

УДК 537.312.62

© 1991

ГИСТЕРЕЗИС ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВТСП-КЕРАМИКИ, ОБУСЛОВЛЕННОЙ ЗАХВАТОМ МАГНИТНОГО ПОТОКА

Л. К. Марков, В. В. Шнейцман

В образцах с захваченным магнитным потоком обнаружены участки немонотонности и гистерезис вольт-амперной характеристики (ВАХ) в области малых напряжений. Исследована связь характеристик петли гистерезиса с величиной захваченного потока, предысторией образца и условиями измерения его ВАХ. Объяснение наблюдаемых эффектов связывает их с преодолением слабо закрепленной частью захваченного потока сил пиннинга под действием транспортного тока и перераспределением его в объеме зерна.

Уже в первых работах по исследованию свойств ВТСП-керамик был обнаружен гистерезис критического тока в слабых магнитных полях (см., например, [1]). В дальнейшем этот эффект изучался подробно [2-4] и объяснялся появлением добавочной компоненты магнитного потока на слабых связях в межзеренных границах вследствие полей рассеяния захваченного в зернах магнитного потока. Позже, однако, это объяснение подверглось критике и было выдвинуто другое, связывающее полученную в опыте зависимость критического тока от магнитного поля с взаимодействием джозефсоновских вихрей с абрикосовскими вблизи межзеренной границы [5]. В работах [1-5] и близких к ним по тематике, как правило, авторы не интересовались вольт-амперными характеристиками (ВАХ), а ограничивались только измерениями критического тока j_c . В то же время, анализируя начальные участки ВАХ, можно судить о степени закрепления потока и его движении в ВТСП-керамике. Взаимодействие транспортного тока с захваченным магнитным потоком может приводить к перераспределению последнего в зернах (движению абрикосовских вихрей вблизи границы зерна и изменению характеристик их взаимодействия с джозефсоновскими вихрями в границах). Это может проявиться не только в виде смещения ВАХ под влиянием захваченного потока, но и в изменении формы ВАХ.

В настоящей работе исследовались начальные участки ВАХ образцов с захваченным потоком. Варьировались структура и состав образцов, а также способ введения в них магнитного поля. В результате на большом числе образцов удалось обнаружить гистерезис ВАХ в области малых напряжений. Свойства петли гистерезиса, ее форма, чувствительность к предыстории явились основным предметом исследования в настоящей работе.

Опыты проводились на образцах из керамики $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, полученной из порошков Y_2O_3 , CuO и $BaCO_3$ по обычной керамической технологии. Температура перехода T_c для различных образцов составляла 88—93 К, ширина перехода $\Delta T_c = 1 \div 10$ К, критический ток при 77 К $j_c = 1 \div 200$ А/см². Для получения ВАХ на образец наносились индиевые контакты. Запись ВАХ осуществлялась двухкоординатным самописцем. Образцы ВТСП-керамик имели форму прямоугольного параллелепипеда с размерами от $2 \times 2 \times 6$ до $4 \times 4 \times 10$ мм и располагались так, что длинная

его сторона была направлена вдоль оси катушки с током, создававшей магнитное поле. Транспортный ток в образце был также параллелен его оси. Вследствие сложного характера взаимодействия тока и магнитного поля в сверхпроводящей керамике их взаимное расположение не сказывается сколько-нибудь существенно на зависимости критического тока от напряженности магнитного поля [2]. Геометрия опыта была выбрана из соображений экспериментальной простоты.

Результаты опытов и их обсуждение¹

Если образец охладить ниже T_c в магнитном поле, величина напряженности которого H^* обеспечивает захват образцом магнитного потока, то, как показали наши измерения, его ВАХ, снятая при возрастании тока,

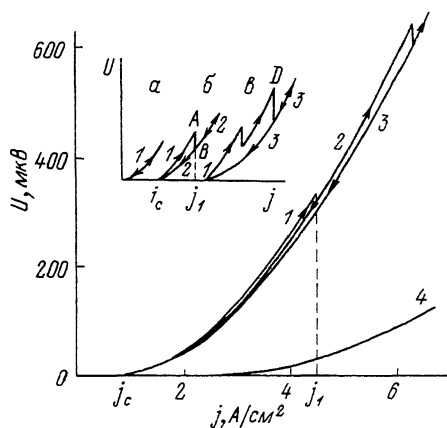


Рис. 1. Гистерезис ВАХ керамики — $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ при $H=0$ после охлаждения ее до 77 К в магнитном поле $H=50$ Э.

