

05.4;09

©1995

## НЕЛИНЕЙНАЯ ДИССИПАЦИЯ В МИНИАТЮРНОЙ СВЕРХПРОВОДНИКОВОЙ АНТЕННЕ СВЧ ДИАПАЗОНА

*В.И.Абрамов, А.Ю.Климов, А.Н.Резник, Б.Б.Тагунов*

В последние годы интенсивно исследуются нелинейные свойства СВЧ резонаторов и фильтров из высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП). Нелинейность связана с зависимостью поверхностного импеданса ВТСП пленок от амплитуды протекающего СВЧ-тока. Высокие добротности резонансных систем из ВТСП обеспечивают большие токи уже при относительно низких подводимых мощностях. Нелинейность проявляется в изменениях коэффициентов передачи и отражения, искажении формы и уширении полосы частотного отклика, сдвиге резонансной частоты [1-3]. Электрически малая антенна (ЭМА) вместе с согласующим устройством из ВТСП также представляет собой высокодобротный резонатор с излучателем в качестве нагрузки, поэтому нелинейность в той же мере свойственна и ЭМА. Первые измерения нелинейного уменьшения КПД миниатюрной ВТСП антенны выполнены в [4]. В данной работе исследованы нелинейные свойства полосковой ВТСП антенны диапазона 2 ГГц. Подобные исследования важны для оценки перспектив использования сверхпроводниковых ЭМА в передающих устройствах.

Разработанная антенна содержит два симметричных диполя длины  $l$  ( $l/\lambda = 0.09$ , где  $\lambda$  — длина волны) и компакт-

ную согласующую систему, выполненную в виде изогнутой двухпроводной полосковой линии. Диэлектрическое заполнение составляют сапфировые пластины, одновременно служащие подложками ВТСП. Конструкция и характеристики этой антенны в линейном (приемном) режиме приведены в работе [5].

Экспериментальные исследования нелинейности базировались на измерениях частотных зависимостей КПД  $\eta = P_{\text{rad}}/P_{\text{in}}$  и коэффициента отражения  $\Gamma = P_{\text{ref}}/P_{\text{in}}$  антенны при различных уровнях подводимой мощности  $P_{\text{in}}$  (здесь  $P_{\text{rad}}$ ,  $P_{\text{ref}}$  — излученная и отраженная мощности). На вход ЭМА, помещенной в радиопрозрачный пенопластовый стакан с жидким азотом, через усилитель СВЧ мощности подавался сигнал от свип-генератора прибора Р2-52. Величина  $P_{\text{in}}$  регулировалась калиброванным аттенюатором в диапазоне 1–350 мВт, а полоса свипирования составляла 150 МГц. В качестве измерителя мощности использовался панорамный измеритель отношений уровней сигналов ФК2-33, синхронизованный со свип-генератором. Определение КПД проводилось на резонансной частоте  $f_0$  методом сравнения принимаемых мощностей от исследуемой антенны и полуволнового вибратора, КПД которого принималось за 100%, а диаграмма направленности практически совпадала с диаграммой ВТСП антенны [5]. При измерениях коэффициента отражения  $\Gamma$  сигналы на входе измерительного и опорного каналов подавались с выходов рефлектометра, включенного между исследуемой антенной и свип-генератором.

Результаты измерений зависимостей  $\eta(P_{\text{in}})$ ,  $\Gamma(P_{\text{in}})$ , а также относительной частотной полосы  $\Delta f/f_0 = B(P_{\text{in}})$  представлены на рис. 1. Зависимость  $\eta(P_{\text{in}})$  имеет пороговый характер. При мощностях ниже порогового уровня  $P_l \simeq 2$  мВт величина  $\eta \simeq 100\%$ , а при  $P_{\text{in}} > P_l$  КПД падает со скоростью 0.25 дБ на 1 дБ изменения  $P_{\text{in}}$ . Уменьшение  $\eta$  в принципе может быть связано как с нелинейным ростом диссипаций в антенне, так и с увеличением отражения на входе согласованной в линейном режиме системы. Однако зависимость  $\Gamma(P_{\text{in}})$  показывает, что во всем диапазоне изменения  $P_{\text{in}}$  величина коэффициента отражения не превысила 11%, в то время как при максимальной  $P_{\text{in}}$  наблюдалось падение КПД в 3 раза. Таким образом, полученная зависимость  $\eta(P_{\text{in}})$  связана в основном с ростом диссипаций, приводящим к перераспределению суммарных потерь подводимой мощности между излучаемой и диссипируемой компонентами в пользу последней. Немонотонный характер зависимости  $\Gamma(P_{\text{in}})$  объясняется уменьшением входного сопротивления резонатора при увеличении потерь [6,7] и небольшим превышением этого сопротивления над волновым импедансом подводя-

