

05.4;06;12

Измерение интермодуляции в пленках YBaCuO

© Е.А. Вopilкин, С.А. Павлов, А.Н. Панин, А.Е. Парафин

Институт физики микроструктур РАН, Н. Новгород

Поступило в Редакцию 11 мая 1999 г.

В окончательной редакции 23 сентября 1999 г.

Предложена методика измерения интермодуляционного сигнала, обусловленного нелинейностью пленок высокотемпературного сверхпроводника. Методика основана на использовании одноходового резонатора, что позволяет существенно повысить чувствительность (понижить минимально измеримый уровень мощности интермодуляционного сигнала при заданном значении магнитного поля на поверхности исследуемого образца) по сравнению с использованием двухходового резонатора. Проведены измерения $P_{comb}(P_{in})$ для пленок YBaCuO с различными значениями поверхностного сопротивления и толщины. По проведенным измерениям определено характеристическое поле интермодуляции, характеризующее нелинейные свойства пленки независимо от измерительной системы.

Эпитаксиальные пленки высокотемпературных сверхпроводников, нанесенные на подложки с малыми потерями, являются основой для изготовления резонаторов, фильтров и других СВЧ приборов. Высокое качество таких устройств определяется малой величиной поверхностного сопротивления (R_s) сверхпроводящих пленок, вместе с тем нелинейные эффекты в пленках могут ограничивать их использование при больших плотностях мощности [1–5].

Нелинейность пленок высокотемпературных сверхпроводников проявляется в зависимости R_{eff} от величины электромагнитного поля и в преобразовании частот сигналов, причем эффект преобразования частот может проявляться в значительно меньших полях. В СВЧ устройствах при наличии двух рабочих сигналов f_1 и f_2 нелинейные свойства пленки приведут к возникновению интермодуляционных сигналов на комбинационных частотах $f_{comb1} = 2f_1 - f_2$ и $f_{comb2} = 2f_2 - f_1$, причем интермодуляционные сигналы окажутся в рабочей полосе частот.

№	$t, \mu\text{m}$	$R_{eff}, \text{m}\Omega$	$H_{im}, \text{kA/m}$	$j_c, \text{MA/cm}^2$
1	0.17	10	3.6	0.61
37	0.14	1.6	5.6	0.97
34	0.10	1.2	9.6	1.3
14	0.13	0.7	11	1.1

Параметры пленок определяются физическими свойствами материала (intrinsic) и дефектами, связанными с технологическими особенностями изготовления (extrinsic). Важно отметить [1], что высокие значения критической температуры, критического тока и малое R_s не гарантируют слабую нелинейность пленки, поэтому при оптимизации технологического процесса нужно проводить диагностику нелинейности.

Пленки YBaCuO выращивались на подложках алюмината лантана (LaAlO) методом лазерного напыления. Длина волны эксимерного лазера $\lambda = 248 \text{ nm}$, длительность импульса $\tau = 27 \text{ ns}$; плотность энергии в импульсе около 10 J/cm^2 ; расстояние мишень–подложка $d \approx 6 \text{ cm}$; температура роста $T_p \approx 700^\circ\text{C}$; давление кислорода при напылении $P \approx 20 \text{ Pa}$; охлаждение до комнатной температуры проводилось при атмосферном давлении кислорода.

Параметры пленок приведены в таблице. Толщина пленок d определялась на дифрактометре ДРОН-4 по методике, описанной в [9]. Эффективное поверхностное сопротивление пленок R_{eff} измерялось методом резонатора с параллельными пластинами [7]. Плотность критического тока пиннинга j_c определялась по остаточному намагничиванию пленки [6].

