

Усиление пиннинга поверхностными магнитными микрочастицами в высокотемпературных сверхпроводниках

П. Н. Тогулев, В. В. Базаров, И. Б. Хайбуллин, Н. М. Сулейманов

*Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского РАН
Сибирский тракт, 10/7, г. Казань, 420029, Россия
E-mail: bazarov@dionis.kfti.kcn.ru*

Статья поступила в редакцию 14 ноября 2001 г.

Обнаружен эффект усиления пиннинга в ВТСП материалах поверхностными магнитными микрочастицами, полученными методом ионной имплантации. Измерения проведены методом магнитно-модулированного микроволнового поглощения. В монокристаллическом $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ ансамбль магнитных частиц формировался непосредственно в приповерхностном слое сверхпроводника путем имплантации ионов Fe^+ с последующим отжигом. В экспериментах с $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ магнитные микрочастицы железа формировались отдельно в пленках SiO_2 , которые затем накладывали на поверхность тонкой пленки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, и измерения проводили на составной структуре. В обоих случаях обнаружено усиление пиннинга. В пределах выбранных режимов имплантации эффект пиннинга возрастает с повышением дозы имплантации ионов железа.

Виявлено ефект посилення пінінга у ВТНП матеріалах поверхневими магнітними мікрочастинками, одержаними методом іонної імплантації. Вимірювання проведено методом магнітно-модульованого мікрохвильового поглинання. У монокристалічному $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ ансамбль магнітних частинок формувався безпосередньо у приповерхневому шарі надпровідника шляхом імплантації іонів Fe^+ з наступним відпалом. В експериментах з $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ магнітні мікрочастинки заліза формувалися окремо у плівках SiO_2 , які потім накладали на поверхню тонкої плівки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, і вимірювання проводили на складеній структурі. В обох випадках виявлено посилення пінінга. В межах обраних режимів імплантації ефект пінінга зростає з підвищенням дози імплантації іонів заліза.

PACS: 74.25.Nf, 74.60.Ge

Введение

Проблема повышения плотности критического тока в высокотемпературных сверхпроводниках (ВТСП) становится в настоящее время одной из актуальных задач физики высокотемпературной сверхпроводимости в связи с задачами практического применения этих материалов. Как известно, увеличение плотности критического тока может быть достигнуто путем создания в объеме сверхпроводящего материала областей (центров пиннинга), в которых подавлен сверхпроводящий параметр порядка. Такие области возникают в местах структурных дефектов или там, где ло-

кально образуются нарушения химического состава основного материала. Стандартным способом создания таких дефектов является облучение ВТСП материалов потоком частиц высоких энергий: ионами, нейтронами, протонами (см., например, [1]). В результате такого облучения в высокотемпературном сверхпроводнике возникают как случайно распределенные «точечные», так и столбчатые дефекты, которые представляют собой линейные области аморфизованного материала вдоль траекторий частиц. Взаимодействие вихревых линий магнитного потока (флюксонов) с такими образованиями возникает за счет дефор-

мации токов вихрей при приближении вихря к дефекту [2–4].

Таким образом, основное внимание было сосредоточено на исследовании влияния геометрических параметров дефектов на эффективность пиннинга. Вместе с тем, несомненно, что электронное и магнитное состояния дефектов могут играть важную роль в пиннинге вихревых линий магнитного потока в сверхпроводящих материалах. С этой точки зрения представляет интерес создание дефектов, обладающих магнитным моментом, и исследование их взаимодействия с вихрями в сверхпроводнике.

В последнее время особый интерес вызывают исследования влияния на пиннинг вихревых линий поверхностных магнитных образований, которые могут быть созданы контролируемым образом. Так, в работе [5] обнаружено усиление пиннинга в тонкой сверхпроводящей пленке ниобия, напыленной на изготовленные методом электронной литографии субмикронные магнитные образования. Получение таких пленок представляет собой достаточно сложную техническую задачу, особенно в случае многокомпонентных ВТСП материалов. В то же время магнитные частицы в поверхностном слое могут быть созданы имплантацией магнитных ионов. В настоящей работе исследовано влияние поверхностных магнитных образований, полученных методом ионной имплантации железа, на пиннинг вихревых линий в ВТСП материалах: монокристаллах $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ и пленках $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$.

