

УДК 537.312.62

## ВОЗБУЖДЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЗОНАНСА В ВТСП МАТЕРИАЛАХ И ЭФФЕКТ ЗАТЯГИВАНИЯ ЧАСТОТЫ СВЧ РЕЗОНАТОРА

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

*Исследованы условия возбуждения зарегистрированного ранее [1] диэлектрического резонанса в образцах  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  ( $x \lesssim 0,1$ ) в поле СВЧ резонатора. Обнаружен эффект "затягивания" частоты рабочей моды резонатора на частоту диэлектрического резонанса образца ВТСП.*

В работе авторов [1] сообщалось об обнаружении нового явления – диэлектрического резонанса, возникающего в ВТСП материалах типа  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  ( $x \lesssim 0,1$ ) при помещении образца в полость СВЧ резонатора. Необычность эффекта заключается в том, что ВТСП – керамический материал, ведущий себя как хорошо отражающий металл, в условиях наблюдения нового резонанса проявляет свойства диэлектрика – электромагнитное поле начинает проникать вглубь материала с образованием стоячих волн в образце. В настоящей работе рассмотрены условия возбуждения диэлектрического резонанса в ВТСП. Показано, что эффективность возбуждения зависит от разности частот диэлектрического резонанса и рабочей моды резонатора и в еще большей степени от расположения образца в поле СВЧ волны. Эффективность возбуждения увеличивается при перемещении образца из области максимального магнитного поля в сторону максимального электрического поля в резонаторе. Обнаружен эффект "затягивания" частоты рабочей моды резонатора на частоту диэлектрического резонанса. Полученные результаты подтверждают предположение о диэлектрическом характере резонанса и указывают на существенную роль в этом явлении пространственной дисперсии и нелинейности электрических свойств ВТСП, в значительной мере определяемых неустойчивостью этих материалов по отношению к переходу металл – диэлектрик.

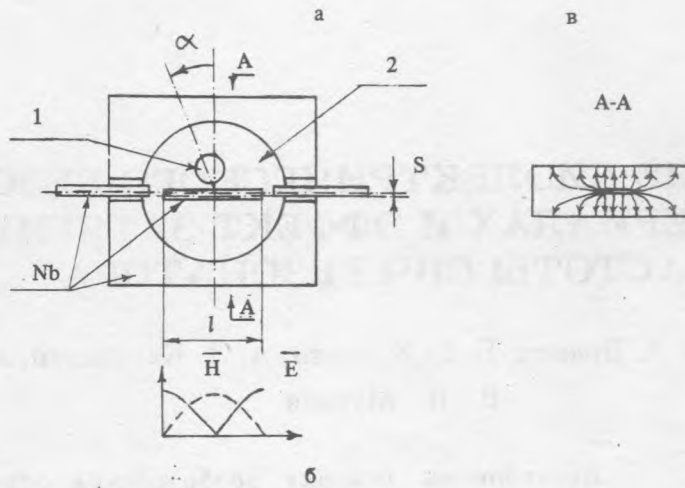


Рис. 1. Схема измерительного микрополоскового ниобиевого резонатора. а) Вид сверху: 1 – образец, 2 – тефлоновый диск. б) Распределение амплитуд электромагнитного поля вдоль резонатора. в) Конфигурация силовых линий в поперечном сечении.

Эксперименты выполнены с использованием микрополосковых СВЧ измерительных резонаторов [1, 2], позволяющих независимо менять резонансную частоту и поляризацию относительно образца поля рабочей моды резонатора. С целью увеличения добротности все отражающие стенки резонатора, включая резонансную полоску, изготовлены из ниобия. Длина полоски, на которой укладывается примерно полволны резонансного колебания рабочей моды,  $\approx 11$  мм, ширина 1,5 мм, толщина 15 мкм. Для уменьшения размеров резонатора его полость заполнена диэлектриком – двумя тефлоновыми дисками (диаметром 16 мм, толщиной 0,86 мм), между которыми расположена полуволновая полоска и элементы емкостной связи входной и выходной полосковых линий (рис. 1а). Измеряемые образцы в виде плоских таблеток диаметром 3,85 мм и толщиной 0,53 мм плотно вставлялись в отверстие, вырезанное в верхнем из тефлоновых дисков, который мог вращаться вокруг собственной оси в резонаторе (расстояние от центра отверстия до оси 2,5 мм). На рис. 1 схематически показаны области расположения пучностей электрического и магнитного полей при перемещении вдоль полуволновой полоски (б) и конфигурация силовых линий электрического поля в поперечном сечении резонатора (в). Поскольку резонансная частота рабочей моды резонатора определяется прежде всего длиной полоски  $l$ , а относительная величина амплитуд электрического и магнитного полей и их ориентация относительно образца – расположением образца в резонаторе, задаваемым расстоянием  $s$  от полоски до осевой линии и углом поворота  $\alpha$  тефлонового