На рис. 1 изображена блок-схема установки для измерения мощности на комбинационной частоте (P_{comb}) в зависимости от падающей мощности (P_{in}). Мы использовали одноходовый диэлектрический резонатор из LaAlO, помещенный в медный корпус. Диаметр диэлектрика составляет 8 mm , высота 3.2 mm , диэлектрическая проницаемость около 22, тангенс диэлектрических потерь меньше 10^{-4} . В качестве рабочей используется азимутально симметричная мода H_{011} с частотой $f \approx 11.8 \text{ GHz}$. Ненагруженная добротность резонатора составляет $Q \approx 10^4$. Элементом связи резонатора является петля. Точная настройка коэффициента связи производится поршнем, расположенным в центре верхней крышки медного корпуса. Исследуемые сигналы подаются

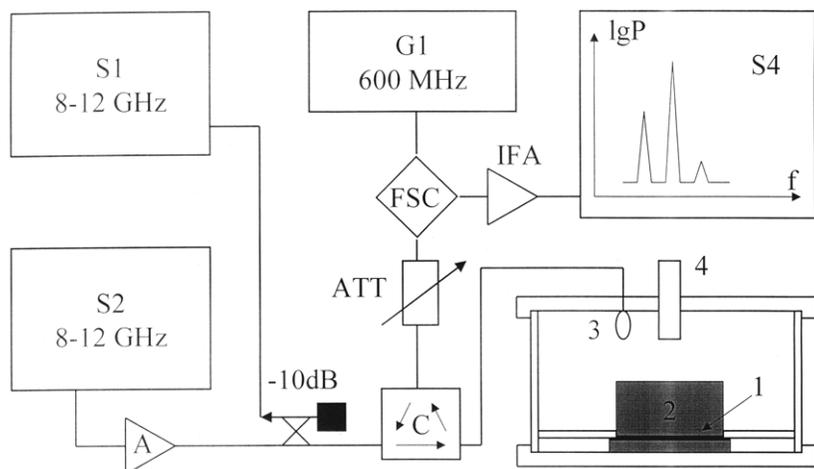


Рис. 1. Блок-схема измерительной установки: 1 — исследуемая пленка, 2 — диэлектрик (алюминат лантана), 3 — элемент связи, 4 — регулировочный стержень, C — циркулятор, A — усилитель, ATT — аттенюатор, FSC — стробоскопический преобразователь частоты, IFA — усилитель промежуточной частоты, S1 — синтезатор, S2 — синтезатор, G1 — генератор Г4-164, S4 — спектроанализатор С4-74.

на стробоскопический преобразователь частоты FSC. Гетеродинным сигналом FSC служит двадцатая гармоника генератора G1, которая смешивается с исследуемыми сигналами f_1 , f_2 и $2f_1 - f_2$, после чего сигналы через усилитель промежуточной частоты IFA подаются на спектроанализатор S4.

Максимальная мощность сигнала первого синтезатора на входе в резонатор составляет около 80 мВт, при этом магнитное поле на поверхности пленки $H = 160$ А/м. Величина сигнала второго синтезатора на входе в резонатор во время измерений не изменялась и составляла 10 мВт. Разница частот синтезаторов 40 кГц. Фазовый шум синтезаторов составляет -90 дБ/Гц при отстройке на 40 кГц. Динамический диапазон спектроанализатора 80 дБ, ширина полосы пропускания при измерениях была 1 кГц. Посторонних источников сигнала на комбинационной частоте в измерительной системе нет, что подтверждается отсутствием