Отдельно на схеме показаны три варианта ВАХ при возрастании и убывании тока в зависимости от величины предельного тока ВАХ j_k : $j_k < j_A$ (а), $j_A \leq j_k < j_D$ (б) и $j_k \geq j_D$ (в). 1—3 — разные ветви ВАХ, 4 — ВАХ образца без захваченного потока. Возрастание и убывание тока показаны стрелками.

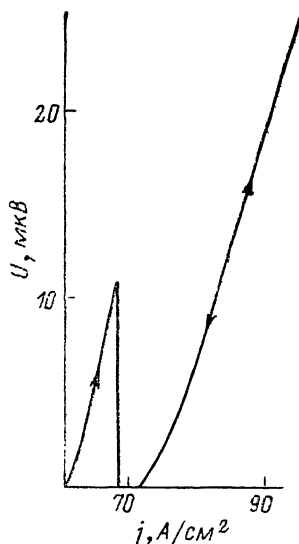


Рис. 2. Гистерезис ВАХ керамики $YBa_2Cu_3O_{7-x} + 10$ вес.% Ag после охлаждения в поле $H=25$ Э до 77 К.

как правило, не является монотонной (кривая 1 на рис. 1), на ней может наблюдаться один или несколько срывов. Возврат происходит по плавной кривой, т. е. ВАХ, измеренная при убывании тока, монотонна, причем после каждого срыва наблюдается ее новая ветвь (кривые 2, 3 на рис. 1). Таким образом, для образцов с захваченным потоком наблюдается гистерезис ВАХ.

Заметим, что похожие по внешним признакам эффекты наблюдались в ВТСП ранее [6–9]. Так, например, в [6, 7] описан гистерезис ВАХ мостиков и микроконтактов, наблюдавшийся при напряжениях (смещениях), примерно на три порядка больших, чем в нашем случае. Кроме того, в [6, 7] направление движения по петле ВАХ оказывалось противоположно наблюдаемому нами: в [6, 7] восходящей ветви петли соответствует меньшее значение сопротивления образца, чем нисходящей; как следует из рис. 1, это направление обратное. Такое поведение ВАХ в наших опытах

¹ В измерениях принимал участие выпускник физико-технической школы при ФТИ: им. А. Ф. Иоффе АН СССР А. Н. Кудымов.

(малые значения напряжений, а следовательно, и рассеиваемой мощности, и падение сопротивления в момент скачка напряжений) уменьшает, на наш взгляд, возможности проявления эффектов, связанных с разогревом несверхпроводящих участков в ВТСП, что вполне вероятно для мостиков и микроконтактов [6, 7].

Немонотонность ВАХ, но без гистерезисных эффектов описана также в [8, 9]. Нами исследовался гистерезис ВАХ различных иттриевых керамик, в том числе легированных серебром (до 10 вес.%). На некоторых образцах срыв ВАХ наблюдался при токах, близких к критическому, так что образец мог «восстанавливать» сверхпроводящее состояние (рис. 2). В этом случае можно говорить о двух значениях критического тока для одного и того же образца.

