

УДК 537.312.62

## ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС В ОБРАЗЦАХ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ В СВЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

Е. М. Голямина, В. А. Дравин, Б. Г. Журкин, А. Л. Карузский,  
А. Н. Лыков, В. Н. Мурзин

*При помещении в полость микрополоскового СВЧ резонатора ( $f_p \sim 9$  ГГц) образцов  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  ( $x \leq 0,1$ ) обнаружено значительное уширение резонансной кривой и одновременное увеличение коэффициента пропускания резонатора, сопровождаемое появлением новой интенсивной и широкой полосы пропускания. Эти данные интерпретированы как проявление диэлектрического резонанса в образцах ВТСП в СВЧ электромагнитном поле.*

В данной работе сообщается об обнаружении нового явления: диэлектрического СВЧ резонанса в образцах ВТСП  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  ( $x \lesssim 0,1$ ), проявляющегося как в нормальном, так и в сверхпроводящем состояниях. Помещенный в полость СВЧ резонатора образец ВТСП, ведущий себя как обычный металл с хорошо отражающей поверхностью, при изменениях частотных и конфигурационных характеристик поля в резонаторе неожиданно приобретает свойства, характерные для диэлектрика. Электромагнитная волна начинает проникать и распространяться внутри образца с относительно слабым затуханием, в результате чего в образце может устанавливаться стоячая волна, которая проявляется в виде обнаруженного в данной работе резонанса.

Предположение о возможности возникновения в образцах ВТСП нелинейного резонансного диэлектрического резонанса ранее высказано в [1]. Экспериментальное наблюдение нового типа резонансов в ВТСП оказалось возможным благодаря тому, что СВЧ установка [2] была изменена так, чтобы наряду с добротностями, характерными для измерительных сверхпроводящих ниобиевых микрополосковых резонаторов  $\sim 10^3 \div 10^5$  [3], могли измеряться и низкие добротности  $\sim 10 \div 100$ .

Исследованные образцы  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  ( $x \lesssim 0,1$ ) керамического типа обладали хорошими для керамики сверхпроводящими свойствами ( $T_c \simeq 92$  К,  $\Delta T_c \simeq 2 \div 3$  К) и низким остаточным поверхностным сопротивлением ( $\sim 10^{-3}$  Ом на 9 ГГц). Они имели форму дисков диаметром 3,8 мм и толщиной 0,53 мм. Часть образцов имела защитное парафиновое покрытие [4].

На рис. 1 приведены спектры коэффициента пропускания мощности ( $T$ ) для резонатора с образцами из  $Nb$  и ВТСП. Спектр ниобиевого образца в сверхпроводящем состоянии (рис. 1а) представлен узким резонансным пиком рабочей моды резонатора на частоте  $f = 9,198$  ГГц с коэффициентом пропускания в максимуме 0,028 и полушириной  $\Delta f = 0,37$  МГц. Замена ниобия на образец ВТСП вызывает резкое изменение спектра пропускания резонатора, которое невозможно объяснить простым изменением потерь. Как видно из рис. 1б, помимо рабочей моды, проявляющейся в виде сигнала на частоте 9,192 ГГц, в спектре ВТСП наблюдается второй еще более сильный и широкий резонанс, проявляющийся в виде интенсивной изрезанной широкой полосы с максимумом огибающей на частоте 9,265 ГГц. Дополнительные максимумы обусловлены влиянием интерференции в подводящих волноводах. В результате математической обработки с разрешением вклада обоих резонансов определены параметры рабочей моды  $f = 9,192$  ГГц,  $\Delta f = 5,4$  МГц  $T_{max} = 0,12$  и нового резонанса  $f = 9,265$  ГГц,  $\Delta f \simeq 100$  ГГц,  $T_{max} = 0,42$ . Как видно из рис. 1в и более подробно из рис. 1г-е, новая резонансная полоса не связана со сверхпроводящим состоянием ВТСП, так как она наблюдается в широком интервале температур от 5 К до комнатной.

