

05.4;09

## Зависимость параметров эмпирической модели поверхностного сопротивления пленки высокотемпературного сверхпроводника от параметров технологического процесса

© И.Б. Вендик, Е.К. Гольман, С.В. Разумов,  
А.А. Свищев, А.В. Тумаркин

С.-Петербургский государственный электротехнический университет

Поступило в Редакцию 4 апреля 1997 г.

Для оптимизации режима получения YBCO пленок исследовалась зависимость поверхностного сопротивления от температуры нагревателя подложки. Показана высокая чувствительность величины  $R_{\text{SUR}}$  к точности поддержания температуры держателя подложки для обеспечения минимального значения поверхностного сопротивления пленок и максимального значения параметра  $\gamma$ , определяющего температурные зависимости  $\sigma(t)$  и  $\lambda_L(t)$ .

Поверхностное сопротивление пленки ( $R_{\text{SUR}}$ ) высокотемпературного сверхпроводника, измеренное в СВЧ диапазоне (1–90 GHz), является объективным интегральным критерием, определяющим пригодность пленок для применения в СВЧ микроэлектронике. Минимизируя поверхностное сопротивление при отработке технологического процесса осаждения пленок, можно найти необходимые оптимальные технологические условия получения пленок.

Поверхностное сопротивление тонкой пленки высокотемпературного сверхпроводника удовлетворительно описывается феноменологической моделью [1]:

$$R_{\text{SUR}}(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_n(t)d} & t \geq t_c, \\ \frac{(\omega\mu_0)^2\sigma_n(t)}{1 + [\omega\mu_0\sigma_n(t)\lambda_L^2(t)]^2} \cdot \frac{\lambda_L^4(t)}{d} & t < t_c, \end{cases} \quad (1)$$

Параметр	Обозначение	Пределы изменения
Остаточное сопротивление	$\alpha$	1–20
Температурный коэффициент	$\gamma$	1.4–2.45
Проводимость пленки	$\sigma(1)$	$(1 - 3.5) \cdot 10^6 \text{ 1}/\Omega \cdot \text{m}$
Лондоновская глубина проникновения	$\lambda_L(0)$	0.130–0.260 $\mu\text{m}$
Температура перехода	$T_c$	88–93 К

где  $t = T/T_c$ ,  $T$  — температура,  $T_c$  — температура перехода в сверхпроводящее состояние,  $\sigma_n(t)$  — проводимость нормальных носителей заряда,  $d$  — толщина пленки,  $\lambda_L(t)$  — лондоновская глубина проникновения магнитного поля в высокотемпературный сверхпроводник,  $\omega$  — частота и  $\mu_0$  — магнитная проницаемость вакуума.

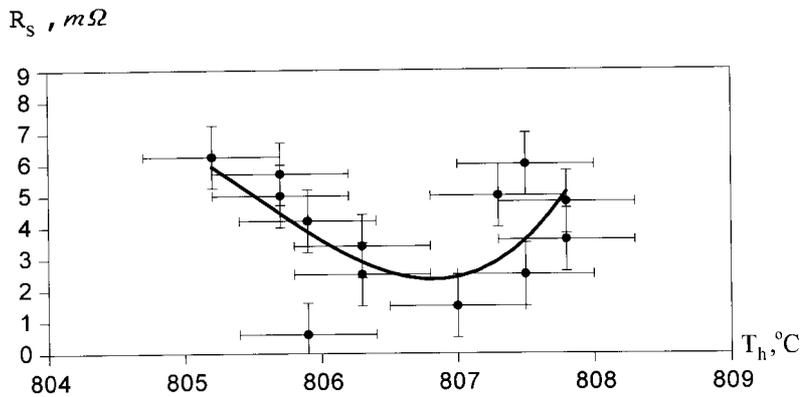
Температурные зависимости проводимости  $\sigma_n(t)$  и  $\lambda_L(t)$  определяются выражениями

$$\sigma_n(t) = \begin{cases} \sigma_n(1) \cdot t^{-1} & t \geq 1, \\ \sigma_n(1) \cdot [t^{\gamma-1} + \alpha [2mm]ot(1 - t^\gamma)] & t < 1, \end{cases} \quad (2)$$

$$\lambda_L(t) = \frac{\lambda_L(0)}{\sqrt{1 - t^\gamma}}. \quad (3)$$

Используются четыре подгоночных параметра:  $\alpha$  — безразмерный параметр, характеризующий остаточное сопротивление;  $\gamma$  — коэффициент, определяющий температурные зависимости  $\sigma(t)$  и  $\lambda_L(t)$ ;  $\sigma(1)$  — проводимость пленки при температуре перехода в сверхпроводящее состояние ( $t = 1$ );  $\lambda_L(0)$  — лондоновская глубина при нулевой температуре ( $t = 0$ ). Типичные значения параметров для тонких пленок сверхпроводника YBCO лежат в пределах, указанных в таблице [2].

