

Квантовые магнеторезистивные осцилляции в сверхпроводящей структуре типа несимметричной восьмерки

В.И. Кузнецов, В.А. Тулин

Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН, 142432 Черноголовка, Россия

Зависимости напряжения на сверхпроводящей тонкопленочной структуре типа восьмерки, состоящей из двух связанных несимметричных тонкостенных колец разной площади, от перпендикулярного магнитного поля при пропускании через нее постоянного или переменного тока вблизи критической температуры были экспериментально исследованы. Магнеторезистивные осцилляции, связанные одновременно с обоими кольцами наблюдались очень редко в узком экспериментальном интервале. Обычно мы наблюдали в зависимости от температуры, тока и геометрии структуры отклик либо одного, либо другого кольца. Предлагается возможное объяснение, связанное с неоднородным распределением сверхпроводящего параметра порядка и, соответственно, продольного электрического поля в структуре.

В [1] экспериментально продемонстрировано создание квантовой суперпозиции макроскопически различных состояний в сверхпроводящем квантовом интерференционном устройстве (SQUID). В [1] использовалась система колец разорванных туннельными контактами. В принципе возможно создание аналогичной квантовой суперпозиции в похожей системе, содержащей два связанных несимметричных кольца без наличия туннельных контактов.

Для наблюдения возможного когерентного квантового туннелирования между макроскопически различными состояниями необходимы низкие температуры, меньшие 0.1 К и сверхвысокочастотное облучение [1]. Наша работа посвящена первичному экспериментальному тестированию вблизи сверхпроводящей критической температуры T_c квантовых магнеторезистивных свойств сверхпроводящих алюминиевых структур (Рис.1.) с постоянным или низкочастотным током порядка критического с целью исследования возможности создания квантовой суперпозиции в них.

Центральная часть одной из исследуемых структур представляет собой несимметричную восьмерку с шириной всех широких линий $w_w = 0.47$ мкм, шириной узких линий $w_n = 0.24$ мкм (Рис.1.). Эта восьмерка состоит из двух имеющих общую часть колец разной площади. Первое кольцо состоит из двух полуколец с одним и тем же внутренним радиусом равным $r_{i1} = 2$ мкм, но с разными внешними радиусами верхнего и нижнего полукольца, соответственно, равными: $r_{o1\uparrow} = 2.24$ мкм, $r_{o1\downarrow} = 2.12$ мкм. Второе кольцо также состоит из двух полуко-

лец с соответствующими радиусами равными: $r_{i2} = 1.48$ мкм, $r_{o2\uparrow} = 1.60$ мкм, $r_{o2\downarrow} = 1.71$ мкм. Отсюда средние арифметические верхние и нижние радиусы для первого и второго кольца равны соответственно: $r_{m1\uparrow} = (r_{i1} + r_{o1\uparrow})/2 = 2.12$ мкм, $r_{m1\downarrow} = (r_{i1} + r_{o1\downarrow})/2 = 2.06$ мкм, $r_{m2\uparrow} = (r_{i2} + r_{o2\uparrow})/2 = 1.54$ мкм, $r_{m2\downarrow} = (r_{i2} + r_{o2\downarrow})/2 = 1.60$ мкм.

Образцы изготовлены из пленки толщиной $d=40$ нм, осажденной с помощью термического напыления на кремниевую подложку, используя lift-off процесс электронной литографии. Отношение сопротивлений $R_{300}/R_{4.2}=2.1$, сопротивление квадрата поверхности пленки было $R_s = 0.6 \Omega$.

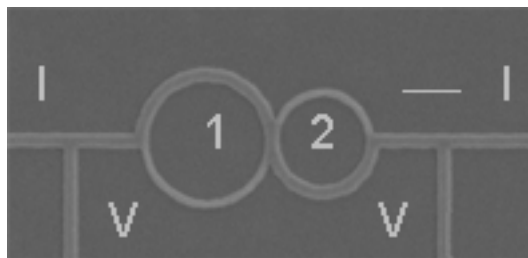


Рис. 1. Изображение структуры в электронном микроскопе с токовыми I и потенциальными V подводами. Горизонтальная метка имеет длину 2 мкм.

Известно, что вблизи T_c в тонкостенных сверхпроводящих цилиндрах [2], петлях [3] с диаметром порядка сверхпроводящей длины когерентности ξ возникают осцилляции в зависимости $R(H)$, связанные с квантованием флюксоида. Период осцилляций $\Delta H = (hc/2e)/S_{eff}$, где S_{eff} — есть эффективная площадь квантования для петли конечной ширины.

В системе из колец следует ожидать некоторой интерференции осцилляций, связанных со всеми кольцами, а также некоторого хаоса по причине электродинамического взаимодействия между кольцами. Неожиданно мы обнаружили, что осцилляции $R(H)$ для структуры, изображенной на Рис.1. чаще отражают магнеторезистивный отклик либо только первого кольца, либо второго кольца в зависимости от постоянного тока и температуры (Рис.2.). Большой период осцилляций $\Delta H = 2.41$ Ое соответствует контуру квантования с эффективным площадью $S_{eff} = 8.59$ мкм, что с точностью до 10 процентов равняется средней вычисленной из геометрии эффективной площади второго меньшего несимметричного кольца. Меньшему периоду $\Delta H = 1.56$ Ое соответствует $S_{eff} = 13.27$ мкм, что точно 3 процентов равняется средней площади первого большего кольца.