Металлический резонанс, отвечающий рабочей моде резонатора, в случае ВТСП характеризуется более высоким коэффициентом пропускания в максимуме, несмотря на большую полуширину, чем в случае  $Nb$ . Это противоречит известному соотношению [5] между полушириной и интенсивностью для одиночного резонанса  $T_{max} \propto \Delta f^{-2}$ . Отмеченное отличие для ВТСП проявляется не только в абсолютной величине соответствующих параметров, но и в особенностях функциональной зависимости  $T_{max}$  от  $\Delta f$ , измеренной при варьировании напряженности электромагнитной волны (изменении места расположения образца в резонаторе). Как видно из рис. 2, соотношение хорошо выполняется для резонатора с образцом из  $Nb$ , меди или для пустого резонатора. В случае ВТСП измеренные зависимости существенно отклоняются от квадратичных. При этом, если для резонанса металлического типа (кривые 2 - 6) это отклонение при малых полуширинах относительно невелико и быстро возрастает с ростом ширины резонанса, то для нового резонанса наблюдается принципиально иная картина: интенсивность

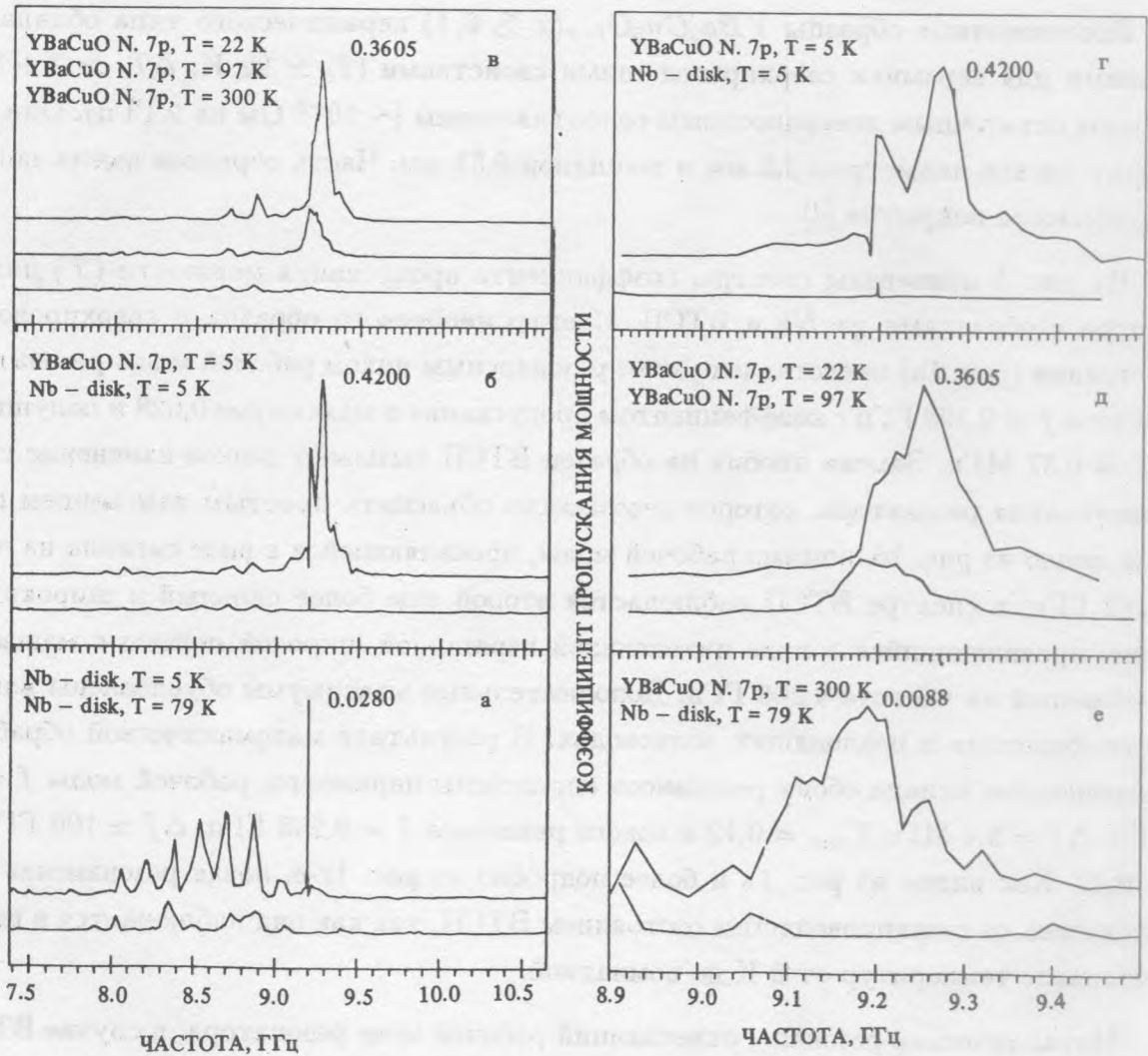


Рис. 1. Спектры коэффициента пропускания мощности для резонатора с образцами из Nb и YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> с защитным покрытием при температурах в диапазоне 5 ÷ 300 K. Для удобства кривые сдвинуты по вертикальной оси на постоянную величину. В пределах каждого из рисунков масштаб всех спектров одинаков. Числа над линиями обозначают коэффициент пропускания в максимуме. В правой колонке представлены спектры в более узком интервале частот.