В работе использованы два метода создания центров пиннинга. В случае $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ магнитные центры пиннинга создавались имплантацией низкоэнергетических ионов железа непосредственно в висмутовый сверхпроводник. В пленках $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ магнитные частицы железа формировались методом ионной имплантации отдельно в тонкой непроводящей пленке оксида кремния SiO_2 . Затем эту пленку, со сформированными в ней магнитными частицами, накладывали на сверхпроводящую пленку, и измерения проводили на составной структуре. Насколько нам известно, такой подход применен впервые. Данная оригинальная идея привлекательна тем, что в этом случае сверхпроводник не подвергается эффектам ионного облучения и существенно упрощается процесс проведения исследований.

Эксперимент

Висмутовые монокристаллы $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ размерами $3 \times 2 \times 0,1$ мм приготовлены методом Бриджмана–Стокбаргера [6]. Температура сверх-

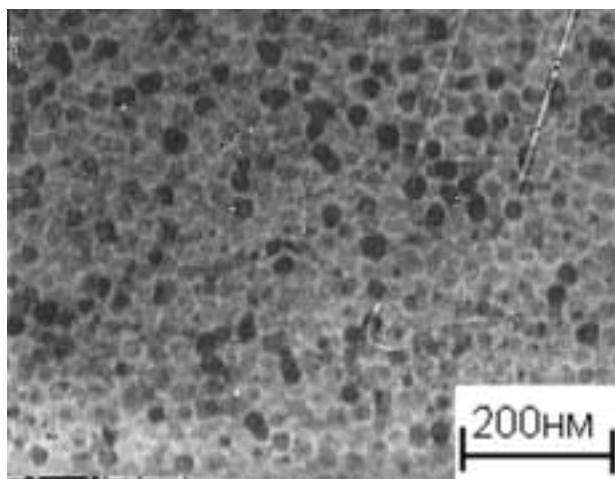


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение участка пленки SiO_2/Si , имплантированной ионами Fe^+ дозой $1,2 \cdot 10^{17}$ ион/см².

проводящего перехода составляет 84 К. Имплантацию ионов железа с энергией 40 кэВ и дозой $6,6 \cdot 10^{16}$ ион/см² проводили на ускорителе ИЛУ-3. С целью создания в образце магнитных частиц железа проводили послеимплантационный отжиг при температуре 600°C.

Эффект наложения (составные структуры) исследовали с использованием тонкой (~ 100 нм) пленки высокотемпературного сверхпроводника $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (YBCO) с температурой сверхпроводящего перехода 88 К, изготовленной методом магнетронного напыления на подложку Al_2O_3 .

Для формирования магнитных частиц в SiO_2 использована методика, описанная в работе [7]. Как показано авторами этой работы, после бомбардировки ионами железа пленки оксида кремния в приповерхностном слое пленки образуются ферромагнитные частицы железа размерами от 5 до 60 нм в зависимости от дозы имплантации. Намагниченность частиц ориентирована параллельно поверхности пленки. Это подтверждается данными измерений ферромагнитного резонанса. Используются пластины монокристаллического кремния, на поверхности которых путем окисления в атмосфере сухого кислорода была сформирована пленка SiO_2 толщиной 250 нм. Как и в случае висмутовых образцов, имплантацию ионов Fe^+ с энергией 40 кэВ и дозами от $3 \cdot 10^{16}$ до $3 \cdot 10^{17}$ ионов/см² проводили на ионном ускорителе ИЛУ-3. В результате такого облучения получены пленки оксида кремния, содержащие магнитные частицы размерами от нескольких единиц до нескольких десятков нанометров. На рис. 1 приведено электронно-микроскопическое изображение участка пленки SiO_2/Si с частицами Fe для дозы имплантации $1,2 \cdot 10^{17}$ ион/см².

