

05.4;09

©1994

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИ МАЛАЯ ПОЛОСКОВАЯ АНТЕННА ИЗ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СВЕРХПРОВОДНИКА

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

Перспективы применения высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) для миниатюризации антенных устройств рассмотрены в работах [1-3], а в [4-7] содержатся результаты экспериментальных исследований миниатюрных ВТСП антенн. В данной работе исследована усовершенствованная по сравнению с [7] антенна диапазона 2 ГГц с КПД близким к 100% (для антенны [7] КПД = 25%).

Антенна симметричной конструкции (рис. 1) содержит два синфазных электрически коротких диполя ( $l/\lambda = d/\lambda = 0.09$ , где  $l$  — длина диполей,  $d$  — расстояние между диполями,  $\lambda$  — длина волны), подключенных к концам полуволнового резонатора, выполненного в виде изогнутой двухпроводной полосковой линии с волновым сопротивлением  $Z_l = 66$  Ом (ширина полоски 1.5 мм). Общие размеры системы —  $17 \times 18 \times 1.5$  мм. Диэлектрическое заполнение составляют три сапфировые пластины ( $Al_2O_3$ ) толщиной по 0.5 мм. Внешние пластины служат подложками ВТСП, а внутренняя используется для настройки (согласования) системы. Диэлектрическая проницаемость сапфира  $\epsilon \approx 10.5$ , тангенс угла потерь  $tg \sigma < 10^{-5}$  при температуре  $T = 77$  К.

Проблема согласования электрически малой антенны детально рассмотрена в работах [7,8]. Положение плоскости запитки резонатора согласованной системы находится вблизи электрического центра и зависит от потерь в системе, причем критичность настройки увеличивается с уменьшением потерь. Согласование симметричной антенны упрощается благодаря более точному определению положения электрического центра, который лежит в плоскости симметрии. В предлагаемой конструкции согласование достигается за счет расчетного смещения плоскости запитки относительно плоскости симметрии и "тонкой" настройки с помощью подвижной диэлектрической пластины в одном из плеч резонатора, перемещение которой приводит к смещению электрического центра. Такой способ оказался достаточно удобным и эффективным как при комнатной темпера-

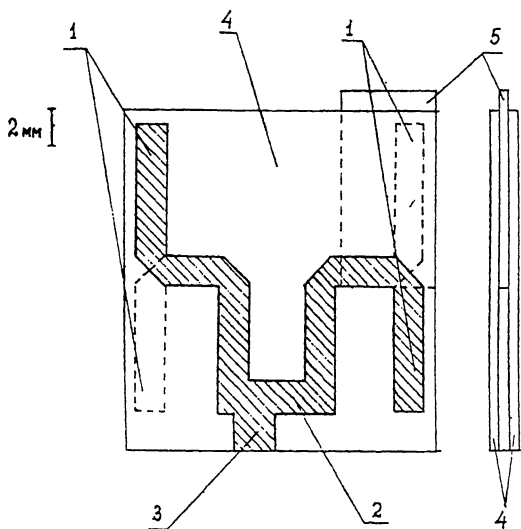


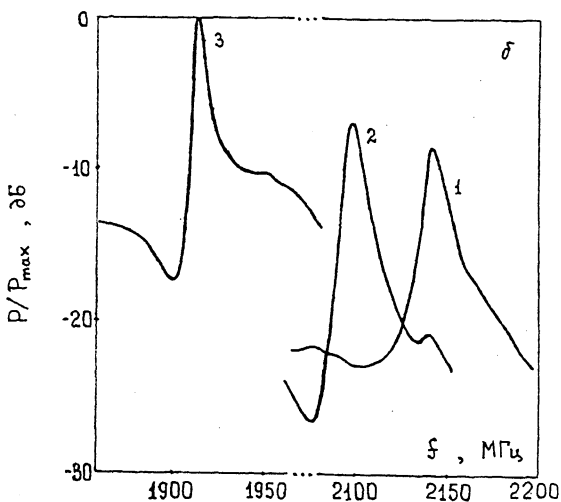
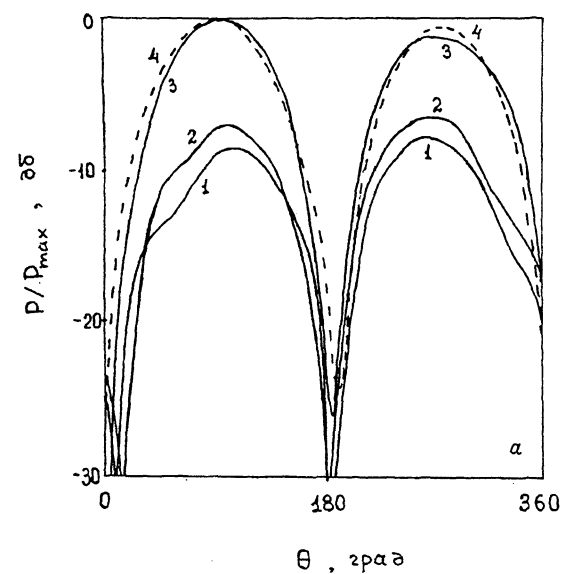
Рис. 1. Конструкция антенны. Заштрихованная часть — ВТСП ( $YBaCuO$ ), незаштрихованная — диэлектрик ( $Al_2O_3$ ).