новой полосы меняется на несколько порядков в то время, как ее полуширина остается практически неизменной (кривые 7 и 8).

Как показывает анализ спектров, фаза колебаний в максимуме пропускания новой широкой полосы отстает от фазы колебаний в максимуме металлического пика приблизительно на  $\pi/2$  (усредненная по всем измерениям разность фаз составляет  $86^\circ \pm 25^\circ$ ),

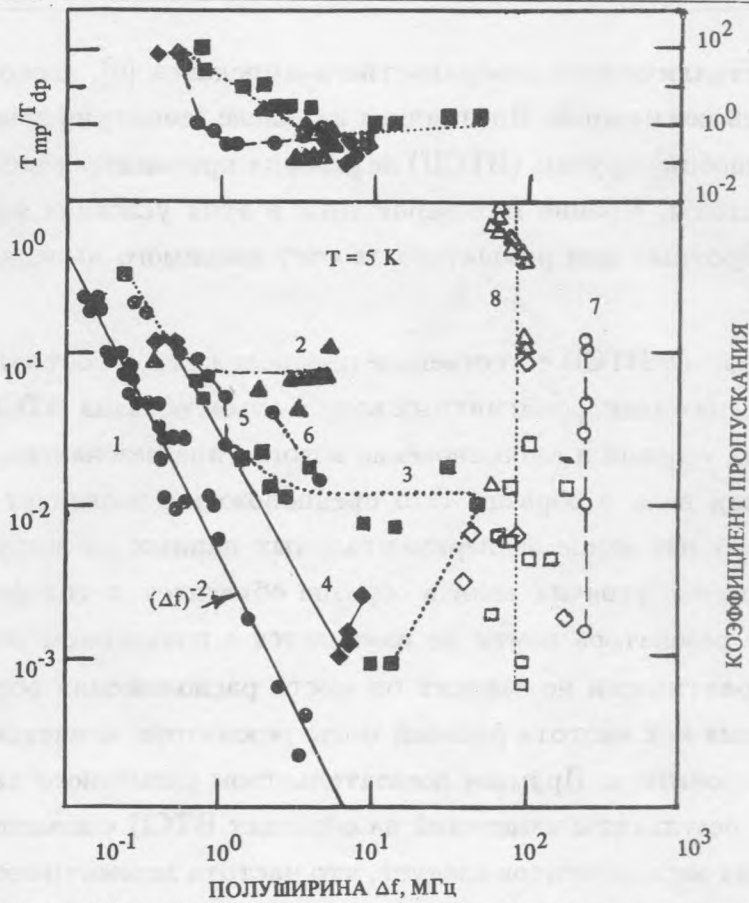


Рис. 2. Зависимости коэффициента пропускания ( $T$ ) в максимуме резонансной полосы от ее полуширины ( $\Delta f$ ), измеренные при изменении размеров резонатора или положения образца в полости резонатора (при 5 K); кривая 1 – данные для пустого резонатора, либо для резонатора с образцами из меди или ниобия; кривые 2 – 8 – данные для ВТСП; 2 - 4, 8 - образцы с защитным покрытием, 5 - 7 - образцы без покрытия. Сплошными значками показаны данные для металлического резонанса (кривые 1 - 6), светлыми значками - данные для диэлектрического резонанса (кривые 7, 8). В верхней части рисунка показано отношение коэффициентов пропускания в максимуме полос металлического ( $T_{mp}$ ) и диэлектрического ( $T_{dp}$ ) резонансов в зависимости от полуширины металлического резонанса для образцов ВТСП.

