

Направленное движение вихрей в фасетированных ниобиевых пленках

А. К. Сорока^{1,2}, М. Хут²

¹Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина
пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61077, Украина
E-mail: soroka@mail.uni-mainz.de

²Institut für Physik, Johannes Gutenberg-Universität, Staudinger Weg 7, 55099 Germany

Статья поступила в редакцию 6 июня 2002 г.

Обнаружено направленное движение вихрей в ниобиевых пленках на фасетированном субстрате Al_2O_3 . Проведены измерения четной и нечетной компонент продольного и поперечного магнитосопротивлений образцов с различной ориентацией транспортного тока относительно направления фасет. Для выделения четной и нечетной компонент магнитосопротивления применяли метод изменения знака магнитного поля.

Виявлено направлений рух вихорів у ніобієвих плівках на фасетованому субстраті Al_2O_3 . Проведено виміри парної та непарної частин повздовжнього та поперечного магнітоопорів зразків з різною орієнтацією транспортного струму відносно напрямку фасет. Для виділення парної та непарної компонент магнітоопору застосовано метод зміни знака магнітного поля.

PACS: 74.25.Fy, 74.60.Ge, 74.76.Db

Влияние анизотропии пиннинга на динамику вихрей в сверхпроводниках является предметом интенсивных теоретических и экспериментальных исследований [1–3]. Особое внимание уделяется изучению так называемого направленного движения вихрей (guided vortex motion), возникающего при наличии в образце параллельных плоскостей пиннинга. Подобная ситуация может быть легко реализована экспериментально в монокристаллах $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$: наличие однонаправленных двойников, которые практически не влияют на движение вихрей параллельно их плоскости, но являются сильными центрами пиннинга при движении перпендикулярно направлению двойника, приводит к появлению ряда интересных эффектов [2,3]. В слоистых высокотемпературных сверхпроводниках сама система параллельных ab -плоскостей — источник собственного пиннинга для вихрей, расположенных параллельно этим плоскостям [4]. В настоящей статье предложена новая экспериментальная модель для изучения подобных явлений.

В результате направленного движения вихрей возникают «новые» компоненты магнитосопротивлений образца в параллельном и перпендику-

лярном направлениях относительно транспортного тока [11]: нечетная продольная по отношению к изменению направления магнитного поля и четная поперечная компоненты соответственно:

$$\rho_{\parallel}^- = \frac{\rho_{\parallel} (+\mathbf{H}) - \rho_{\parallel} (-\mathbf{H})}{2}, \quad (1)$$

$$\rho_{\perp}^+ = \frac{\rho_{\perp} (+\mathbf{H}) + \rho_{\perp} (-\mathbf{H})}{2}, \quad (2)$$

которые отсутствуют в изотропном случае. Экспериментально они наблюдались в двойникованных монокристаллах $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ [2,3]. Теория предсказывает следующую зависимость этих компонент от угла α между направлением тока и плоскими дефектами [1]. В случае, когда ток направлен параллельно или перпендикулярно плоскостям, «новые» компоненты всегда равны нулю. Это обусловлено тем, что вихри в такой геометрии под действием силы Лоренца могут двигаться только перпендикулярно направлению транспортного тока, и компонента скорости, параллельная току, отсутствует. Для геометрии, в

которой $\alpha = 45^\circ$, ожидаемый отклик должен быть максимален по амплитуде [1].

В настоящей работе измерения проведены на тонких ниобиевых пленках, напыленных на фасетированный Al_2O_3 -субстрат. При отжиге Al_2O_3 в воздухе при высоких температурах на поверхности субстрата формируются фасеты, как показано на рис. 1,а,в [5]. Такой фасетированный субстрат был разрезан на четыре части, и в результате одного процесса напыления методом молекулярно-лучевой эпитаксии было получено четыре ниобиевых пленки толщиной 390 Å.

Установлено, что фасеты в этой системе действуют как плоскости пиннинга, природа которого окончательно не ясна: пиннинг может быть обусловлен, например, границами зерен или поверхностными эффектами. Структура, позволяющая проводить измерения как продольного, так и поперечного сопротивления, была нанесена с использованием фотолитографического метода. Для измерений приготовлено три образца, которые имеют различную ориентацию измерительного мостика относительно фасет: параллельно, перпендикулярно и под углом $\alpha = 45^\circ$. Таким образом, на данном наборе образцов можно измерять поперечные и продольные магнитосопротивления при различной ориентации транспортного тока относительно направления фасет. В ходе эксперимента одновременно измеряли зависимости напряжений $U_{\parallel}(\mathbf{H})$ и $U_{\perp}(\mathbf{H})$ при двух взаимно противоположных направлениях магнитного