1 — электрические диполи; 2 — согласующий резонатор; 3 — отрезок подводящей линии; 4 — подложки; 5 — подвижная диэлектрическая пластина.

утре, так и при температуре жидкого азота. После настройки коэффициент стоячей волны (КСВ) не превышал 1.1 для всех реализаций антенны в ВТСП и медном исполнении.

Пленки ВТСП наносились методом магнетронного распыления на сапфировые подложки с подслоями окиси циркония, стабилизированной окисью итрия (ISZ). Основные характеристики пленок следующие: критическая температура  $T_c \approx 89$  К, критическая плотность тока  $J_c \approx 4 \cdot 10^6$  А/см<sup>2</sup>, поверхностное сопротивление  $R_s \approx 8 \cdot 10^4$  Ом на частоте 10 ГГц. Подключение ВТСП к нормальным проводникам осуществлялось через тонкопленочные конденсаторы. С этой целью стороны подложек с ВТСП структурами были покрыты пленкой окиси тантала ( $Ta_2O_5$ ) толщиной  $\sim 0.5$  мкм. Нижними обкладками каждого конденсатора служили ВТСП полосы отрезка подводящей линии. Верхние обкладки (медные) одновременно служили контактными площадками для присоединения проводников возбуждающей линии. Удельная емкость переходов составила  $\sim 300$  пФ/мм<sup>2</sup>, площадь верхних обкладок  $\sim 1$  мм<sup>2</sup>.

Были измерены диаграммы направленности (ДН) и частотные отклики (ЧО) идентичных ВТСП и медной антенн. Методика определения КПД антенн основана на сравнении мощностей, принимаемых исследуемой антенной и полуволновым вибратором (КПД которого принималось за 100%),



**Рис. 2.** Диаграммы направленности (а) и частотные отклики (б) антенн.

1 — Си при температуре 290 К; 2 — Си, 77 К; 3 — YBaCuO, 77 К; 4 — полуволновый вибратор.

помещенным в ту же точку и облучавшимся источником с фиксированной мощностью (подробнее см. [7]). Результаты измерений представлены на рис. 2. Кривые нормированы на мощность  $P_{\max}$ , принимаемую полуволновым диполем в мак-

Материал, температура	$f_0$ , МГц	$B$ , %	$\eta$ , %	$10^3(B\eta)$
Cu, 290 К	2143	0.56	14	0.78
Cu, 77 К	2097	0.41	22	0.90
YBaCuO, 77 К	1911	0.29	100	2.9

симума ДН и ЧО. На рис. 2, а приведены измеренные ДН в  $E$ -плоскости на резонансной частоте. Хорошо выражен дипольный характер наблюдавшихся ДН с незначительными искажениями, вызванными “паразитным” излучением согласующего резонатора и рассеянием на подводящем кабеле. Измеренные ЧО в максимумах ДН антенн приведены на рис. 2, б. Различие резонансных частот связано с вышеупомянутой методикой настройки, которая производилась индивидуально для каждой антенны. Эти данные показывают возможность перестройки рабочей частоты в пределах как минимум  $\pm 5\%$ , если подвижную диэлектрическую пластину ввести и во второе плечо антенны. Некоторые радиохарактеристики антенн, определенные по данным рис. 2, приведены в таблице, где  $f_0$  — резонансная частота,  $\eta$  — КПД относительно полуволнового вибратора,  $B = \Delta f/f_0$  — частотная полоса по уровню КПД = -3 дБ.

Полученные результаты показывают, что при использовании ВТСП разработанная антенна не уступает по КПД полуволновому вибратору.