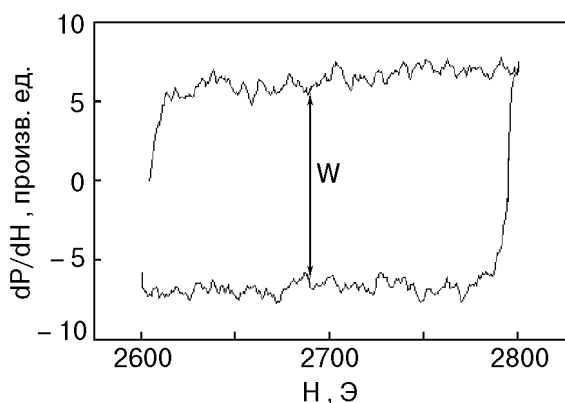


Рис. 2. Экспериментально наблюдаемая петля микроволнового поглощения иттрий-бариевой пленки при температуре 25 К. P – мощность микроволнового излучения, поглощаемая образцом.

Нами также проведены измерения ферромагнитного резонанса на полученных образцах $\text{Fe-SiO}_2/\text{Si}$ для двух ориентаций магнитного поля: параллельно плоскости образца и перпендикулярно ей. В случае параллельной ориентации резонанс наблюдался при значениях полей 1–2 кЭ в зависимости от дозы имплантации, тогда как при перпендикулярной ориентации резонансное поле изменялось от 6 до 10 кЭ для тех же доз имплантированных ионов. Такое поведение ферромагнитного резонанса указывает на то, что возникающие частицы имеют форму сплюснутого эллипсоида, лежащего в плоскости пленки, и что с ростом дозы имплантации происходит укрупнение частиц [7].

Для оценки эффективности пиннинга использован метод магнитно-модулированного микроволнового поглощения (МВП). Метод состоит в том, что при помещении сверхпроводника в СВЧ резонатор и протяжке магнитного поля в прямом и обратном направлении в присутствии модуляции магнитного поля регистрируется так называемая петля микроволнового поглощения, ширина которой определяется следующим выражением (см., например, [8]):

$$W = \sqrt{2\mu\omega\rho_n} \left(\frac{2\pi}{a}\right)^3 \frac{\Phi_0}{\eta^2\omega^2} \left(\frac{B}{B_{c2}}\right)^{1/2} U_{p0} \frac{J_0}{J_c} K\left(\frac{J_0}{J_c}\right),$$

где U_{p0} – потенциал пиннинга; J_0 – ток, вызванный протяжкой магнитного поля; J_c – критический ток; η – вязкость флюксона; ω – частота СВЧ поля; Φ_0 – квант магнитного потока; a – расстояние между центрами пиннинга.

Таким образом, проводя относительные измерения ширины петли гистерезиса до и после создания магнитных частиц на поверхности сверх-

проводника, можно судить об участии этих частиц в пиннинге вихревых линий. Измерения МВП проведены на спектрометре ЭПР Брукер ВЕР 418s на частоте 9,2 ГГц в магнитном поле 2600 Э, направленном перпендикулярно плоскости образца. Частота модуляции составляла 100 кГц. Протяжку поля осуществляли в интервале 200 Э со скоростью изменения поля 3,3 Э/с. Низкие температуры достигались с использованием гелиевого криостата. Экспериментально наблюдаемая петля гистерезиса МВП представлена на рис. 2.

Результаты и обсуждение

На рис. 3 приведена температурная зависимость ширины петли гистерезиса W для висмутового образца, в который имплантированы ионы железа. Как видно на рисунке, ширина петли гистерезиса МВП сверхпроводящих монокристаллов $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ возрастает после имплантации в них ионов железа и последующего отжига. Это указывает на возрастание потенциала пиннинга, так как все задаваемые экспериментальные параметры при измерениях исходного и обработанного образцов оставались неизменными. Проведенные оценки распределения имплантированных ионов и их глубины залегания (программа TRIM, версия SRIM 98.01) показали, что концентрация имплантированных ионов максимальна

