

УДК 537.312.62

©1994

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ГИСТЕРЕЗИС ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ $YBa_2Cu_3O_{7-x}/Ag$ (10 ВЕС.%)

Б.И.Смирнов, Т.С.Орлова

В керамике $YBa_2Cu_3O_{7-x}/Ag$ (10 вес.%) обнаружен гистерезис вольт-амперной характеристики (ВАХ), демонстрирующий при некотором токе I_f больше критического переход со срывом с одной ветви вольт-амперной кривой на другую, и изучено влияние электрического поля на ВАХ в этом случае. Установлено, что эффект поля наблюдается только на начальном (верхнем) участке ВАХ, причем характер эффекта зависит от того, включается ли поле до начала эксперимента или в процессе измерения ВАХ. Показано, что эффект поля при наличии гистерезиса ВАХ не является обратимым. Считается, что наблюдаемые эффекты связаны с изменением типа слабых связей на границах зерен в керамике при введении в нее серебра.

В [1] было обнаружено влияние электрического поля в системе электрод-диэлектрик-сверхпроводник на критический ток и вольт-амперные характеристики (ВАХ) ВТСП-керамик. Наблюдаемый эффект поля является обратимым, качественно отличается от эффекта поля в ВТСП-пленках и существенно зависит от состава и технологии приготовления керамики [1-4].

Что касается эффекта поля в очень тонких пленках, то обычно он объясняется изменением концентрации носителей в тонком приповерхностном к электроду слое толщиной порядка 5Å (см. обзоры [5,6]). В то же время природа эффекта поля в ВТСП-керамиках до сих пор остается неясной. Имеющиеся экспериментальные данные позволяют полагать, что в этом случае он скорее всего связан с воздействием поля на слабые связи в границах зерен, однако для его уточнения необходимо проведение дальнейших экспериментов.

В настоящей работе были проведены специальные исследования эффекта поля в ВТСП-керамиках, демонстрирующих так называемый гистерезис на вольт-амперных кривых.¹ Ранее [7,8] гистерезис на ВАХ был обнаружен и исследован в ВТСП-керамиках $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ после охлаждения их до 77 К в магнитном поле, т.е. с захваченным магнитным потоком. Оказалось, что петля гистерезиса начинается вблизи критического тока I_c и занимает диапазон до некоторого тока I_f , при котором происходит скачок (падение) напряжений и вольт-амперная кривая переходит как бы на новую ветвь. При уменьшении тока

¹ В некоторых измерениях принимал участие студент С.-Петербургского государственного технического университета А.Н. Кудымов.

вольт-амперная кривая плавно возвращается в область I_c по этой новой ветви. Появление петли гистерезиса авторами [7,8] связывается с перераспределением части захваченного магнитного потока под действием транспортного тока.

Нами в ходе работы экспериментально было обнаружено, что в некоторых керамиках подобный гистерезис ВАХ наблюдается и без предварительного охлаждения образца в магнитном поле. Исследования эффекта электрического поля в подобных керамиках показали, что указанный эффект наблюдается лишь на начальной («верхней») ветви ВАХ, причем имеет своеобразный характер. На «нижней» ветви ВАХ эффект поля не наблюдается.

1. Экспериментальная методика

Исследовалась ВТСП-керамика $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ($x \simeq 0.07$), легированная серебром (10 вес.%). Технология получения такой керамики была подобна описанной в [9], с той лишь разницей, что серебро в исходную смесь вводилось не в виде порошка $AgNO_3$, а в виде металлического мелкодисперсного порошка. Критическая температура полученных образцов T_c была около 91 К, плотность критического тока $j_c \simeq 80 \text{ A/cm}^2$. Для измерения ВАХ использовались образцы с размерами примерно $1.5 \times 2 \times 4 \text{ mm}$, на боковую поверхность которых наносились четыре индиевых контакта. Перед нанесением контактов с поверхности образца удалялся слой толщиной около 0.2 мм.