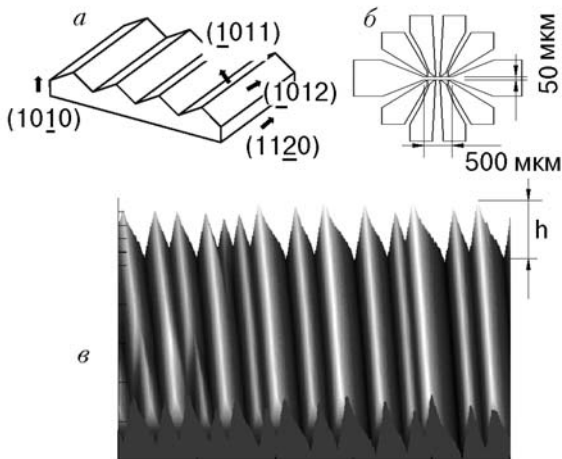


Рис. 1. Поверхность фасетированного Al_2O_3 -субстрата (а); измерительный мостик (б) и типичное изображение поверхности ниобиевой пленки на фасетированном субстрате, полученное при помощи сканирующего туннельного микроскопа (представлена область сканирования размером 5×5 мкм, высота каждой фасеты $h \approx 50$ нм) (в).

поля \mathbf{H} , перпендикулярного плоскости образца. Затем по формулам (1) и (2) вычисляли четную и нечетную относительно изменения направления магнитного поля компоненты продольного и поперечного магнитосопротивлений. Средняя плотность транспортного тока составляла $5,1 \text{ кА/см}^2$.

На рис. 2,а для трех пленок приведены зависимости ρ_{\parallel}^+ от магнитного поля при температуре пленок 8,5 К. Видно, что образец с направлением тока под углом 45° к направлению фасет имеет более низкое критическое поле, чем остальные. Это отличие может быть связано с неравномерным распределением температуры в субстратах в процессе напыления пленок. Ширина перехода составляет 0,02 Тл.

Зависимости ρ_{\parallel}^- от магнитного поля на рис. 2,б имеют ярко выраженный минимум в области сверхпроводящего перехода. Кривые практически не отличаются друг от друга для всех трех пленок: кривая для образца с направлением тока под углом 45° сдвинута в сторону низких полей

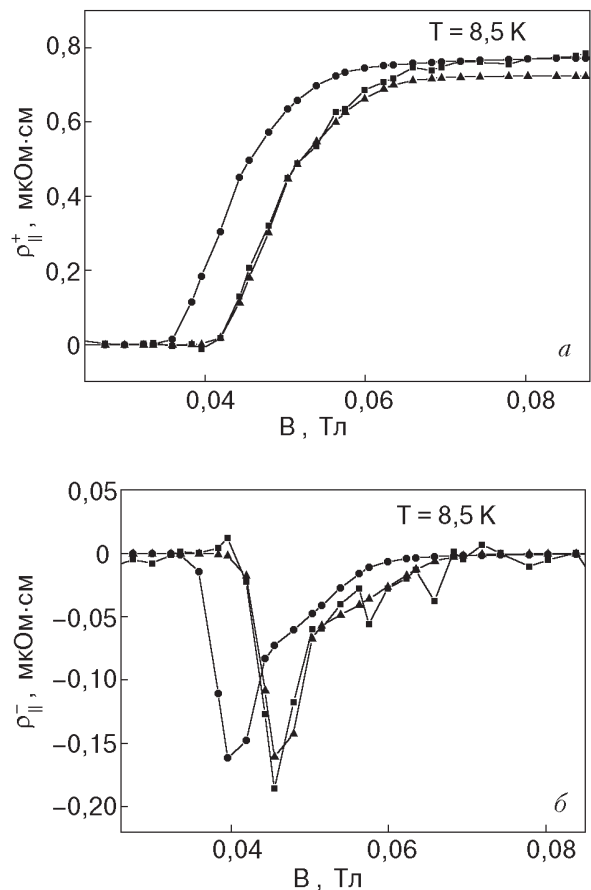


Рис. 2. Зависимость четной (а) и нечетной (б) компонент продольного удельного магнитосопротивления от величины магнитного поля для трех образцов с различной ориентацией транспортного тока относительно направления фасет: 0° (■), 45° (●), 90° (▲).

относительно кривых для двух других образцов на величину, равную разнице в критических полях этих пленок (см. рис. 2,а). Следует отметить, что теория [1] предсказывает нулевое магнитосопротивление при $\alpha = 0^\circ$ и 90° . Зависимость, подобная приведенной для $\alpha = 45^\circ$, наблюдалась на sdвойникованных монокристаллах YBCO [2]. В этой работе приведены результаты измерений четной и нечетной частей продольного и поперечного магнитосопротивлений монокристалла YBCO с однонаправленными двойниками для двух образцов с разным направлением транспортного тока: параллельно и ориентированным под углом $\alpha = 45^\circ$ к плоскостям двойников. Однако амплитуда сигнала в образце с током, параллельным двойникам, была на порядок меньше, чем для случая $\alpha = 45^\circ$. Появление нечетной по полю компоненты в продольном магнитосопротивлении — характерная черта направленного движения вихрей. Эта компонента обусловлена наличием четной компоненты скорости, перпендикулярной направлению тока, при движении вихрей вдоль плоскостей пиннинга [1].

