапазоне частот 30–100 МГц. Показано, в частности, что в мегагерцовом диапазоне могут быть достигнуты величины собственной добротности резонансного контура как минимум $2 \cdot 10^5$ (на частоте $f = 40 \text{ MHz}$ при температуре

$T = 77$ К). Вместе с тем при практически идентичных статических электрических характеристиках YBCO-структур их добротности в ВЧ-диапазоне могут различаться на порядки.

Известно, что основные электрические характеристики YBCO-пленок могут существенно меняться в результате отжигов, в том числе низкотемпературных, т.е. проводимых при температурах существенно ниже ростовых (см., например, работу [5]). Подобные воздействия изменяют концентрацию кислорода в пленках в широких пределах и, как правило, являются обратимыми. В настоящей работе было проведено исследование корреляций статических и высокочастотных характеристик резонансных ВЧ-контуров на основе YBCO-пленок при различных режимах отжига. Пленки были получены на подложках NdGaO₃ методом магнетронного напыления на постоянном токе. Детали процесса напыления изложены в работе [6].

Исследуемые контуры (см. рисунок, *a*) имеют следующие параметры: длина полоска ВТСП 64 см, ширина полоска 145 μm , межвитковое расстояние 40 μm , число витков 20, индуктивность 3.5 μH , резонансная частота вблизи 70 МГц. По периметру катушек расположены четыре тестовых мостика для контроля однородности качества пленки, ширина мостиков 60 μm , длина — 400 μm .

Для исследования влияния отжигов была выбрана структура № 6-04, собственная добротность которой в исходном состоянии составляла $Q_0 = 55\,000$. На пленках-свидетелях, выращенных в тех же условиях, что и структура № 6-04, было измерено эффективное поверхностное сопротивление, его величина составила $R_{eff}(10\text{ GHz}, 77\text{ K}) \leq 2.7\text{ m}\Omega$ (толщина пленок 0.1 μm). Если бы выполнялась зависимость $R_{eff} \sim \omega^2$, то в предположении, что в мегагерцовом диапазоне доминируют омические потери, на частоте 70 МГц собственная добротность контура должна была иметь величину $Q_0 \approx 3 \cdot 10^6$.

Экспериментальное определение добротности проводилось посредством измерения АЧХ фильтра, состоящего из исследуемого контура и элементов связи. Связь с контуром осуществлялась по магнитному полю (см. рисунок, *b*). Собственная добротность контура в случае симметричной связи определяется выражением

$$Q_0 = Q_L / (1 - K_U), \quad (3)$$

где Q_0 и Q_L — собственная и нагруженная добротности, K_U — коэффициент передачи по напряжению на резонансной частоте.

Изменение характеристик структуры № 6-04 в результате отжигов

Технологическая операция	f_{res} , MHz	Q_0	T_c , К	γ	ρ_{100K} , $\mu\Omega \cdot cm$	I_c , mA	J_c , MA/cm ²
Получение рисунка	70.4	55000					
Отжиг в кислороде $T_a = 700^\circ C$	70.4	6100	88.8	3	110	177	1.5
Отжиг в вакууме $T_a = 180^\circ C$	70.4	2300	88.0	2.8	150	17	0.15
Отжиг в кислороде $T_a = 700^\circ C$	70.4	4200	87.2	3.1	93	195	1.65
Сужение полоска	67.5*	2000	88.8			40	

* Изменение частоты контура связано с увеличением индуктивности структуры, т.к. при уменьшении области подложки, занимаемой сверхпроводником, возрастает область, занимаемая магнитным полем.

Сразу после получения рисунка структуры было проведено измерение исходной добротности контура. Затем была проведена серия технологических операций в следующей последовательности: термическое напыление контактов из серебра и отжиг в атмосфере кислорода при температуре $T_a = 700^\circ C$; низкотемпературный (обескислороживающий) отжиг в вакууме $T_a = 180^\circ C$; восстанавливающий отжиг в атмосфере кислорода при температуре $T_a = 700^\circ C$. После каждого отжига проводились измерения статических и ВЧ-характеристик контура. Результаты измерений представлены в таблице. Статические характеристики полоска катушки были близки к характеристикам контрольных мостов во всех измерениях, что свидетельствует об однородности свойств полоска.