Эксперимент по влиянию внешнего электрического поля на ВАХ образцов проводился в системе электрод-диэлектрик-сверхпроводник аналогично [1] при 77 К, т.е. при $T < T_c$. Высокое положительное или отрицательное напряжение U прикладывалось к металлическому электроду, который был изолирован от керамического образца фторопластовой пленкой толщиной $t = 50 \text{ }\mu\text{m}$. Через токовые контакты, один из которых был заземлен, пропускался транспортный ток I и измерялось напряжение V на потенциальных контактах. Запись ВАХ осуществлялась двухкоординатным самописцем. Значение критического тока определялось по уровню $1 \text{ }\mu\text{V/mm}$. Ток утечки в системе при максимальном напряжении $U = 6 \text{ kV}$ не превышал 3 нА, в то время как транспортный ток мог достигать нескольких ампер.

При исследовании эффекта электрического поля последнее могло включаться как до начала эксперимента, так и в процессе измерения ВАХ при некотором значении I . Аналогичные опыты могли быть проведены и в магнитном поле H , которое было направлено параллельно электрическому полю и создавалось катушкой с током.

2. Результаты и их обсуждение

При исследовании вольт-амперных кривых керамических образцов $YBa_2Cu_3O_{7-x}/Ag$ оказалось, что гистерезис на ВАХ может наблюдаться и без предварительного охлаждения этих образцов в магнитном поле, как это делалось в [7,8].

Пример такой кривой представлен на рис. 1. Ее особенности заключаются в следующем. Вначале, как обычно, в процессе возрастания транспортного тока при некотором критическом токе I_c появляются

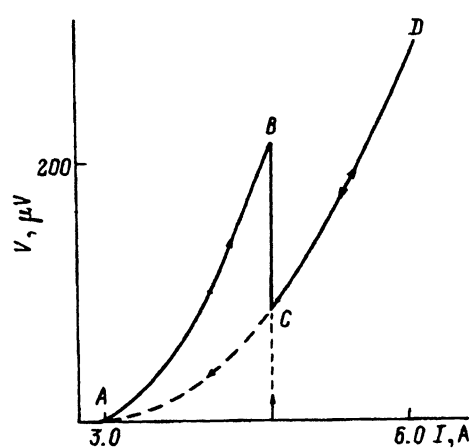


Рис. 1. Гистерезис ВАХ керамики $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}/\text{Ag}$ при $T = 77 \text{ K}$, $H = 0$.

напряжения (точка А), которые нарастают с ускорением по мере увеличения I . Далее, однако, при некотором токе $I_f > I_c$ происходит резкий спад напряжений от величины V_1 (точка В) до значения V_2 (точка С), после чего напряжения вновь возрастают с увеличением I , но уже по новой кривой CD . При убывании тока вольт-амперная кривая повторяет участок DC , а затем монотонно продолжается в область точки А (участок CA). Примечательно, что если, вернувшись в точку А, вновь начать увеличивать ток, то ВАХ будет повторять участок ACD , а не ABC . Если же ток отключить и выдержать образец некоторое время (около 20 min), то первоначальный участок восстанавливается и ВАХ вновь следует по пути $ABCD$ со срывом при $I'_f \approx I_f$. Что касается величины I_f , то оказывается, что она зависит от времени воздействия на образец тока I , т.е. переход на новую ветвь (срыв) может происходить и при $I < I_f$, но со временем тем большим, чем меньше I . Зависимость этого времени от величины транспортного тока для образцов с захваченным магнитным потоком получена в [8].

Необходимо еще отметить (и это будет показано далее, что при измерении ВАХ в магнитном поле H также наблюдается гистерезис, причем I_f практически не зависит от H , хотя величина скачка $\Delta V_{1,2} = V_1 - V_2$ при этом уменьшается.

Рассмотрим теперь результаты по влиянию электрического поля на ВАХ при наличии гистерезиса. Начнем с экспериментов, в которых магнитное поле отсутствовало и электрическое поле включалось до начала опыта, т.е. при $I = 0$. В этом случае оказывается, что вольт-амперные кривые в поле $E = \pm 120 \text{ MV/m}$ на своих начальных участках идут ниже, чем ВАХ при $E = 0$ (кривые 2 и 2' на рис. 2). Далее же, как и в отсутствие поля, при некотором токе I_f^e происходит срыв (или ряд срывов), после чего кривые в поле и без поля совпадают. При этом, как правило, $I_f^e \gtrsim I_f$. При убывании тока ВАХ следуют по кривой DCA независимо от величины E . Гистерезис ВАХ и эффект поля могут быть вновь восстановлены путем «отдыха» образца в течение некоторого времени при $I = 0$.