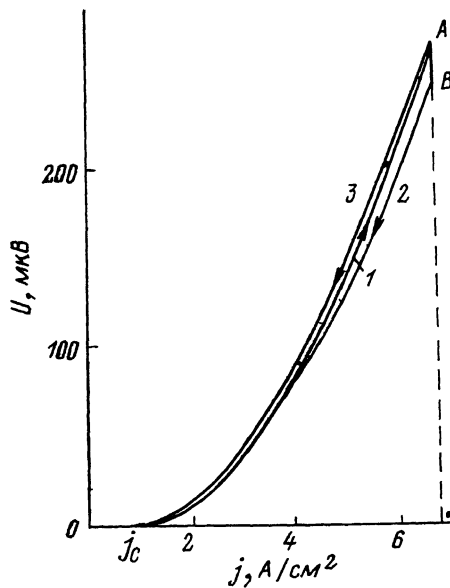


Рис. 3. ВАХ при 77 К в отсутствие магнитного поля керамики $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ после охлаждения ее в поле $H=25$ Э при возрастании (1) и убывании (2) тока. ВАХ при убывании тока той же керамики при $H=2.6$ Э (3).

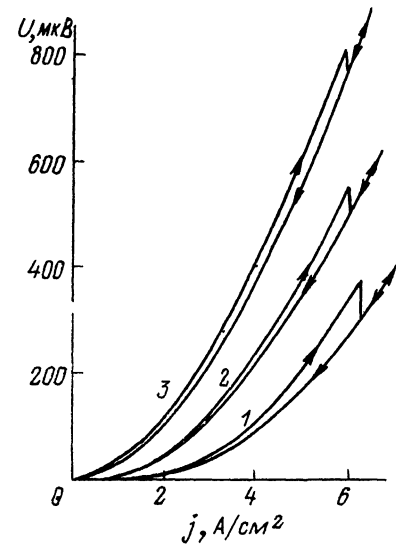


Рис. 4. Влияние величины захваченного магнитного потока на петлю гистерезиса ВАХ при 77 К. Охлаждение образца $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ в поле 25 (1), 50 (2) и 150 Э (3).

Рассмотрим гистерезис ВАХ, обусловленный захваченным потоком, более подробно, ограничившись только первым скачком напряжения ВАХ.

Как видно из рис. 1, первому возрастанию тока соответствует кривая 1, затем при токе j_1 происходит срыв из точки А на ней в точку В, лежащую на кривой 2. При дальнейшем увеличении или уменьшении тока в области $j > j_1$, а также при уменьшении тока ниже j_1 ВАХ соответствует кривая 2, которая при токах, близких к критическому j_c , становится практически неразличимой с кривой 1. Поэтому в отличие от верхней точки петли гистерезиса, которая измеряется достаточно четко, нижняя его точка в некоторой степени условна, так как определяется, как и критический ток, чувствительностью используемой аппаратуры и выбранным порогом измерения напряжений (в нашем случае $U=1$ мкВ).

Отсутствие гистерезиса ВАХ на образцах без захваченного потока позволяет предположить его обусловленность процессами перераспределения потока в дефектной структуре керамики. Как отмечалось выше, гистерезис критического тока ВТСП в циклически изменяющихся магнитных полях можно объяснить захватом потока дефектами зерна, который приводит к влиянию на j_c направления изменения внешнего магнитного

поля. Таким образом, сверхпроводник с захваченным потоком представляет собой сетку слабых связей, звенья которой находятся под воздействием собственного локального поля. Величина критического тока и форма начального участка ВАХ определяются распределением захваченного потока по слабым связям в зерне. Перераспределение потока, естественно, должно сказаться на ВАХ. Наблюдавшийся нами скачок напряжения на образце при токе j_1 можно объяснить срывом части захваченного магнитного потока с мест пиннинга под влиянием транспортного тока и установлением нового устойчивого при данном токе j_1 состояния. Можно попытаться компенсировать скачок напряжения ВАХ при токе j_1 внешним магнитным полем, т. е. добавить некоторое ΔH так, чтобы

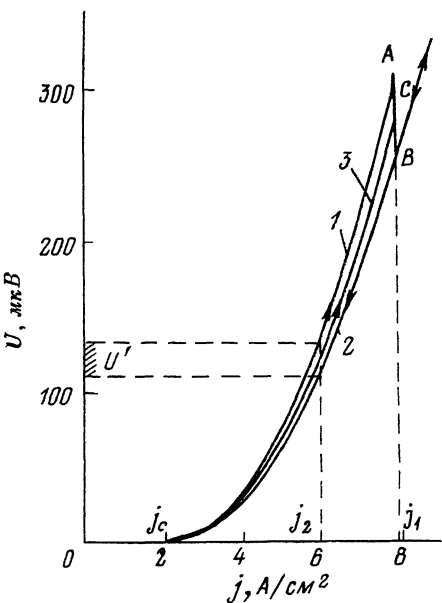


Рис. 5. Гистерезис ВАХ при циклах транспортного тока $0 \rightarrow 8 \rightarrow 0$ (1, 2) и $8 \rightarrow 1 \rightarrow 8$ А/см² (2, 3).