диска – держателя образца, то изменяя соответствующим образом эти три геометрических параметра  $l$ ,  $s$ ,  $\alpha$ , можно в значительной мере независимо исследовать влияние на свойства образца резонансной частоты рабочей моды резонатора, напряженности полей и их ориентации относительно плоскости образца. Как видно из рис. 1в, при перемещении образца к краю и за край полуволновой полоски вектор амплитуды невозмущенного электрического поля делается все более наклонным по отношению к плоскости образца. Изменение угла  $\alpha$  от  $0^\circ$  (или  $180^\circ$ ) до  $90^\circ$  (или  $270^\circ$ ) переводит образец из области пучности магнитного поля в область пучности электрического поля. Варьирование параметров  $\alpha$  и  $s$ , очевидно, также приводит к некоторому изменению рабочей частоты резонатора, что использовалось для более тонкой перестройки резонансной частоты.

Исследованные образцы изготавливались из керамического материала  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  ( $x \lesssim 0,1$ ) и были идентичными во всех отношениях, за исключением того, что часть образцов имела защитное парафиновое покрытие, предохраняющее их поверхность от воздействия окружающей атмосферы [3]. Образцы обладали довольно высокими для керамики сверхпроводящими свойствами ( $T_c \simeq 92K$ ,  $\Delta T_c = 2 - 3 K$ ) и низким остаточным поверхностным сопротивлением ( $R_0 \simeq 10^{-3}$  Ом на частоте 9 ГГц).

Как отмечалось [1], новый резонанс, названный в [1, 4] диэлектрическим, возникает при замене образца из ниобия (или меди) на образец  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  в СВЧ резонаторе в условиях, когда частота рабочей моды резонатора оказывается достаточно близкой к частоте диэлектрического резонанса, и проявляется в виде интенсивной и широкой полосы в спектре пропускания резонатора вблизи частоты рабочей моды резонатора. Появление новой полосы сопровождается резким уширением самой рабочей моды резонатора и возрастанием интенсивности пропускания в ее максимуме. Интервал частот, в котором наблюдается явление, и полуширины резонансов приведены на рис. 2. В настоящей работе обнаружен также эффект резкого изменения характера зависимости частоты рабочей моды от параметров поля при изменении  $\alpha$ ,  $l$ ,  $s$  в области появления нового резонанса. В случае металлических образцов (например, медь), как видно из рис. 2а, частота рабочей моды  $f_{om}^m(\alpha)$  (кривая 1) монотонно возрастает с увеличением угла  $\alpha$  (при фиксированных  $l$  и  $s$ ). При замене образца на  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  в условиях появления диэлектрического резонанса ситуация резко меняется. По мере приближения  $\alpha$  к  $90^\circ$  (пучность электрического поля) частота рабочей моды  $f_{om}^{sc}(\alpha)$  (кривая 2) как бы застревает в районе частот  $\sim 9,2$  ГГц, отвечающих диэлектрическому резонансу (рис. 2в), и перестает зависеть от  $\alpha$  вплоть до углов, больших  $90^\circ$ , при которых образец выходит из области пучности электрического поля. При углах порядка  $180^\circ$ , соответствующих

пучности магнитного поля (см. рис. 1б), диэлектрический резонанс ослабевает, а кривые  $f_{om}^m(\alpha)$  и  $f_{om}^{sc}(\alpha)$  вновь сближаются. Обнаруженный эффект "затягивания" частоты рабочей моды на частоту диэлектрического резонанса особенно хорошо виден из кривой зависимости разности частот  $f_{om}^{sc} - f_{om}^m$  от угла (кривая 3 на рис. 2б).