Для определения возможного эффекта электрического поля на нижней ветви ВАХ (участок AC) был специально поставлен следующий эксперимент. Вначале исходный образец керамики $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}/\text{Ag}$

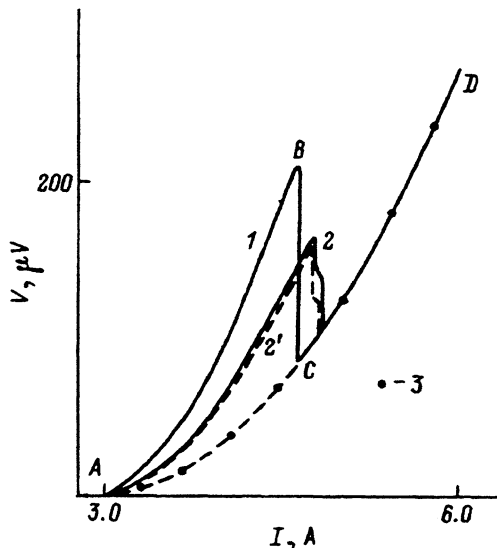


Рис. 2. Эффект электрического поля в керамике $YBa_2Cu_3O_{7-x}/Ag$ с гистерезисом ВАХ при 77 К.

Электрическое поле E включалось до начала эксперимента и равнялось 0 (1), -120 (2) и 120 MV/m (2'). На кривой 3 поле $E = -120$ MV/m включалось в области точки А после предварительного испытания образца по пути $ABCDCA$.

был испытан без поля по гистерезисному пути $ABCDCA$, а затем в области точки А было включено электрическое поле $E = -120$ MV/m и получена кривая $V(I)$. Как оказалось, включение поля в данном случае не приводит к какому-либо эффекту, и ВАХ в поле достаточно хорошо воспроизводит кривую ACD (кривая 3 на рис. 2).

Эксперименты, подобные описанным выше, были проведены также и при наличии внешнего магнитного поля H . Некоторые из полученных результатов представлены на рис. 3. Видно, что в магнитном поле общая картина качественно повторяется, но с уменьшением эффекта электрического поля. Примечательно, что величина тока срыва I_f практически не зависит от H .

Ранее [1-3] при изучении эффекта электрического поля проводились эксперименты по включению этого поля при некотором напряжении V на вольт-амперной кривой. Было установлено, что включение поля $E \approx \pm 120$ MV/m приводит к повышению напряжений с последующим их восстановлением при снятии поля. В настоящей работе электрическое поле также прикладывалось не только до эксперимента, но и в процессе измерения ВАХ. Как оказалось, в этом случае в момент включения поля на участке AB , т.е. при $I < I_f$, происходит срыв, после чего ВАХ так или иначе переходит на нижнюю ветвь ACD (кривые 2-4 на рис. 4). Включение поля после обычного срыва при I_f , т.е. на участке CD , на ВАХ не сказывается. Существенно еще отметить, что эффект электрического поля при наличии гистерезиса ВАХ является необратимым, т.е. при снятии поля уровень напряжений не восстанавливается. Более того, выключение на участке AB поля, установленного еще до начала эксперимента, также приводит не к увеличению напряжений, а к срыву на нижнюю ветвь ВАХ. Качественно подобные эффекты поля наблюдаются и во внешнем магнитном поле.

Иначе говоря, эффект поля для образцов с гистерезисом ВАХ можно наблюдать только в интервале токов от I_c до I_f . Естественно, что если $I_f < I_c$, то указанный эффект не проявляется, но его можно вы-