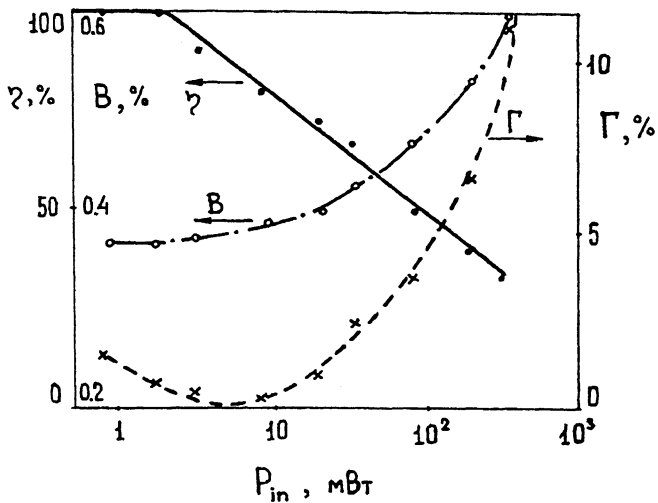


Рис. 1. Коэффициент полезного действия  $\eta$ , коэффициент отражения  $\Gamma$  и частотная полоса  $B$  антенны в зависимости от подводимой мощности.

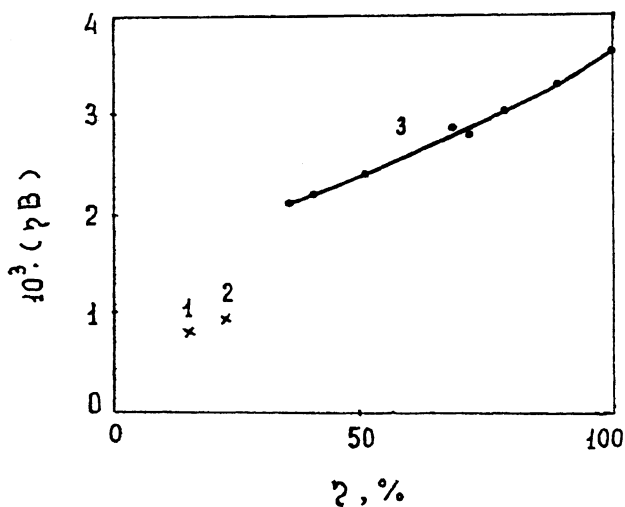


Рис. 2. Зависимость произведения  $\eta \cdot B$  от  $\eta$ .

1 — антенна из Cu при температуре 290 К; 2 — Cu, 77 К; 3 — YBaCuO, 77 К при различных мощностях.

щей линии для неидеально согласованной антенны на низком уровне мощности ( $\Gamma \approx 1\%$ ).

Анализ частотных откликов антенны не выявил заметного сдвига резонансной частоты  $f_0$  при изменении  $P_{in}$ . Наблюдалось уширение частотной полосы  $B$  с ростом  $P_{in}$  ( $B \sim 1.7$  раза при максимальной мощности). Вместе с тем, скорость увеличения  $B$  оказалась заметно меньше скорости падения  $\eta$  с ростом омических потерь в системе, что можно видеть на рис. 1. Количественно этот эффект представлен на рис. 2 в виде зависимости произведения  $\eta \cdot B$  от  $\eta$ . Указанный эффект уже отмечен нами в работе [5], где сравнивались значения  $\eta \cdot B$  для идентичных ВТСП и медной антенн. Соответствующие данные, также показанные на рис. 2, демонстрируют общую тенденцию увеличения  $\eta \cdot B$  с уменьшением диссипации. Отмеченный экспериментальный факт надо рассматривать как благоприятный, так как сужение частотной полосы при повышении эффективности обычно является недостатком ЭМА из ВТСП. Заметим, что по теории ЭМА, развитой в [8,9], величина  $\eta \cdot B$  должна быть инвариантна относительно изменения омических потерь в системе заданной конфигурации. Результаты выполненных измерений не укладываются в рамки этой теории. Выяснение природы данного эффекта, обсуждавшейся в [5], требует дополнительных экспериментальных и теоретических исследований.

Оценка СВЧ тока в согласующем резонаторе, соответствующего пороговой мощности  $P_l$ , проведена по эквивалентной схеме антенны, представляющей собой отрезок полосковой линии с волновым импедансом  $Z_l$ , нагруженной с двух концов импедансами электрически коротких диполей  $Z_d = R_d - iX_d$  (см. рис. 3). Положение точки запитки рассчитывается из условия равенства входного импеданса антенны волновому импедансу подводящей линии [6]. Параметры  $R_d = 4$  Ом,  $X_d = 425$  Ом определены из результатов исследования характеристик антенны в линей-

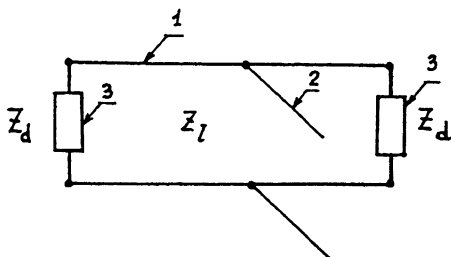


Рис. 3. Эквивалентная схема антенны.

1 — согласующая линия, 2 — подводящая линия, 3 — нагрузки.