что свидетельствует о различии механизмов возбуждения этих резонансов и объясняет сложную форму регистрируемых спектров (рис. 1а, г). Заметим (рис. 2), что в образце без покрытия, поверхность которого подвергалась химическому воздействию окружающей атмосферы [4], новая полоса оказывается более широкой, тогда как рабочая мода не уширяется так сильно, как в образце с защищенной поверхностью.

Обнаруженный новый резонанс и его характерные свойства не удается объяснить

в рамках модели металлического поверхностного импеданса [6], поскольку геометрия установки оставалась неизменной. Идентичная в смысле геометрии замена одного проводящего образца (ниобий) другим (ВТСП) не должна приводить к возникновению новой собственной частоты. Крайне маловероятным в этих условиях представляется и проявление низкодобротных мод резонатора за счет вносимого импедансом изменения коэффициента связи.

С учетом особенностей ВТСП естественнее предположить, в соответствии с [1], возможность проникновения электромагнитных волн в объем образца ВТСП, качественное изменение граничных условий и возникновение нового типа резонансов, обусловленных возбуждением стоячих волн в образце. Это предположение позволяет объяснить всю совокупность приведенных выше экспериментальных данных по возбуждению нового резонанса. Возникновение стоячих волн в образце объясняет и тот факт, что спектр собственных частот резонатора почти не изменяется с появлением нового резонанса, частота которого практически не зависит от места расположения образца в полости резонатора, в то время как частота рабочей моды резонатора меняется вместе с изменением геометрии резонатора. Прямым доказательством размерного характера нового резонанса являются результаты измерений на образцах ВТСП с измененной толщиной ( $d = 0,57$  мм). Из этих экспериментов следует, что частота диэлектрического резонанса изменяется обратно пропорционально толщине образца. О диэлектрическом характере нового резонанса свидетельствует то, что по мере перемещения образца в пучность электрического поля в резонаторе эффективность возбуждения этого резонанса возрастает. В рамках данного предположения находят объяснения также аномалии СВЧ потерь в области сотен мегагерц, наблюдавшиеся в образцах размерами  $\sim 10$  мм [7, 8].

Обнаруженные отклонения параметров спектров ВТСП от зависимости  $T_{max} \sim \Delta f^{-2}$ , характерной для одиночных резонансов (рис. 2, кривая 1), указывают на достаточно сильную связь [6] между металлическим и диэлектрическим резонансами. Данные, приведенные на рис. 2, свидетельствуют о том, что коэффициент связи между резонансами в случае не защищенного диэлектрическим покрытием образца больше, чем в случае защищенного. Качественное различие природы металлического и диэлектрического резонансов проявляется в зарегистрированном сдвиге фаз между ними, составляющим  $\pi/2$ .

Возможность проникновения электромагнитных волн в объем образца ВТСП и возникновение диэлектрического резонанса не могут быть объяснены переходом ВТСП из металлического в диэлектрическое состояние. Такое кардинальное изменение свойств

ВТСП в отсутствие внешних воздействий (помимо СВЧ поля) представляется нереальным. Более вероятной причиной обнаруженного эффекта может быть наличие пространственных неоднородностей и пространственной дисперсии электрических свойств ВТСП, в том числе обусловленных присущей этим материалам слоистой кристаллической структурой. Такая возможность впервые была указана в работах [1]. Идеализированной моделью неоднородной структуры образца, дающей подход к пониманию явления, может служить металлический образец, с ребристой поверхностью [5, 6]. В случае равенства высоты ребер толщине образца последний представляет собой набор проводящих пластин, разделенных диэлектриком, т.е. слоистую структуру типа "сэндвич", рассматривавшуюся с точки зрения проблемы сверхпроводимости в [9]. Известно [5, 6], что ребристая поверхность является замедляющей структурой для поперечно-магнитных типов волн, распространяющихся в направлении, перпендикулярном плоскостям ребер. В такой структуре в пространстве между ребрами может распространяться "медленная" волна. Возбуждение ее может объяснять обнаруженный диэлектрический резонанс.