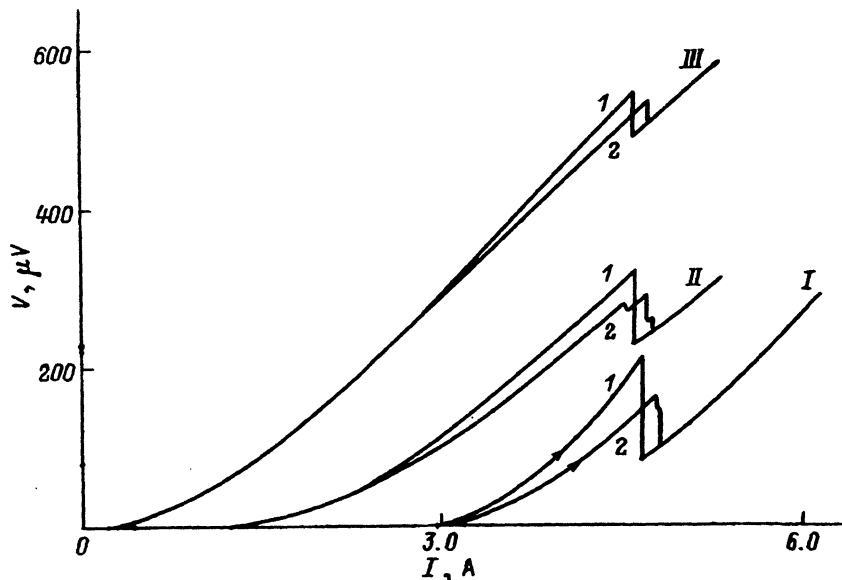


Рис. 3. Влияние электрического поля на ВАХ керамики $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}/\text{Ag}$ в различных магнитных полях.

H , Oe: I — 0, II — 11, III — 33; E , MV/m: 1 — 0, 2 — -120.

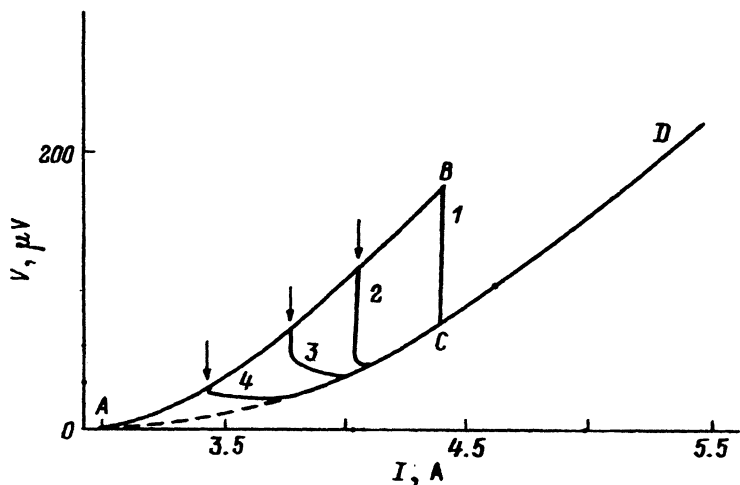


Рис. 4. Эффект электрического поля в керамике $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}/\text{Ag}$ с гистерезисом ВАХ при 77 К и $H = 0$.

E , MV/m: 1 — 0, 2-4 — -120. Моменты включения поля отмечены стрелками.

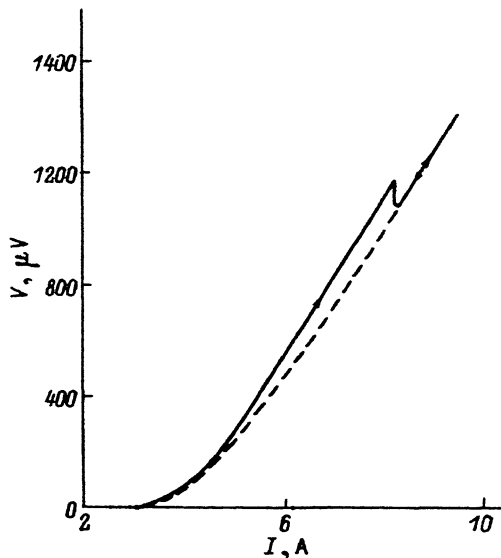


Рис. 5. Гистерезис ВАХ керамики $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}/\text{Ag}$ при 77 К и $H = 0$ в случае $I_c \ll 1$.

явить, понижая критический ток за счет магнитного поля до выполнения соотношения $I_c(H) < I_f$. Если же $I_c \ll I_f$, то для наблюдения гистерезиса приходится фиксировать участок ВАХ до очень больших напряжений, причем величина $\Delta V_{1,2}/V$ в этом случае, как правило, невелика (рис. 5). Очень интересная ситуация может еще наблюдаться при условии существенного неравенства критических токов для разных ветвей ВАХ. Если $I_{c1} < I_{c2}$ и $I_{c1} < I_f < I_{c2}$, то после срыва ВАХ образец вновь будет переходить в сверхпроводящее состояние, как это и наблюдалось в [9] для образцов $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}/\text{Ag}$ с захваченным магнитным потоком.