ном режиме [5]. Поверхностное сопротивление ВТСП пленок  $R_s = 8 \cdot 10^{-4}$  Ом, необходимое для расчета омических потерь, получено по данным независимых СВЧ измерений методом, описанным в [10]. Амплитуда СВЧ тока  $I$  имеет максимум в месте подключения подводящей линии и монотонно спадает вдоль ВТСП полосков к концам линии. Пороговой мощности  $P_l = 2$  мВт соответствует максимальный ток  $I_m \simeq 0.15$  А. Учтем, что распределение плотности тока по ширине полоска имеет вид [11]:

$$j(x) = \frac{I}{\pi h \sqrt{w^2/4 - x^2}}, \quad (1)$$

где  $x$  — координата поперек полоска относительно оси симметрии;  $w$ ,  $h$  — ширина и толщина ВТСП пленки, причем для рассматриваемой антенны расстояние  $d$  между полосками равно  $d = w = 1.5$  мм, а  $h \simeq \Lambda \simeq 0.2$  мкм ( $\Lambda$  — лондоновская глубина проникновения поля в сверхпроводник). В соответствии с (1), максимальная величина  $j$  достигается на краях пленки, причем в качестве оценки этой величины возьмем значение  $j$  на границе области применимости формулы (1), т.е. при  $x = w/2 - \Lambda$ . Используя (1), при  $I = I_m$  найдем  $j_{\max} \simeq 1.4 \cdot 10^6$  А/см<sup>2</sup>, что удовлетворительно согласуется с величиной критической плотности тока, полученной из измерений на постоянном токе  $j_c = (2 \div 4) \cdot 10^6$  А/см<sup>2</sup>. Механизм нелинейных потерь в ВТСП обычно связывают с несовершенством кристаллической структуры пленок, приводящим к возникновению джозефсоновских слабых связей между монокристаллическими гранулами [1,3]. Таким образом, наибольшее влияние на величину  $P_l$  оказывает микроструктура краев средней части ВТСП полосков.

Возможности повышения величины  $P_l$  связаны с улучшением качества ВТСП пленок и с оптимизацией конструкции антенны. Исходя из схемы на рис. 3, в приближении  $R_d \ll Z_l \ll X_d$  можно получить  $P_l \simeq Z_l^2 I_m^2 R_d / X_d^2$ . Оптимизация состоит в изменении размеров  $w$ ,  $d$  с целью увеличения  $Z_l I_m$  и в совершенствовании конструкции излучателей для увеличения  $R_d$  и уменьшения  $X_d$ . Расчеты и предварительные измерения на антеннах из меди показали, что при сохранении длины диполей  $l$  (т.е. габаритов всей системы) можно увеличить  $P_l$  до  $\sim 10$  мВт.

Достигнутая высокая эффективность и энергетический потенциал ЭМА из ВТСП и имеющиеся перспективы повышения пороговой мощности свидетельствуют о возможности использования ВТСП антенн в маломощных передающих системах как в качестве одиночного излучателя, так и в составе антенных решеток.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 94-02-05476-а.

### Список литературы

- [1] *Hedges S.J., Adams M.J., Nicholson B.F.* // *Electron. Lett.* 1990. V. 26. N 14. P. 977-979.
- [2] *Chin C.C., Oates D.E., Dresselhaus G., Dresselhaus H.S.* // *Phys. Rev. B.* 1992. V. 45. N 9. P. 4788-4798.
- [3] *Newman N., Lyons W.G.* // *J. Supercond.* 1993. V. 6. N 3. P. 119-160.
- [4] *Chaloupka H., Klein N., Peiniger M., Piel H., Pichke A., Splitt G.* // *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.* 1991. V. 39. N 9. P. 1513-1521.
- [5] *Абрамов В.И., Климов А.Ю., Резник А.Н., Тагунов Б.Б.* // *Письма в ЖТФ.* 1994. Т. 20. В. 19. С. 59-64.
- [6] *Климов А.Ю., Красильник З.Ф., Резник А.Н., Абрамов В.И., Белов И.Ф., Тагунов Б.Б.* // *СФХТ.* 1993. Т. 6. № 11-12. С. 2150-2159.
- [7] *Абрамов В.И., Резник А.Н.* // *Письма в ЖТФ.* 1993. Т. 19. В. 19. С. 44-48.
- [8] *Hansen R.C.* // *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* 1990. V. 26. N 2. P. 345-355.
- [9] *Dinger R.J.* // *J. Supercond.* 1990. V. 3. N 3. P. 287-296.
- [10] *Vasovich A.Y., Belov R.K., Markelov V.A., Mazo L.A., Pavlov S.A., Talanov V.V., Varganov A.V.* // *J. Supercond.* 1992. V. 5. N 6. P. 497-502.
- [11] *Лухарев К.К.* // *Изв. вузов. Радиофизика.* 1971. Т. 14. В. 6. С. 909-914.

Институт физики микроструктур РАН  
Научно-исследовательский  
радиофизический институт  
Нижний Новгород

Поступило в Редакцию  
11 января 1995 г.