Образец $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ охлаждался в поле $H=25$ Э. Условия опыта: $H=0$, $T=77$ К.

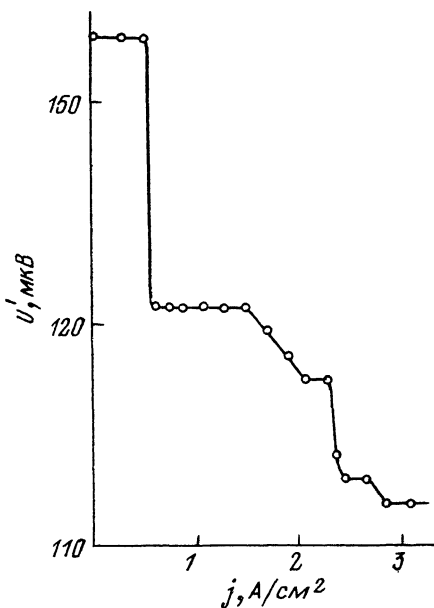


Рис. 6. Зависимость напряжения U' при заданном токе $j_2=6$ А/см² от значения тока j' , начиная с которого снимается восходящая ветвь ВАХ (см. рис. 5).

снова из точки B на кривой 2 (рис. 1) подняться на кривую 1 в точку A . Однако, как видно из рис. 3, ВАХ на участке от j_c до j_1 не совпадает с исходной. Это свидетельствует о том, что внешнее поле и подвижная часть захваченного потока распределены в образце по-разному.

Как показали наши исследования, срыв потока происходит под действием транспортного тока, величина которого определяется структурными особенностями материала и не зависит от величины магнитного поля, захваченного образцом. Данные, представленные на рис. 4, показывают, что значение тока срыва j_1 в первом приближении одинаково для магнитных полей различной напряженности, в которых охлаждался образец. При уменьшении этого поля критический ток приближается к току срыва. Если значение тока срыва j_1 больше критического тока j_{c0} , измеренного в отсутствие внешнего и захваченного потока, то для наблюдения гистерезиса достаточно было охладить образец в поле, напряженность которого превышала H^* . Однако когда ВАХ вблизи j_1 имела малый наклон к оси j , то реальное пороговое поле было несколько выше H^* , что, вероятно, обусловлено чувствительностью измерительной аппаратуры и некоторыми шумовыми эффектами, о которых будет сказано ниже. Если же справедливо $j_1 < j_{c0}$, то, очевидно, для наблюдения гистерезиса ВАХ необходимы были поля, превышающие некоторое $H' > H^*$. Величину

H' можно определить из условия $j_1 = j_c(H')$, где $j_c(H)$ — зависимость критического тока от напряженности поля, в котором охлаждался образец.

В описанных выше опытах при измерении ВАХ внешнее поле отсутствовало, рассматривалось только влияние захваченного потока. Наложение внешнего поля затрудняло наблюдение гистерезиса. При сравнительно небольших внешних полях (как правило, не превышавших нескольких десятков эрстед для наших образцов) срыв ВАХ при токе j_1 и гистерезис имели место, однако дальнейшее увеличение напряженности внешнего поля приводило к подавлению гистерезиса. Так, если охлаждать образец, ВАХ которого приведена на рис. 1, ниже T_c в поле $H = 25 \div 50$ Э (при этом отчетливо выявляется гистерезис ВАХ), а затем увеличить H до 100 Э, то гистерезис ВАХ не наблюдается. Очевидно,

большое внешнее поле, проникая в зерно, препятствует перераспределению слабосвязанной части замороженного потока под действием транспортного тока, т. е. способствует его закреплению.