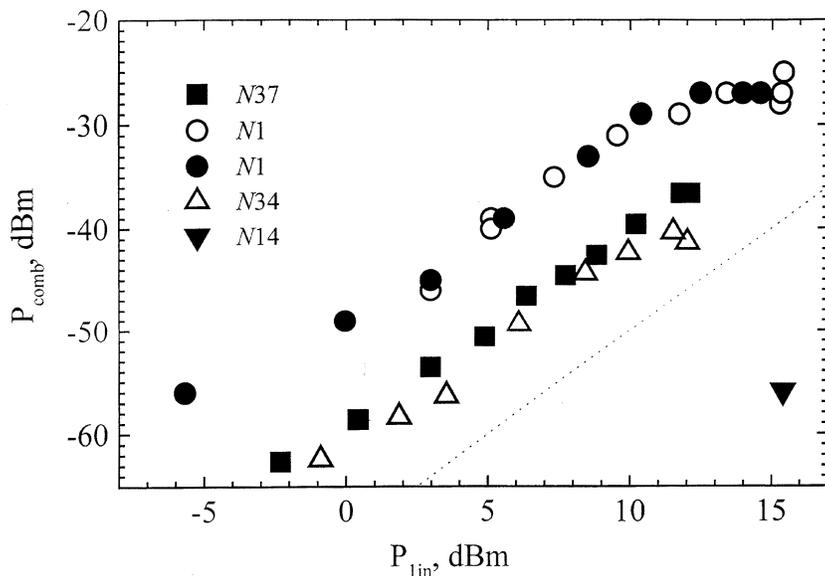


Рис. 2. Экспериментальные зависимости $P_{comb}(P_{in})$ при $P_2 = 9.3 \text{ dB} \cdot \text{m}$. Наклон пунктирной линии $(P_{in})^2 P_2$.

интермодуляции при замене пленки на медную пластину. Измерения проводились в жидком азоте.

В приемный тракт системы наряду с интересующими нас сигналами на комбинационных частотах попадают мощные сигналы накачки. Рассмотрим факторы, которые в этой ситуации определяют чувствительность системы (минимально измеримую мощность при заданном значении магнитного поля на поверхности исследуемого образца). Во-первых, сигнал, поступающий на смеситель, должен быть мал, так как в противном случае из-за неидеальности смесителя в нем возникнут паразитные сигналы на комбинационных частотах. Во-вторых, из-за конечной ширины линии в точках f_{comb1} и f_{comb2} входной сигнал не равен нулю, в наших измерениях его величина составляет -60 dB от мощности входного сигнала на центральной частоте синтезатора.

Таким образом, для повышения чувствительности системы необходимо уменьшать величину сигнала накачки, попадающего в прием-

ный тракт, при заданном значении магнитного поля на поверхности исследуемого образца. Обычно [1,5] при использовании двухходовых резонаторов это достигается за счет увеличения добротности резонатора ($Q > 10^6$), что ведет к значительному ужесточению требований к используемой аппаратуре. Использование одноходового резонатора позволяет повысить чувствительность в R раз (R — коэффициент отражения от резонатора), т.е. резонатор выполняет функции фильтра на комбинационную частоту. В нашей системе $R < -20$ dB.

На рис. 2 показаны экспериментальные зависимости $P_{comb}(P_{1in})$ для пленок различной толщины и качества. Из графиков видно, что для всех пленок хорошо выполняется зависимость $P_{comb} \sim (P_{1in})^2 \cdot P_{2in}$, это позволяет вычислить для них характерное поле интермодуляции H_{im} , введенное в [8] и характеризующее нелинейные свойства пленок независимо от системы, в которой проводились измерения нелинейности.

Работа выполнена при финансовой поддержке научно-технической программы "Актуальные проблемы физики конденсированных сред. Сверхпроводимость", проект № 98064.

Список литературы

- [1] *Dieter W., Getta M., Hein M.* et al. // IEEE Trans. on Appl. Supercond. 1997. V. 5. N 2. P. 1236–1239.
- [2] *Wilker C., Zhi-Yan Shen, Pang P.* et al. // IEEE. 1995. V. 5. N 2. P. 1665.
- [3] *Lauder A., Wilker C., Zhi-Yan Shen* et al. // International Wires & Cable Symposium Proceedings. 1994. P. 155.
- [4] *Oates D.E., Nguyen P.P., Dresselhaus G.* et al. // J. Supercond. 1995. V 8. N 6. P. 725.
- [5] *Zhi-Yan Shen, Wilker C.* // Reprinted from Microwaves & RF. April 1994. Penton Publishing, Cleveland Ohio 44114.
- [6] *Nozdrin Yu.N., Visheslavtzev P.P., Tokman I.D.* et al. // IEEE Trans. on Appl. Supercond. 1995. V. 5. P. 1424.
- [7] *Basovich A.Ya., Belov R.K., Markelov V.A.* et al. // J. Supercond. 1992. V. 5. P. 1614.
- [8] *Вопилкин Е.А., Парафин А.Е., Резник А.Н.* // ЖТФ 2000 (в печати).
- [9] *Варганов А.В., Вопилкин Е.А., Вышеславцев П.П.* и др. // Письма в ЖЭТФ. 1996. Т. 63. В. 8. С. 608.