

05.4:09

## Нелинейные характеристики резонаторов и фильтров на пленках высокотемпературного сверхпроводника

© И.Б. Вендик, С.А. Гальченко, М.Н. Губина,  
В.В. Кондратьев, С. Леппявуори, Э. Якку

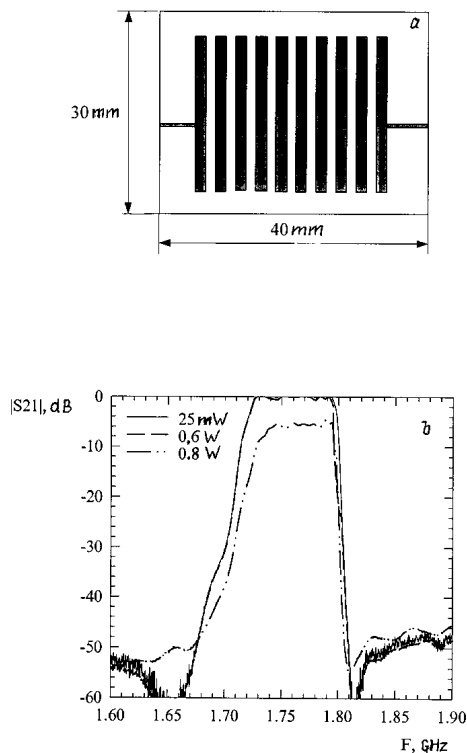
С.-Петербургский государственный электротехнический университет

Поступило в Редакцию 7 июля 1998 г.

Описано поведение планарных сверхпроводниковых резонаторов и фильтров при воздействии СВЧ сигнала повышенного уровня мощности. Предложена феноменологическая модель, позволяющая адекватно описать нелинейные свойства поверхностного сопротивления сверхпроводящей пленки. На основе этой модели получено аналитическое выражение для расчета собственной добротности резонатора при различных уровнях входной мощности. Модель использует один феноменологический параметр, величина которого зависит от качества сверхпроводящей пленки и ее способности держать мощность. Предложена температурная зависимость этого параметра, позволяющая привести результаты измерений при различных температурах к одной, что дает возможность количественно сравнить нелинейные свойства исследуемых образцов пленок.

Пленки высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП) на диэлектрической подложке успешно применяются для реализации планарных полосно-пропускающих СВЧ фильтров с рекордно низкими потерями в полосе пропускания. Однако в силу нелинейности поверхностного сопротивления по отношению к сверхвысокочастотному току характеристики фильтров искажаются при прохождении СВЧ волны с достаточно большой амплитудой.

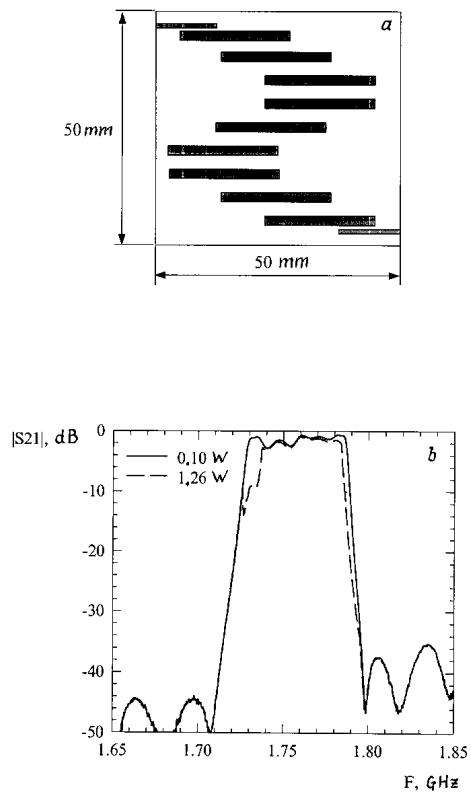
Исследовались две конфигурации фильтров на пленках YBCO на подложке LaAlO<sub>3</sub> с диэлектрической проницаемостью 23.7 (пленки PRIMATEC,  $R_{sur} = 0.6 \text{ m}\Omega$  при температуре  $T = 77 \text{ K}$  на частоте  $f = 10 \text{ GHz}$ , толщина пленок 400–500 nm). Использовались пленки, выращенные на подложках разной толщины: 0.45 и 1.0 mm. Фильтры были рассчитаны на одну и ту же частоту 1.75 GHz, одинаковую полосу пропускания 4% и измерялись при одной и той же температуре  $T = 77 \text{ K}$ . Фильтр



**Рис. 1.** Топология фильтра 10-го порядка (*a*) и его амплитудно-частотная характеристика при разных уровнях мощности (*b*).