Заметим также, что если образец охлаждать ниже T_c в нулевом поле, а затем ввести магнитное поле в ВТСП и измерить ВАХ, то обнаружить срывы, подобные описанным выше, значительно сложнее. Вероятно,

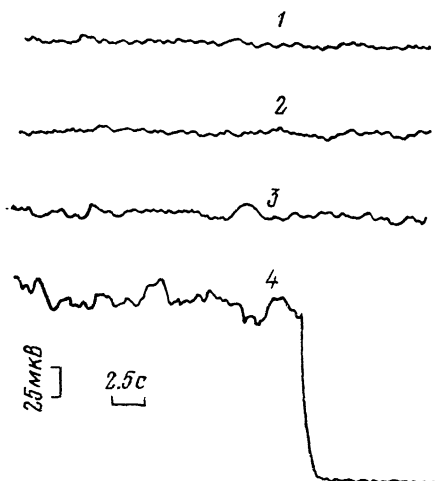


Рис. 7. Колебания напряжений на образце $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ при постоянном значении тока 215 (1), 253 (2), 275 (3), 286 мА (4).

различные пути дрейфа потока влияют на его закрепление, и в последнем случае уменьшается как величина полного захваченного потока (если сравнивать охлаждение в поле и без него для заданного H), так и его наиболее слабосвязанная доля, перераспределение которой в образце обуславливает гистерезис ВАХ.

Для большинства исследованных нами образцов гистерезис ВАХ был обратимым, т. е. после уменьшения тока до нуля при повторном его увеличении наблюдалась точно такая же петля гистерезиса, как и при первом измерении. Однако некоторые образцы требовали выдержки в отсутствие тока для восстановления исходной ВАХ. Время релаксации для отдельных образцов составляло десятки минут.

Если петля гистерезиса была достаточно широкая, то можно было наблюдать промежуточные ветви ВАХ, находящиеся внутри основной петли (рис. 5). Для их получения нужно было уменьшать ток после срыва не до нуля, а до некоторого значения j' . При этом, чем меньше j' , тем ближе восходящая ветвь ВАХ к исходной кривой 1. После срыва при токе j_1 дальнейшее изменение напряжений, как и раньше, происходит по кривой 2. Будем характеризовать промежуточные ветви ВАХ значением напряжения U' (j_2), где j_2 лежит в пределах петли гистерезиса, так что $j_c < j_2 < j_1$.

На рис. 6 приведена зависимость U' от величины тока j' , определяющего положение промежуточной ветви ВАХ. Видно, что зависимость U' (j') не является плавной, на ней имеется несколько ступенек, что свидетельствует о дискретном характере изменений в распределении захваченного образцом магнитного потока. Очевидно, в рассматриваемом диапазоне изменений транспортного тока существует несколько квазиустойчивых состояний, в которых может находиться подвижная часть захваченного магнитного потока. Основная часть захваченного потока

Значения средних квадратичных отклонений σ , коэффициентов вариации σ/\bar{U} для напряжений U в точках ВАХ при заданном токе I для образца керамики $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

| I , мА | σ , мкВ | σ/\bar{U} , % |
|----------|----------------------|----------------------|
| 215 | 1.50 | 0.19 |
| 241 | 2.00 | 0.20 |
| 253 | 2.85 | 0.26 |
| 264 | 3.07 | 0.26 |
| 275 | 3.35 | 0.26 |
| 286 | 9.35 | 0.67 |
| | $\underline{0.15^*}$ | $\underline{0.01^*}$ |

* В числителе приведены значения до срыва, в знаменателе — после срыва.