Анализ большого числа экспериментальных данных по измерению температурной зависимости  $\lambda_L(0)$  от температуры [2] позволил высказать предположение, что высококачественные пленки YBCO характеризуются меньшей величиной лондоновской глубины проникновения. В то же время исследование температурной зависимости резонансной частоты микрополосковых резонаторов на пленках YBCO [3] показало, что ббльшая добротность и меньшее значение поверхностного сопротивления пленок соответствуют увеличению параметра  $\gamma$  в модели



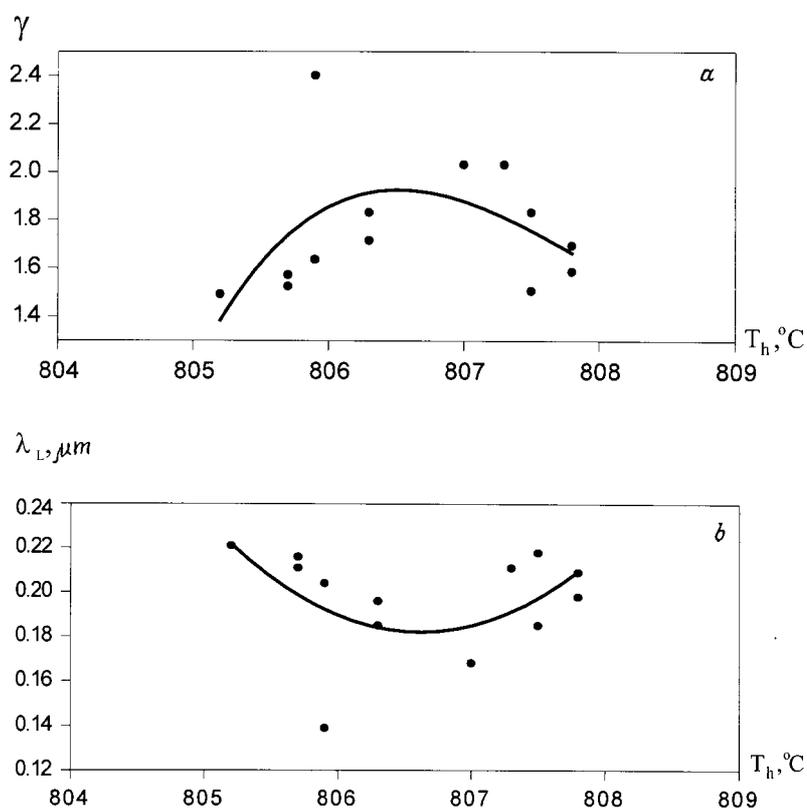
**Рис. 1.** Измеренные значения поверхностного СВЧ сопротивления пленок ВТСП  $R_{SUR}$ , изготовленных при различной температуре держателя подложки  $T_h$ .

(1)–(3). Таким образом, можно предположить, что параметры модели  $\gamma$  и  $\lambda_L(0)$  связаны между собой.

При низких температурах ( $t < 0.3$ ) величина  $R_{SUR}$  определяется параметром остаточного сопротивления  $\alpha$  и вычислить  $\lambda_L(0)$  из измеренного поверхностного сопротивления практически невозможно. В области температур вблизи перехода ( $0.7 < t \leq 1$ ) наибольшее влияние на  $R_{SUR}$  оказывает параметр  $\gamma$ . Таким образом, выполняя измерение поверхностного сопротивления высокотемпературных сверхпроводниковых пленок разного качества в сверхпроводящем состоянии в двух температурных точках (вблизи перехода ( $0.7 < t \leq 1$ ) и при  $t \rightarrow 0$ ), можно найти параметры модели  $\gamma$  и  $\alpha$ .

В данной работе представлены результаты статистической обработки измеренных значений поверхностного СВЧ сопротивления пленок YBCO при  $t = 0.855$  ( $T = 77$  К). Пленки были получены магнетронным распылением мишени стехиометрического состава в атмосфере чистого кислорода. В качестве подложки использовался сапфир ( $r$ -срез) с буферным слоем  $\text{CeO}_2$ . Толщина пленок варьировалась в пределах  $0.2\text{--}0.3 \mu\text{m}$ .