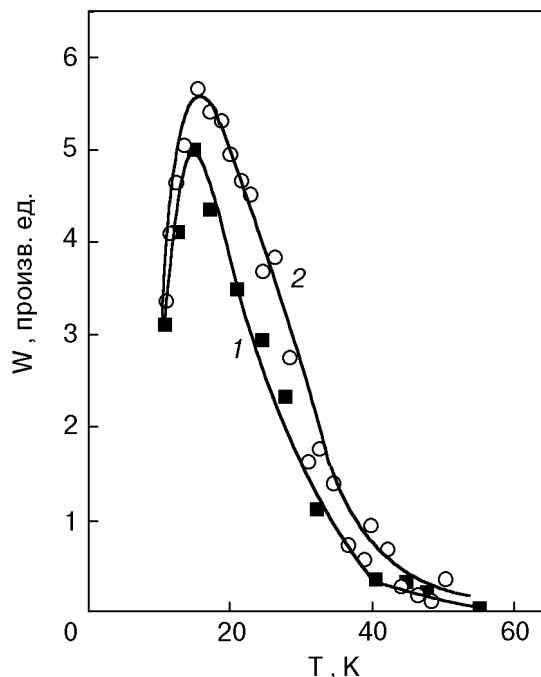


Рис. 3. Температурная зависимость ширины петли гистерезиса микроволнового поглощения исходного образца $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ (1) и образца $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$, имплантированного ионами железа (2). Ошибка эксперимента соответствует размеру символов.

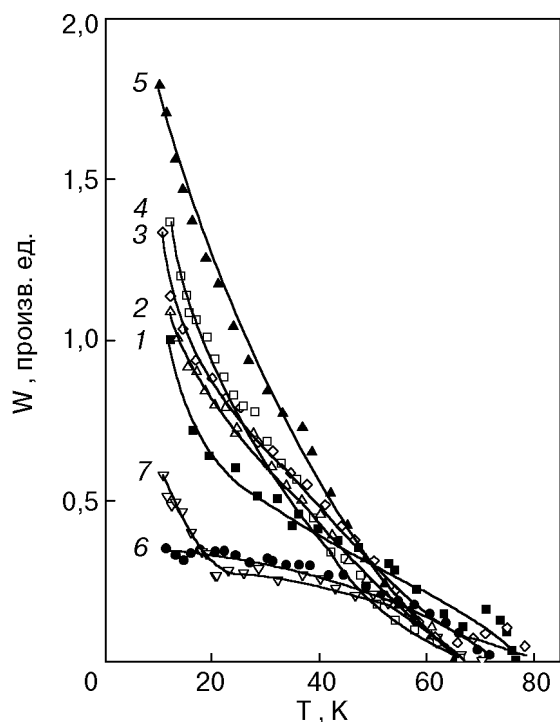


Рис. 4. Температурная зависимость ширины петли гистерезиса микроволнового поглощения исходного образца $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (YBCO) (1) и образцов $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ с наложенными пленками со сформированными в них магнитными частицами: YBCO + (Fe-SiO₂), при различных дозах облучения D , ион/см²: $3 \cdot 10^{16}$ (2); $1,2 \cdot 10^{17}$ (3); $1,8 \cdot 10^{17}$ (4); $3 \cdot 10^{17}$ (5); YBCO + феррит-гранат (6); YBCO + гибкая магнитная дискета (7). Ошибка эксперимента соответствует размеру символов.

на глубине 20–40 нм, т.е. фактически в приповерхностном слое образца.

На рис. 4 представлены температурные зависимости ширины петли гистерезиса МВП исходной сверхпроводящей пленки YBCO и пленки YBCO, с наложенными на нее различными пленками, содержащими магнитные частицы. Как видно, в составной структуре, состоящей из сверхпроводника и наложенной на него непроводящей пленки, содержащей магнитные частицы, наблюдается увеличение ширины петли гистерезиса МВП. Это указывает на эффективное взаимодействие между ансамблем магнитных частиц и вихревыми линиями магнитного потока в сверхпроводнике. Причем с ростом дозы облучения увеличивается и ширина петли гистерезиса.

Понять механизм пиннинга в такой системе можно в рамках следующей модели. Магнитные частицы железа, образующиеся в пленке SiO₂, имеют размеры, лежащие в пределах от нескольких единиц до нескольких десятков нанометров.

Такие ферромагнитные образования можно рассматривать как элементарные магнитные диполи. Магнитные силовые линии этих элементарных магнитных диполей будут проникать в сверхпроводник, поскольку их намагниченность больше значения первого критического поля. В результате будет возникать эффективное взаимодействие вихрей в сверхпроводнике с магнитными силовыми линиями микрочастиц, которые закреплены на магнитной частице. Заметим, что в настоящее время теоретические работы, описывающие механизм пиннинга в таких составных структурах, только начинают появляться, и в качестве примера можно привести работу [9].