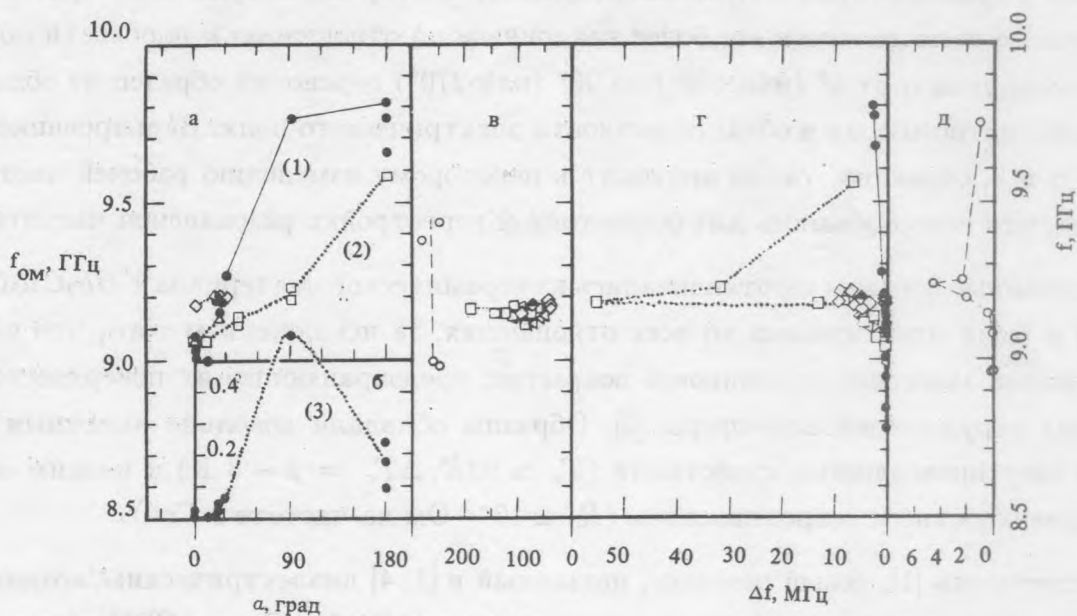


Рис. 2. Измеренные зависимости параметров резонансов в микрополосковом резонаторе с образцами из обычных металлов (• – медь, ниобий) и  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  ( $\Delta$ ,  $\square$ ,  $\diamond$  – образец с защитным покрытием,  $\circ$  – образец без защитного покрытия): а) зависимость резонансной частоты  $f_{om}$  рабочей моды резонатора от угла поворота  $\alpha$  (см. рис. 1); б) зависимость от угла поворота  $\alpha$  разности частот  $\delta f$  рабочей моды резонатора с металлическим образцом и образцом из ВТСП; в) зависимость полуширины  $\Delta f$  диэлектрического резонанса от резонансной частоты  $f$ ; г, д) зависимость полуширины  $\Delta f$  рабочей моды от ее резонансной частоты  $f$ .  $T = 5$  К.

Полученные данные о диэлектрическом резонансе и сопутствующих ему аномалиях в поведении частоты и полуширины рабочей моды резонатора в условиях возбуждения диэлектрического резонанса позволяют оценить компоненты диэлектрической проницаемости  $\tilde{\epsilon}(\omega) = \epsilon'(\omega) - i\epsilon''(\omega)$  ВТСП ( $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ) на сверхвысоких частотах и сделать некоторые общие заключения об особенностях этого явления. Не затрагивая вопроса о природе нового резонанса, по зарегистрированному сдвигу частоты рабочей моды  $\delta f_{om}/f_0 = (f_{om}^{sc} - f_{om}^m)/f_0 \sim \Delta X$  и увеличению ее полуширины  $\Delta f_{om}/f_0 = (\Delta f_{om}^{sc} - \Delta f_{om}^m)/f_0 \sim \Delta R$ , где  $f_0$  – резонансная частота (см. кривые на рис.

2 б, г) можно независимо определить компоненты действительной и мнимой частей поверхностного импеданса ВТСП  $Z = R + iX$  путем замены металлического образца с известным значением импеданса образцом из ВТСП (проводя измерения при различных углах  $\alpha$ ), учитывая идентичность граничных геометрических условий, определяющих характеристики рабочей моды. Из этих данных с учетом того, что  $Z = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon' - i\epsilon''}}$ , где  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума, непосредственно следует, что действительная часть компоненты тензора эффективной диэлектрической проницаемости  $\epsilon'_{eff}$  керамических ВТСП образцов для типа колебаний, соответствующего рабочей моде, является отрицательной величиной, и с переходом из области вблизи пучности магнитного поля ( $\alpha \simeq 15 - 20^\circ$ ) в область пучности электрического поля ( $\alpha \simeq 90^\circ$ ) модули  $\epsilon'_{eff}$  и тангенса потерь  $\text{tg } \delta = \epsilon''_{eff}/\epsilon'_{eff}$  уменьшаются:  $\epsilon'_{eff}$  от  $10^5$  до  $10^4$ ,  $\text{tg } \delta$  от величины порядка единицы до  $10^{-2}$ . Приведенные значения модулей  $\epsilon'_{eff}$  даже в условиях слабого проявления диэлектрического резонанса ( $\alpha \simeq 15 - 20^\circ$ ) оказываются существенно ниже, чем у классических сверхпроводников. Заметим, что они согласуются по величине с данными СВЧ измерений [5], выполненных при комнатной температуре.