при этом остается неподвижной. Новое положение потока устойчиво только в присутствии тока, величина которого ограничена с нижней стороны краем соответствующей ступеньки зависимости $U'(j')$, а с верхней, очевидно, — значением j_1 . Возмущающая сила, обуславливающая переход с ветви 1 или одной из промежуточных ветвей ВАХ на кривую 2, создается транспортным током. Возврат, т. е. переход на кривую 1 или промежуточную ветвь ВАХ, вызван воздействием неподвижной части закрепленного потока на его подвижную часть, которая при уменьшении тока стремится перейти в исходное устойчивое состояние. Как уже отмечалось, последний процесс для ряда образцов имел явно выраженную временную зависимость, что позволяет предположить его релаксационную природу. Нам также удалось обнаружить временные эффекты и на восходящей ветви ВАХ, т. е. при переходе с кривой 1 на кривую 2. Так, если записывать ВАХ в режиме возрастания тока и зафиксировать некоторое значение тока, близкое, но не превосходящее j_1 , то через некоторое время t самопроизвольно происходили срыв напряжений и переход из точки на ветви 1 в точку на ветвь 2. Так, например, для одного из образцов удавалось наблюдать скачок напряжений при различных токах в интервале 0—260 с. Во время выдержки при постоянном токе видны колебания напряжений (рис. 7), амплитуда которых резко возрастает при приближении тока к значению тока срыва j_1 . Величины средних квадратичных отклонений и коэффициентов вариации для напряжений в различных точках ВАХ образце $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ приведены в таблице.

Заметим, что даже наибольшие из измеренных средние амплитуды шума, как видно из таблицы, составляют всего около 6 % от величины скачка ВАХ (изменение напряжений в скачке для данного образца $\Delta U = 144$ мкВ). Характерно, что переменная составляющая становится крайне малой сразу после срыва и не изменяется при следовании по кривой 2 как в сторону меньших, так и в сторону больших токов. С нашей точки зрения, такое поведение может быть связано с обратимыми колебаниями системы около положения равновесия в ожидании флуктуации, позволяющей ей преодолеть активационный барьер и перейти в новое устойчивое состояние.

Таким образом, в работе обнаружен и исследован гистерезис ВАХ сверхпроводящей керамики с захваченным магнитным потоком. Продемонстрирована зависимость положения петли от стартового тока при измерении ВАХ. Высказано предположение о связи гистерезиса ВАХ с перераспределением слабозакрепленной части потока в объеме зерен под действием транспортного тока. Характеристики петли, следовательно, определяются дефектной структурой. Трудность здесь, однако, заключается в том, что в настоящее время не известно, на каких именно дефектах происходит закрепление магнитного потока в керамике, какова сила пиннинга и чем обусловлено различие в поведении образцов разных партий.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Kwasnitza K., Jakob B., Vecsey G. // Proc. European Workshop on High T_c Superconductors and Potential Application. Genova, Italy, 1987. P. 389.
- [2] Evetts J. E., Glowacki B. A. // Cryogenics. 1988. V. 28. N 10. P. 641—649
- [3] Kwasnitza K., Widmer Ch. // Cryogenics. 1989. V. 29. N 11. P. 1035—1040
- [4] Yang Y., Beduz C., Ashworth // Cryogenics. 1990. V. 30. N 7. P. 618—622.
- [5] Блинов Е. В., Сонин Э. Б., Таганцев А. К., Трайто К. Б. // СФХТ. 1991. Т. 4. № 3. С. 501—506.
- [6] Рыбальченко Л. Ф., Фисун В. В., Бобров Н. Л., Космына М. Б., Мошков А. И., Семиноженко В. Н., Янсон И. К. // ФНТ. 1989. Т. 15. № 1. С. 95—100.
- [7] Бакуменко В. Л., Бекешко Е. Д., Курбатов Л. Н., Михасько В. И. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. № 18. С. 15—17.
- [8] Yamada Y., Nomura S., Ando K., Horigami O. // Cryogenics. 1990. V. 30. N 7. P. 643—646.
- [9] Миронов О. А., Чистяков С. В., Оболенский Н. А., Бондаренко А. В., Кадигробов А. Н. // Тез. докл. III Всес. совещ. по высокотемпературной сверхпроводимости (Харьков, апрель 1991 г.). Харьков, 1991. Т. 2. С. 25—26.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию
17 июня 1991 г.