Масштаб пространственных неоднородностей в ВТСП материалах мог бы быть связан с наличием зерен в керамических образцах. Оценки, однако, показывают, что для того, чтобы поле было "прижато" достаточно близко к поверхности образца, действительная часть диэлектрической проницаемости материала, заполняющего пространство между ВТСП зернами размером  $\sim 30$  мкм, должна составлять  $\sim 10^4 - 10^6$ . Никаких экспериментальных данных о существовании таких диэлектрических прослоек в ВТСП нам не известно.

В работе [1] обсуждалась возможность проникновения СВЧ волн в объем образца ВТСП, основанная на учете слоистой кристаллической структуры и пространственной дисперсии диэлектрической проницаемости ВТСП  $\epsilon$ . В качестве возможного основного состояния носителей тока (с учетом сильного корреляционного взаимодействия частиц и неустойчивости системы по отношению к переходу металл - диэлектрик [10-13]) рассматривались состояния в верхней и нижней зонах Хаббарда, соответствующие пространственному перераспределению зарядов между ионами кислорода (состояния  $O^0$  и  $O^{2-}$ ). Электрический ток в этом случае определяется движением "бесспиновых" квазичастиц, образующихся в результате почти половинного заполнения зон Хаббарда [1, 13] и характеризующихся положительным ( $O^0$ ) и отрицательным ( $O^{2-}$ ) зарядом, которые сильно взаимодействуют с мягкой кислородной подрешеткой. Согласно [1], пространственная дисперсия  $\epsilon$  приводит к частотной зависимости эффективной массы носителей тока в ВТСП (при переходе из микроволнового в субмиллиметровый диапазон длин волн). Дру-

гим следствием пространственной дисперсии  $\epsilon$  можно считать эффект возникновения диэлектрического резонанса в ВТСП образцах.

Таким образом, в данной работе обнаружен новый тип резонанса при помещении ВТСП в СВЧ поле резонатора, который не может быть объяснен в рамках простой модели металлического поверхностного импеданса и свидетельствует о весьма необычных свойствах ВТСП, которые допускают проникновение и распространение электромагнитных волн в образце.

Работа выполнена при частичной поддержке, представленной Американским Физическим Обществом из фонда Слоана (Sloan Foundation Grant).

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Карузский А. Л., Коваленко В. И., Крапивка А. Е. Препринт ФИАН N 215, 217, М., 1988.
- [2] Головашкин А. И. и др. Препринт ФИАН N 135, М., 1981.
- [3] Аншукова Н. В. и др. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 2, 32 (1988).
- [4] Голямина Е. М., Лыков А. Н. Сверхпроводимость: физика, химия, техника, т. 2, N 6, 51 (1989).
- [5] Мированов О. С., Собенин Н. П. Техника сверхвысоких частот, Атомиздат, М., 1980.
- [6] Ильинский А. С., Слепьян Г. Я. Колебания и волны в электродинамических системах с потерями, изд. МГУ, М., 1983.
- [7] Щербakov А. С. и др. ФММ, **64**, 735, 742 (1987); ФНТ, **17**, 1427 (1991).
- [8] Дмитриев В. М., Офицеров М. Н., Пренцлау Н. Н. ФНТ, **16**, 384, 387 (1990).
- [9] Ginzburg V. L. Phys. Lett., **13**, 101 (1964).
- [10] Келдыш Л. В. В сб. Экситоны в полупроводниках, Наука, М., 1971.
- [11] Звездин А. К., Хомский Д. И. Письма в ЖЭТФ, **46** (приложение), 102 (1987).
- [12] Копеев Ю. В. Труды ФИАН, т. 86, Наука, М., 1975, с. 3.
- [13] Журкин Б. Г. и др. Труды ФИАН, т. 188, Наука, М., 1988, с. 178.

Поступила в редакцию 24 ноября 1992 г.