Для количественного сопоставления эффектов электрического поля в керамиках $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ и $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}/\text{Ag}$ (10 вес. %) без выраженного гистерезиса ВАХ в изучаемой области токов $I > I_c$ на рис. 6 приведены вольт-амперные кривые соответствующих образцов без поля и в поле $E = -120 \text{ MV/m}$. Видно, что в чистой керамике (кривые 1 и 1') под действием поля происходит увеличение критического тока и существенное понижение сопротивления R при $I > I_c$ (величина $\Delta R_e/R = \Delta V_e/V$ меняется вдоль ВАХ от 100 до 40 %). В керамике же с серебром эффект поля выражен очень слабо (кривые 2 и 2').

Итак, эксперименты показывают, что в чистой керамике $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ электрическое поле приводит к существенному изменению критического тока и сопротивления образца при $I > I_c$, причем эффект поля является обратимым [1-3]. Ведение в чистую керамику серебра часто приводит к появлению гистерезиса ВАХ в области транспортных токов, несколько превышающих критический. В этом случае на образцах композитной керамики $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}/\text{Ag}$ эффект электрического поля наблюдается только на верхней ветви ВАХ и является необратимым, демонстрируя тенденцию к срыву на нижнюю ветвь ВАХ. На нижней ветви ВАХ эффект поля вообще отсутствует. В случае отсутствия

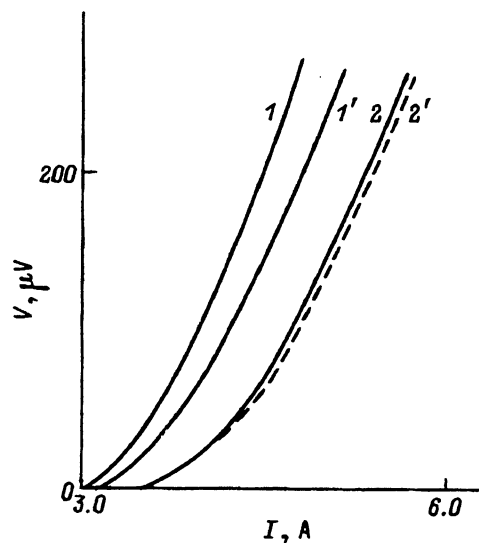


Рис. 6. Эффект электрического поля в чистой керамике $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (1, 1') и в керамике $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}/\text{Ag}$ (10 вес.%) (2, 2') при отсутствии гистерезиса ВАХ.
 E , MV/m: 1, 2 — 0, 1', 2' — -120.

гистерезиса ВАХ до значений $I \gg I_c$ эффект поля в композитных керамиках выражен очень слабо.

Остановимся кратко на возможной природе наблюдаемых эффектов с учетом того, что в ВТСП-керамиках транспортные характеристики (критический ток и ВАХ) определяются межзеренными слабыми связями типа сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник ($S-I-S$) и сверхпроводник-нормальный металл-сверхпроводник ($S-N-S$), а также точечными контактами — микронными перемычками между зернами [10]. Начнем с данных о возможном изменении характера этих связей при добавлении в чистую керамику серебра.

Согласно имеющимся экспериментальным данным (см., например, [11,12]), введенное в керамику $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ серебро находится в образце между гранулами, заполняя поры и покрывая границы зерен. В процессе спекания серебро очищает поверхность зерен за счет химической реакции с соединениями, находящимися на этой поверхности (например, BaCuO_2 , BaCO_3), и практически не диффундирует внутрь фазы $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$. В результате система точечных контактов и слабых связей $S-I-S$ типа в $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ может замениться на систему связей типа $S-N-S$ с большей площадью хорошего контакта между зернами [11,13]. Указанные перестройки приводят к изменению транспортных характеристик образцов (например, увеличению критического тока [11,12] и изменению его температурной зависимости вблизи T_c [13]) и их реакции на различного рода воздействия. В частности, из-за уменьшения числа точечных контактов при введении серебра пропадает эффект механических напряжений на критический ток и ВАХ керамики [14].