С целью оптимизации режима получения пленок исследовалась зависимость поверхностного сопротивления высокотемпературных сверх-



**Рис. 2.** Рассчитанные значения параметров  $\gamma$  и  $\lambda_L(0)$  для соответствующих пленок ВТСП, изготовленных при различной температуре держателя подложки  $T_h$ :  $a$  — параметр  $\gamma$ ;  $b$  — параметр  $\lambda_L(0)$ .

проводниковых пленок от параметров технологического процесса. В качестве параметра управления технологическим процессом была выбрана температура нагревателя подложки  $T_h$ . Температура осаждения контролировалась датчиком, установленным на нагревателе подложки. Погрешность измерения температуры нагревателя  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ . Скорость осаждения и давление рабочего газа поддерживались постоянными от

процесса к процессу и составляли  $\sim 10.7 \text{ \AA}/\text{min}$  и 1 Torr соответственно. Поверхностное СВЧ сопротивление измерялось методом резонатора на параллельных пластинах [4] на частоте 10 GHz при  $T = 77 \text{ K}$ . Погрешность измерения оценивается величиной  $\pm m\Omega$ . Результаты измерения поверхностного СВЧ сопротивления 13 образцов представлены на рис. 1. Сплошная линия соответствует среднеквадратичной аппроксимации экспериментальных данных полиномом третьего порядка. Достаточно очевидно наличие оптимальной температуры держателя подложки, при которой получаемые пленки обладают наименьшим поверхностным сопротивлением.

Используя модель (1)–(3), определим параметры  $\gamma$  и  $\lambda_L(0)$  для каждого образца при выбранных фиксированных подгоночных параметрах:  $T_C = 90 \text{ K}$ ,  $\sigma(1) = 2 \cdot 10^6 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$ ,  $\alpha = 6$ . Толщина всех пленок принята равной  $0.25 \mu\text{m}$ . Постулируем однозначное соответствие между параметрами  $\gamma$  и  $\lambda_L(0)$ , обеспечивающее их взаимное изменение в пределах возможных значений, представленных в таблице. В этом случае можно найти эмпирическое соотношение между этими параметрами:

$$\lambda_L(0) = 0.13 \cdot \exp(1.27 - 0.5 \cdot \gamma) (\mu\text{m}). \quad (4)$$

Значения  $\gamma$  и  $\lambda_L(0)$ , рассчитанные по (4) для соответствующих исследованных образцов пленок, показаны на рис. 2 (*a* и *b* соответственно). Сплошные линии соответствуют среднеквадратичной аппроксимации. Пленки высокого качества характеризуются минимальным поверхностным сопротивлением, максимальной величиной параметра  $\gamma$  и минимальным значением  $\lambda_L(0)$ .

Таким образом, в результате использования феноменологической модели поверхностного сопротивления пленки YBCO применительно к результатам измерения была установлена связь параметров модели  $\lambda_L(0)$  и  $\gamma$ , что позволяет рассматривать параметр  $\gamma$  как параметр качества пленки.

Показана высокая чувствительность величины  $R_{\text{SUR}}$  к точности поддержания температуры держателя подложки для обеспечения минимального значения поверхностного сопротивления пленок YBCO и соответственно максимального значения параметра  $\gamma$ . Для выяснения взаимной связи параметров  $\gamma$  и  $\alpha$  необходимо провести дополнительное измерение поверхностного сопротивления для образцов разного качества при низких температурах ( $t < 0.3$ ).

Работа выполнена по проектам № 95062 и № 95061 (Государственная программа "Актуальные проблемы в физике конденсированных сред").

### Список литературы

- [1] *Vendik O., Kollberg E.* // *Microwaves and RF.* 1993. N 6. P. 118–121.
- [2] *Вендик О.Г., Попов А.Ю., Зубко С.П.* // *Письма в ЖТФ.* 1995. Т. 21. В. 15. С. 6–10.
- [3] *Vendik I.B., Gevorgian S.S., Kaparkov D.I.* et al. // *Proc. of 25th EuMC.* Bologna: Nexus Media Ltd. 1995. V. 2. P. 1205–1208.
- [4] *Taber R.C.* // *Rev. Sci. Instrum.* 1990. P. 61–66.