Наряду с пленками, содержащими магнитные частицы, полученные ионной имплантацией, были исследованы и составные структуры, когда на сверхпроводник накладывали «сплошные» магнитные пленки, а именно феррит-гранатовые пленки и пленки, вырезанные из гибкой магнитной дискеты (эти данные также приведены на рис. 4). Как оказалось, в таких составных структурах наблюдается существенное уменьшение ширины петли гистерезиса, она становится даже меньше, чем в самом сверхпроводнике. Это указывает на важность размеров частиц и расстояния между ними для эффективности пиннинга в такой системе.

Заключение

Таким образом, в работе методом магнитно-модулированного микроволнового поглощения исследованы образцы сверхпроводящих кристаллов $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$, содержащих в приповерхностном слое магнитные частицы железа. Проведенные измерения показали возрастание потенциала пиннинга в такой системе. Обнаружено усиление пиннинга в тонкой пленке высокотемпературного сверхпроводника YBCO, на поверхность которого наложена тонкая непроводящая пленка оксида кремния, содержащая магнитные микрочастицы железа, сформированные методом ионной имплантации. Обнаружено возрастание потенциала пиннинга с увеличением дозы имплантированного в оксид кремния железа. Установлено, что «сплошные» магнитные пленки, наоборот, подавляют пиннинг в таких составных системах. Это указывает на то, что размеры магнитных частиц и расстояния между ними влияют на механизм пиннинга. Полученные результаты открывают новые возможности для изучения свойств пиннинга поверхностными магнитными образованиями путем наложения на поверхность сверхпроводника не-

проводящих пленок со сформированным ансамблем магнитных микрочастиц.

Работа выполнена в рамках проектов Российского фонда фундаментальных исследований №99-02-18064 и №00-15-96615. Образцы монокристаллов $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ были приготовлены в Институте экспериментальной физики IV Рурского Университета (Бохум, Германия) в рамках исследования эффекта пиннинга в допированных водородом ВТСП материалах. Авторы благодарны проф. К. Вестерхольту (К. Westerholt) за образцы и обсуждения, стимулировавшие данную работу.

1. L. M. Paulius, R. E. Shamu, S. Ferguson, M. C. de Anrade, and M. B. Maple, *Appl. Phys. Lett.* **71**, 3415 (1997).
2. G. S. Mkrtchyan and V. V. Schmidt, *Sov. Phys. JETP* **34**, 195 (1972).
3. M. L. Kubic, A. Kramer, and K. D. Schotte, *Solid State Commun.* **82**, 541 (1992).
4. A. Buzdin and M. Daumens, *Physica* **C294**, 257 (1998).
5. J. I. Martin, M. Veléz, J. Nogués, and Ivan K. Shuller, *Phys. Rev. Lett.* **79**, 1929 (1997).
6. B. vom Hedt, W. Lisseck, K. Westerholt, and H. Vach, *Phys. Rev.* **B49**, 9898 (1994).
7. А. Бухараев, А. В. Казаков, Р. А. Манапов, И. Б. Хайбуллин, *ФТТ* **33**, 1018 (1991).
8. C. Kessler, B. Nebendahl, D.-N. Peligrad, M. Mehring, A. Dulcic, and H.-U. Habermeier, *Appl. Magn. Reson.* **8**, 147 (1995).
9. R. Šašik and T. Hwa, *cond-mat/0003462* (2000).

Reinforcement of pinning by surface magnetic microparticles in high- T_c superconductors

P. N. Togulev, V. V. Bazarov, I. B. Khaibullin, and N. M. Suleimanov

The effect of reinforcement of pinning in HTSC materials by surface magnetic microparticles formed by ion implantation has been investigated. The measurements were performed by the method of magnetic-modulated microwave absorption. For the single crystal $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ an ensemble of magnetic particles was formed in an undersurface layer of the superconductor by implaining Fe^+ ions followed by annealing. In the case of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ the iron magnetic microparticles were formed in thin SiO_2 films whereupon they were superimposed on the thin $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ film surface, and then the measurements were performed on the composite structure. The reinforcement of pinning is observed in both cases. The effect of pinning increases with the fluence of implanted Fe^+ ions.