Как видно из таблицы, проведенные отжиги позволяют в широких пределах менять: критический ток I_c полоска, удельное сопротивление ρ и отношение сопротивления пленки при температуре 300 К к сопротивлению при 100 К $\gamma = R(300 K)/R(100 K)$, собственную добротность контура. В отличие от статических характеристик, обратимо меняющихся при циклических отжигах, добротность в данном образце

уже после первого отжига стала очень низкой и далее не восстанавливалась. Следует отметить, что статические характеристики образца весьма высокие. Можно утверждать, что собственная добротность контура № 6-04 на всех этапах исследования определялась потерями в полоске планарной катушки индуктивности, поскольку материал подложки, рисунок контура, а также конструкция измерительной установки были такими же, как в случае контуров с добротностью $Q_0 > 2 \cdot 10^5$.

Результаты измерений показывают, что сопротивление полоска на постоянном токе не более $10^{-4} - 10^{-5} \Omega$, так как чувствительность по напряжению при измерении критического тока составляла $2.5 \mu V$. Следовательно, если в полоске и присутствуют последовательно включенные участки нормальной фазы, их сопротивление дает очень малый вклад в потери. В соответствии с формулой (1) добротность, определяемая сопротивлением такой величины, должна быть более 10^7 .

Источником дополнительных потерь в ВЧ-диапазоне может являться край ВТСП-полоска, поврежденный в результате взаимодействия с травителем при изготовлении контура. Наличие такой области шириной порядка $1 \mu m$ на краю полосковой структуры подтверждается данными зондовой микроскопии [7]. Расчет потерь в поврежденной области дает малую поправку в единицы процентов к омическому сопротивлению полоска. Данная оценка выполнена в предположении, что электрическое поле в поврежденной области равно напряженности поля на краю сверхпроводящего полоска, рассчитанной с учетом неоднородного поперечного распределения тока в полоске [8]. При этом считается, что поврежденная область имеет удельное сопротивление, равное удельному сопротивлению YBCO-пленки при 100 К $\rho_{100 K} \approx 100 \mu \Omega \cdot cm$.

Поскольку влияние отжигов на свойства края полоска непредсказуемо, на структуре № 6-04 было проведено его „обновление“. Для этого были последовательно сделаны две литографии со сдвигом фотошаблона по диагонали рисунка. В таблице не приведены удельные характеристики полоска после операции „обновления“ края, т.к. ширина полоска получилась неравномерной. Видно, однако, что величина критического тока осталась высокой и, следовательно, разрывов полоска и/или нормальных включений, перекрывающих его по всей ширине, нет. Добротность после „обновления“ края не возросла, более того — стала ниже. Таким образом, наличие нормальной области на краю сверхпроводящего полоска не объясняет экспериментальных значений добротности.

Дальнейшее снижение добротности при „обновлении“ края, возможно, связано с потерей YBCO-пленкой кислорода при сушке фоторезиста. Сушка фоторезиста, как и напыление на пленку контактов путем термического испарения, может рассматриваться как очень мягкий отжиг, который может привести к некоторому обескислороживанию пленки. Можно предполагать, что эффективность таких отжигов существенным образом зависит от структуры пленки.

Результаты, приведенные в данной работе, а также в работе [6], указывают на то, что добротность ВЧ-контуров определяется не потерями в подложке [2] или конструкцией измерительной установки [3], а специфическими свойствами полоска из пленки YBCO, которые в настоящее время не определены. Статические характеристики полоска из пленки YBCO обратимо меняются при циклических отжигах, в отличие от них добротность у рассмотренной структуры таким свойством не обладает.

Список литературы

- [1] *Xu H., Gao E., Ma Q.Y.* // IEEE Trans. on Appl. Supercond. 2001. V. 11. N 1. P. 353.
- [2] *Withers R.S., Liang G.-C., Cole B.F.* et al. // IEEE Trans. on Appl. Supercond. 1993. V. 3. N 1. P. 2450.
- [3] *Ginefri J.-K., Darrasse L., Crozat P.* // IEEE Trans. on Appl. Supercond. 1999. V. 9. N 4. P. 4695.
- [4] *Wang Y., Su H.T., Huang F.* et al. // IEEE Trans. on Appl. Supercond. 2007. V. 17. N 2. P. 3632.
- [5] *Дроздов Ю.Н., Павлов С.А., Парафин А.Е.* // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 1. С. 55.
- [6] *Мастеров Д.В., Павлов С.А., Парафин А.Е.* и др. //ЖТФ. 2007. Т. 77. В. 10. С. 109.
- [7] *Вопилкин Е.А., Востоков Н.В., Парафин А.Е.* // МСТ. 2003. № 4. С. 10.
- [8] *Вендик О.Г., Попов А.Ю.* // ЖТФ. 1993. Т. 63. В. 7. С. 1.