Что касается эффекта электрического поля, то, судя по всему, он связан скорее всего с воздействием поля на слабые связи типа $S-I-S$. И тогда исчезновение эффекта поля в композитах $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}/\text{Ag}$ может быть обусловлено резким уменьшением (исчезновением) такого типа связей и появлением преимущественно слабых связей типа $S-N-S$.

Естественно ожидать, что воздействие поля в случае изолирующих прослоек должно быть более значительным, чем при наличии прослоек металлических. Появление же существенного гистерезиса ВАХ при транспортных токах вблизи критического, с этой точки зрения, связано с наличием в композитных образцах наряду со слабыми связями типа $S-N-S$ некоторого количества слабых связей типа $S-I-S$ с различающимися плотностями межзеренных критических токов [13]. Контакты типа $S-I-S$, видимо, играют определяющую роль на верхней ветви ВАХ, и срыв при $I = I_f$ скорее всего обусловлен перераспределением джозефсоновских вихрей и переходом в более стабильное положение с определяющей ролью уже контактов типа $S-N-S$. С этих позиций объясняется и наличие самого эффекта электрического поля только на верхней ветви ВАХ, а также его необратимость.

В заключение следует отметить, что в настоящей работе обнаружен гистерезис ВАХ в композитной керамике $YBa_2Cu_3O_{7-x}/Ag$ без охлаждения ее в магнитном поле. При исследовании влияния электрического поля на ВАХ такой керамики установлено, что эффект поля наблюдается только на верхней ветви ВАХ и является необратимым. На нижней ветви ВАХ эффект поля отсутствует. Проведено сопоставление указанных данных с обратимым эффектом поля в чистой керамике $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ и высказано предположение, что изменение транспортных характеристик и эффекта поля в легированной серебром керамике обусловлено заменой слабых связей $S-I-S$ типа на связи типа $S-N-S$. Для полного понимания эффекта электрического поля и гистерезиса ВАХ безусловно необходимы дальнейшие исследования.

Список литературы

- [1] Смирнов Б.И., Криштопов С.В., Орлова Т.С. // ФТТ. 1992. Т. 34. № 8. С. 2482-2486.
- [2] Смирнов Б.И., Орлова Т.С., Криштопов С.В. // ФТТ. 1993. Т. 35. № 8. С. 2250-2255.
- [3] Смирнов Б.И., Орлова Т.С., Кауфманн Х.-Й. // ФТТ. 1994. Т. 36. № 2. С. 460-464.
- [4] Смирнов Б.И., Орлова Т.С., Кудымов А.Н. // ФТТ. 1994. Т. 36. № 5. С. 1529-1531.
- [5] Mannhart J. // Mod. Phys. Lett. B. 1992. V. 6. N 10. P. 555-571.
- [6] Xi X.X., Venkatesan T. // Physics News in 1992 / Ed. P.F. Schewe, B.P. Stein. N.Y.: American Institute of Physics, 1993. P. 44-45.
- [7] Марков Л.К., Шпейзман В.В. // ФТТ. 1991. Т. 33. № 11. С. 3308-3314.
- [8] Марков Л.К., Шпейзман В.В. // ФТТ. 1993. Т. 35. № 11. С. 3008-3013.
- [9] Орлова Т.С., Смирнов Б.И., Шпейзман В.В., Степанов Ю.П., Чернова С.П. // ФТТ. 1990. Т. 32. № 4. С. 1031-1037.
- [10] Жуков А.А., Мощалков В.В. // СФХТ. 1991. Т. 4. № 5. С. 850-887.
- [11] Jung J., Mohamed M.A.-K., Cheng S.C., Franck J.P. // Phys. Rev. B. 1990. V. 42. N 10. P. 6181-6195.
- [12] Lee D., Salama K. // Jpn. J. Appl. Phys. 1990. V. 29. N 11. P. 2017-L2019.
- [13] Jung J., Isaak I., Mohamed M.A.-K. // Phys. Rev. B. 1993. V. 48. N 10. P. 7526-7536.
- [14] Орлова Т.С., Марков Л.К., Смирнов Б.И., Шпейзман В.В., Степанов Ю.П. // ФТТ. 1991. Т. 33. № 12. С. 3595-3598.

Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе РАН
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию
13 мая 1994 г.