10-го порядка был выполнен в виде решетки связанных полуволновых микрополосковых резонаторов с использованием элементов возбуждения в виде *T*-образной структуры (рис. 1, *a*) на подложке толщиной 0.45 mm (пленка № 1). Характеристики фильтра при разных уровнях входной мощности приведены на рис. 1, *b*. При входной мощности 29 dBm (0.8 W) характеристики искажаются вследствие проявления нелинейных эффектов.

Второй фильтр 9-го порядка был выполнен также в виде решетки связанных полуволновых резонаторов с использованием связанных линий



**Рис. 2.** Топология фильтра 9-го порядка (*a*) и его амплитудно-частотная характеристика при разных уровнях мощности (*b*).

в качестве элементов возбуждения (рис. 2, *a*) на подложке толщиной 1 mm (пленка № 2). С целью улучшения амплитудно-частотной характеристики было изменено взаимное расположение полуволновых резонаторов. Использование более толстой подложки предполагало уменьшение высокочастотного тока в резонаторах и соответственно увеличение порога нелинейности. Характеристики фильтра при разных уровнях входной мощности приведены на рис. 2, *b*. Характеристики искажаются при входной мощности 31 dBm (1.26 W), что незначительно

превышает пороговую мощность для фильтра на более тонкой подложке. Отсутствие заметного увеличения порога нелинейности для фильтра № 2, возможно, связано с разным качеством использованных пленок. Были предприняты дополнительные исследования с целью получения количественных оценок нелинейных свойств пленок.

Поскольку исследованные полосно-пропускающие фильтры выполнены на основе связанных полуволновых резонаторов, нелинейные свойства фильтров определяются нелинейным поведением резонаторов. В связи с этим было проведено экспериментальное исследование полуволновых резонаторов, выполненных на тех же подложках с пленками YBCO, которые использовались для фильтров. Экспериментальные результаты оценивались на основе следующих модельных представлений.

Поверхностный импеданс высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) как функция частоты и температуры достоверно описывается в линейном приближении феноменологической моделью [1]. На высоком уровне СВЧ мощности наблюдается нелинейное увеличение поверхностного сопротивления, которое может быть представлено как функция напряженности магнитного поля в отрезке линии [2]:

$$R_{sur}(x, t) = R_{sur,0} \cdot \left( 1 + \frac{H_m^2}{H_0^2} \cdot f^2(t, x) \right), \quad (1)$$

где  $R_{sur,0}$  — поверхностное сопротивление сверхпроводника в линейном приближении;  $H_m$  — амплитуда напряженности магнитного поля в отрезке ВТСП линии передачи;  $f(t, x)$  — функция, учитывающая зависимость магнитного поля от времени и координаты;  $H_0$  — феноменологический параметр модели.

Параметр  $H_0$  можно приближенно оценить как

$$H_0 \approx j_c \cdot \lambda_L, \quad (2)$$

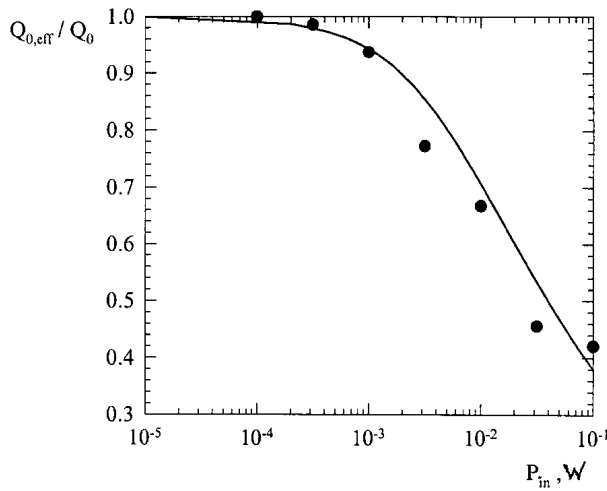
$j_c$  — критическая плотность тока,  $\lambda_L$  — лондоновская глубина проникновения поля в сверхпроводник.