На рис. 3 представлены зависимости четной компоненты поперечного магнитосопротивления образца от магнитного поля. Видно, что сильнее всего эффект проявляется для образца с ориентацией транспортного тока под углом 45° к направлению фасет, как и предсказывает теория. Происхождение этих «новых» компонент поперечного магнитосопротивления связано с движением вихрей вдоль плоскостей пиннинга, а именно с наличием нечетной компоненты скорости вихря, направленной перпендикулярно вектору транспортного тока.

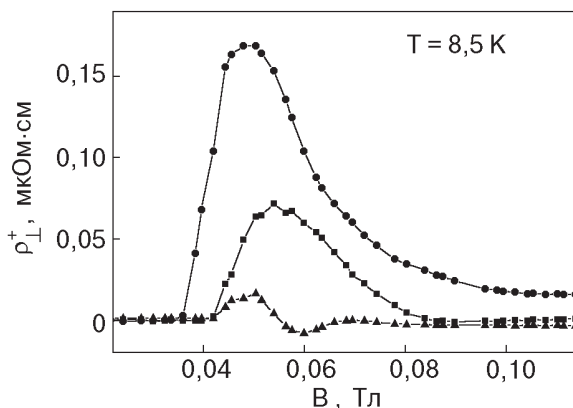


Рис. 3. Зависимость четной компоненты поперечного удельного магнитосопротивления от величины магнитного поля для трех образцов с различной ориентацией транспортного тока относительно направления фасет: 0° (■), 45° (●), 90° (▲).

Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют об анизотропии пиннинга в фасетированных ниобиевых пленках. Главный результат работы — экспериментальное наблюдение нечетной компоненты в продольном и четной в поперечном магнитосопротивлениях образца, что указывает на направленное движение вихрей в фасетированных ниобиевых пленках. Не ясно, чем обусловлено практически одинаковое поведение нечетной компоненты продольного сопротивления во всех трех образцах. Одной из возможных причин такого поведения может быть наличие небольшого ($\leq 5^\circ$) угла разориентации между направлением тока и направлением фасет в образцах с $\alpha = 0$ и 90° . В пользу этого соображения свидетельствует также существование отличных от нуля значений ρ_{\perp}^+ для этих направлений (см. рис. 3).

Следует отметить, что теоретические результаты работы [1] не могут быть непосредственно использованы для количественной интерпретации данных эксперимента, так как они не предполагают наличия пиннинга при движении вихрей вдоль плоскости пиннинга, т.е. фасет. Эксперименты, однако, показывают, что критический ток вдоль и поперек направления фасет одного порядка. Таким образом, необходимо дальнейшее развитие теории движения вихрей, способной описать такую ситуацию.

В заключение следует отметить, что рассмотренная система является хорошим объектом для изучения направленного движения вихрей: такие параметры, как период фасет и толщина пленки, могут легко варьироваться в процессе приготовления пленок.

Авторы выражают благодарность В. А. Шкловскому за обсуждение полученных результатов и просмотр рукописи статьи и Й. Остеру за помощь в приготовлении образцов.

1. В. А. Шкловский, А. А. Сорока, А. К. Сорока, *ЖЭТФ* **6(12)**, 2103 (1999).
2. А. А. Prodan, V. A. Shklovskij, V. V. Chabanenko, A. V. Bondarenko, M. A. Obolenskii, H. Szymczak, and S. Piechota, *Physica* **C302**, 271 (1998).
3. V. V. Chabanenko, A. A. Prodan, V. A. Shklovskij, A. V. Bondarenko, M. A. Obolenskii, H. Szymczak, and S. Piechota, *Physica* **C314**, 133 (1999).
4. G. Blatter, M. V. Feigelman, V. B. Geshkenbein, A. I. Larkin, and V. M. Vinokur, *Rev. Mod. Phys.* **66**, 1125 (1994).
5. M. Huth, K. A. Ritley, J. Oster, H. Sosch, and H. Adrian, *Adv. Funct. Mat.* **5** (2002).

Directed motion of vortices in faceted Nb films

A. K. Soroka and M. Huth

Guided motion of vortices in the Nb films on a faceted Al_2O_3 substrate is observed. Even and odd components of longitudinal and trans-

verse magnetoresistivities of the samples with different orientation of transport current to the facet ridges are measured. The field inversion was used to separate the even and odd components of the measured magnetoresistivities.