Т а б л и ц а 1

*Длина резонансной полоски микрополоскового резонатора  $l$  и ее смещение  $s$  от оси резонатора при измерениях образца  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  с защитным покрытием (геометрическими символами показаны экспериментальные точки на рис. 2, соответствующие указанным условиям)*

$l, \text{ мм } s, \text{ мм}$	0,50	0,45	0,35	0,15
11,35	$\Delta$	$\Delta$	$\square$	$\blacklozenge$
11,15	$\diamond$			

Эти результаты и описанные особенности условий возбуждения диэлектрического резонанса могут быть поняты, исходя из представлений о свойствах системы носителей тока (состоящей из нормальной и сверхпроводящей компонент в случае сверхпроводниковой фазы) в кристаллах с конечной диэлектрической проницаемостью с учетом особенностей свойств металлооксидных сверхпроводников [4]. Образец ВТСП в области пучности магнитного поля ведет себя как хороший металл (сверхпроводник), обеспечивая достаточно высокую добротность рабочей моды резонатора. С переходом в область пучности электрического поля СВЧ волны металлические свойства образца ухудшаются и волна начинает глубже проникать в образец, что приводит к расстройке резонатора (сдвигу частоты и уширению рабочей моды). Уменьшение модулей действительной

и мнимой частей эффективной диэлектрической проницаемости эквивалентно уменьшению таких параметров носителей тока, как отношение их концентрации к массе и частота рассеяния. Эти изменения согласуются с соображениями [4] о том, что под действием электромагнитного поля СВЧ волны в результате неустойчивости ВТСП материалов по отношению к переходу типа металл – диэлектрик в них может происходить пространственное упорядочение носителей тока вдоль некоторых выделенных направлений, определяемых внешним электромагнитным воздействием, их "встраивание" в кристаллическую решетку. Неустойчивость к переходу металл – диэлектрик обуславливает нелинейность свойств и наличие пространственной дисперсии, проявляющейся, в частности, в тензорном (анизотропном) характере отклика на внешнее электромагнитное воздействие в макроскопически изотропных керамических образцах ВТСП. В пользу сказанного свидетельствует и сам факт возникновения диэлектрического резонанса. Характерные для него значения резонансной частоты и полуширины указывают на то, что соответствующая ему компонента тензора  $\tilde{\epsilon}_{eff}$ , обеспечивающая образование стоячих волн внутри образца, должна иметь положительную достаточно большую действительную часть и  $\text{tg } \delta \simeq 10^{-2}$ . В такой ситуации становится понятной и обнаруженная чувствительность эффектов к пространственной конфигурации полей. Описанное проявление диэлектрических свойств ВТСП, причем не только в сверхпроводящей, но и в нормальной фазе ( $T > T_c$ ), согласуется с представлениями [6–11, 4] о возможности образования сложных спиново-зарядовых состояний, характеризующихся наличием энергетической щели (не обязательно сверхпроводящей) в спектре одночастичных спиновых возбуждений в многочастичных фермиевских системах.

Работа выполнена при частичной поддержке Американского Физического Общества в рамках фонда Слоуна (Sloan Foundation Grant).

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Г о л я м и н а Е. М. и др. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 1-2, 14 (1993).
- [2] А н ш у к о в а Н. В. и др. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 2, 32 (1988).
- [3] Г о л я м и н а Е. М., Л ы к о в А. Н. Сверхпроводимость: физика, химия, техника, 2, 51 (1989).
- [4] К а р у з с к и й А. Л., К о в а л е н к о В. И., К р а п и в к а А. Е. Препринт ФИАН N 215, М., 1988; Препринт ФИАН N 217, М., 1988.
- [5] Щ е р б а к о в А. С. и др. ФНТ, 17, 1427 (1991).

- [6] Келдыш Л.В., Копаев Ю.В. ФТТ, **6**, 2791 (1964).
- [7] Келдыш Л.В. В сб.: Экситоны в полупроводниках, под ред. Б. М. Вула, Наука, М., 1971, с. 5.
- [8] Русинов А.И., Дочан Кат, Копаев Ю.В. ЖЭТФ, **65**, 1984 (1973); Копаев Yu. V. and Rusinov A. I. Phys. Lett., **A121**, 300 (1987).
- [9] Келдыш Л.В., Силин А.П. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 8, 33 (1975).
- [10] Anderson P. W. Proc. of the Enrico Fermi International School of Physics. Frontiers and Borderlines in Many-Particle Physics, North-Holland Publ. Co., 1987.
- [11] Kivelson S. A., Rokhsar D. S. and Sethna J. P. Phys. Rev., **B35**, 8865 (1987).

Поступила в редакцию 19 июня 1993 г.