Нелинейные свойства ВТСП резонаторов оцениваются по изменению добротности при увеличении входной СВЧ мощности [2]:

$$\frac{Q_0}{Q_{0,eff}} = 1 + \frac{9}{4\pi} \cdot \frac{P_{in}}{P_0} \cdot \frac{Q_E}{\left(1 + \frac{Q_E}{Q_{0,eff}}\right)^2}. \quad (3)$$

Здесь  $Q_0$  — собственная добротность резонатора в линейном приближении;  $Q_{0,eff}$  — эффективная добротность резонатора как функция входной мощности  $P_{in}$ ;  $Q_E$  — внешняя добротность резонатора, определяемая связью резонатора с внешними цепями;  $P_0$  — характеристическая мощность, определяемая как СВЧ мощность в резонаторе при условии, что напряженность магнитного поля в нем равна  $H_0$ . Параметр  $P_0$  является количественной мерой способности ВТСП пленки в составе резонатора выдерживать высокий уровень СВЧ мощности без нелинейных искажений: чем больше  $P_0$ , тем выше порог нелинейности пленки.

В нелинейном режиме исследовались два полуволновых микрополосковых резонатора на двух разных подложках. На рис. 3 приведены результаты измерения нормированной собственной добротности резонатора на пленке YBCO № 1 на тонкой подложке в функции от входной СВЧ мощности при  $T = 60$  К. Нормировка проводилась по отношению к добротности, измеренной в линейном режиме при малом уровне входной СВЧ мощности. Здесь же приведена расчетная характеристика (3), полученная при  $P_0 = 23$  Вт. Нелинейные характеристики были измерены при разных температурах. В соответствии с выражением (2)  $P_0$  зависит



**Рис. 3.** Зависимость нормированной собственной добротности резонатора от уровня входной мощности.

от температуры, поскольку и критический ток, и лондоновская глубина проникновения зависят от температуры. Используя типичную температурную зависимость критического тока и температурную зависимость лондоновской глубины в соответствии с моделью [1], мы предложили следующую температурную зависимость для параметра  $P_0$ :

$$P_0(T) = P_0(0) \cdot \left(1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^2\right), \quad (4)$$

где  $P_0(0)$  определяется при  $T = 0$  экстраполяцией экспериментальных результатов.

Для второго резонатора на пленке № 2 на толстой подложке измерения были проведены при одной температуре  $T = 77$  К. Приводя результаты измерений нелинейных характеристик резонаторов к одной температуре (77 К) с использованием (4), находим  $P_0 = 12$  В для пленки № 1 и  $P_0 = 2$  В для пленки № 2, что позволяет сделать предположение о разном качестве пленок с точки зрения их нелинейных характеристик: пленка № 2 на толстой подложке имеет более низкий порог нелинейности в СВЧ поле, по сравнению с пленкой № 1.

Исследования нелинейных характеристик фильтров находятся в полном соответствии с измерениями параметра нелинейности на полуволновых резонаторах, что подтверждает целесообразность использования параметра  $P_0$  для оценки нелинейных свойств планарных ВТСП фильтров.

Работа выполнена по проекту № 98063 Государственной научно-технической программы "Актуальные проблемы в физике конденсированных сред" по направлению "Сверхпроводимость" при финансовой поддержке фонда Nokia.

## Список литературы

- [1] Vendik O.G., Vendik I.B., Kaparkov D.I. // IEEE Trans. on MTT. 1998. V. 46. N 5. P. 469–478.
- [2] Vendik O.G., Vendik I.B., Samoilova T.B. // IEEE Trans. on MTT. 1997. V. 45. N 2. P. 173–178.