Обратим внимание на благоприятный экспериментальный факт, заключающийся в том, что при замене нормальных проводников на ВТСП увеличение КПД антенны сопровождается значительным (в 3.5 раза) возрастанием произведения  $\eta B$ . Отметим, что этот результат противоречит общепринятым представлениям о влиянии такой замены [1]. Действительно, с помощью эквивалентной схемы антенны в виде полуволнового отрезка двухпроводной линии с волновым сопротивлением  $Z_l$  и постоянной распространения  $k = k' + ik''$  ( $k'' \ll k'$ ), нагруженной с двух концов импедансами электрически коротких связанных диполей  $Z_d = R_d - iX_d$  ( $R_d \ll Z_l \ll X_d$ ), а вблизи электрического центра — сопротивлением подводящей линии, можно получить:

$$\eta = \frac{r}{\kappa + r}, \quad B = \frac{I}{\pi}(\kappa + r),$$

где  $\kappa = 4\pi k''/k'$  — диссипативные потери линии,  $r = 8Z_l R_d / X_d^2$  — радиационные потери диполей. Следовательно,  $\eta B = r/\pi$ . Согласно [1], величина поверхностного сопротивления  $R_s$  влияет только на “внутренние” поля,

определяющие диссипацию, и не влияя на "внешние" поля, связанные с запасенной и излучаемой энергией. Отсюда следует инвариантность  $\eta B$  относительно изменения  $R_s$  (см., например, [2]), что не согласуется с нашими экспериментальными данными. Это противоречие может быть разрешено, если принять во внимание высказанную в [3] гипотезу о возможном влиянии  $R_s$  проводников на "ближнее" поле для некоторых конфигураций электрически малых антенн, в частности содержащих более одного резонансного излучателя. В этом случае реактанс  $X_d$  связанных диполей должен зависеть от  $R_s$ . Полагая, что наведенные сопротивления излучения двух близко расположенных диполей равны сопротивлениям одиночного диполя  $R_0 = 20\pi^2(l/\lambda)^2$  [9], получим  $R_d = 2R_0 \simeq 4$  Ом. Тогда из полученных экспериментальных данных имеем:  $X_d = 812, 762, 425$  Ом для антенн из Cu (290 К), Cu (77 К), YBaCuO (77 К) соответственно.

Особенностью ВТСП антенн является нелинейность, обусловленная зависимостью  $R_s$  ВТСП пленок от подводимой СВЧ мощности  $P$ . Подобные эффекты, приводящие к падению КПД с ростом  $P$ , наблюдались для ВТСП антенны в [5]. Экспериментальные исследования нелинейности разработанной ВТСП антенны в передающем режиме были выполнены при уровнях мощности до 350 мВт. Величина пороговой мощности  $P^*$ , при которой КПД снижается на 1 дБ, составила  $\sim 10$  мВт. Скорость падения КПД при  $P > P^*$  —  $\sim 0.25$  дБ на 1 дБ изменения  $P$ . Отметим, что разработанная антенна имеет величину  $P^*$  на два порядка более высокую, чем у антенны в [5], что объясняется большими (на порядок) ширинами полосков и, по-видимому, большей величиной критического тока ВТСП пленок.

Таким образом, усовершенствование антенны [7], заключающееся в использовании двухдипольного излучателя, элемента плавной настройки, емкостной связи нормальных и ВТСП проводников, сапфира в качестве диэлектрика, позволило повысить КПД миниатюрной антенны практически до уровня, соответствующего полуволновому вибратору. Выигрыш в КПД ВТСП антенны по сравнению с медной (в 5–7 раз) сопровождался значительно меньшим сужением частотной полосы (в 1.5–2 раза). Антенна сохраняет линейные свойства до уровня подводимой мощности  $P^* \simeq 10$  мВт, что позволяет говорить о возможности использования данной конструкции не только в приемном, но и в передающем режиме.

Авторы выражают признательность И.Ф. Белову, З.Ф. Красильнику, С.А. Павлову за содействие работе.

Данная работа поддерживается Российским Фондом фундаментальных исследований — проект № 94-02-05476-а

### Список литературы

- [1] Hansen R.C. // IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. 1990. V. 26. N 2. P. 345–355.
- [2] Dinger R.J. // J. Supercond. 1990. V. 3. P. 287–296.
- [3] Chaloupka H. // J. Supercond. 1992. V. 5. N 4. P. 403–416.
- [4] Khamas S.K., Mehler M.J., Maclean T.S.M., Gough C.E., McN. Alford N., Harmer M.A. // Electron. Lett. 1988. V. 24. P. 460–461.
- [5] Chaloupka H., Klein N., Peiniger M., Piel H., Pischke A., Split G. // IEEE Trans. Microwave Theory Techn. 1991. V. 39. N 9. P. 1513–1521.
- [6] Itoh K., Ishii O., Koshimoto Y., Sho K. // J. Supercond. 1991. V. 4. N 6. P. 496–471.
- [7] 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.
- [8] Абрамов В.И., Резник А.Н. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 19. С. 44–48.
- [9] Лавров Г.А. Взаимное влияние линейных вибраторных антенн. М.: Связь, 1975. 129 с.

Институт физики микроструктур РАН  
Научно-исследовательский  
радиофизический институт

Поступило в Редакцию  
1 августа 1994 г.