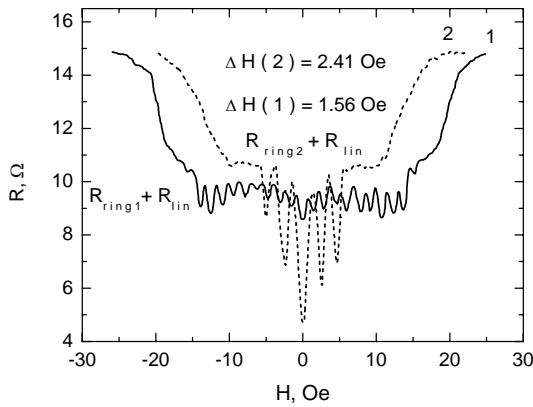


Рис. 2. Кривая 1: экспериментальные зависимости осцилляций $R(H)$, связанные с большим кольцом при $T=1.305$ К на постоянном токе $I=0.43$ мкА; кривая 2: $R(H)$, связанные с меньшим кольцом при $T=1.294$ К и токе $I=1.77$ мкА; $T_c=1.35$ К.

Мы использовали кольца переменной ширины, так как это позволяет узнать квантовое состояние кольца при воздействии переменным током. В этом случае знак напряжения $V(H)$ всегда соответствует определенному направлению циркулирующего тока в кольце [4]. Зависимость $V(H)$ на переменном токе с амплитудой чуть большей критической для выше упоминаемой структуры показана на Рис.3. Видны осцилляции с периодом, соответствующим меньшему кольцу. В отличие от осцилляций $R(H)$, осцилляции $V(H)$ являются антисимметричными относительно магнитного поля и первые пики $V(H)$ вблизи нулевого поля соответствуют примерно $H_{\pm} \cong \pm (hc/8e)/S_{\text{eff}}$ (смотри [4] и также Рис.3.) Наблюдаемое изменение в периоде осцилляций при больших полях обусловлено, возможно, разрушением сверхпроводимости магнитным полем в структуре, а не влиянием другого кольца.

Мы измеряли также образцы, в которых отношение наименьших ширин первого и второго кольца было близко к двум (для образца Рис.1. это отношение равно 1). В этом случае осцилляции $R(H)$ также были связаны либо с одним кольцом, либо с другим. Осцилляции $V(H)$ были связаны только с большим кольцом (для образца Рис.1 – с малым кольцом).

В чем причина такого поведения зависимостей $R(H)$ и $V(H)$ в несимметричной восьмерке? Мы предполагаем, что разрушение сверхпроводимости током в структуре на Рис.1. связано с образованием центров проскальзывания фазы (ЦПФ) [5] прежде всего в каком-то месте токовых подводов, а не в самом кольце из-за геометрии. В результате возникает неоднородное электрическое поле с глубиной спада порядка 30 мкм для нашего образца, простирающееся вплоть до широких токовых подводов.

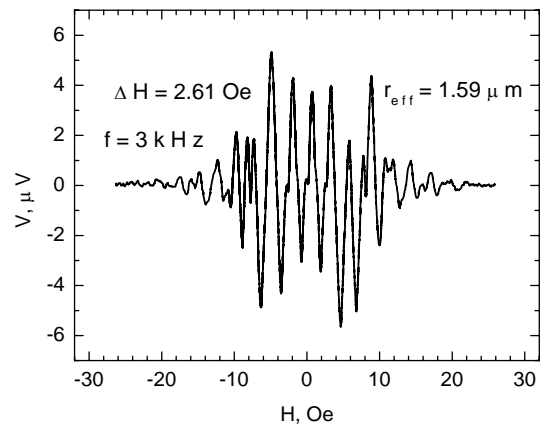


Рис. 3. Экспериментальная зависимость среднего постоянного напряжения $V(H)$ при воздействии переменным током низкой частоты $I_f = 2.25$ мкА при температуре $T=1.287$ К.

Из этого следует, что если даже ЦПФ образуется в самом кольце, то другое кольцо будет находиться в несколько иных резистивных условиях из-за больших размеров колец. Таким образом, одновременный отклик обоих колец затруднен. Увеличение тока может привести к перераспределению неоднородного электрического поля (например, из-за образования нового ЦПФ) и изменению отклика системы. Другой причиной может быть взаимодействие колец, при этом одно и то же магнитное поле вызывает разные трудно совместимые квантовые состояния в кольцах вследствие их разных площадей и наличия области пересечения колец.

Итак, мы наблюдали квантовые осцилляции $R(H)$, $V(H)$ в сверхпроводящей восьмерке, состоящей из несимметричных колец разной площади, причем в зависимости от параметров эти осцилляции были связаны либо с одним кольцом, либо с другим. Это возможно благодаря неоднородному распределению электрического поля в структуре.

Авторы благодарят С. Дубоноса и А. Фирсова за приготовление образцов. Работа выполнена в рамках программы ОИТВС РАН «Организация вычислений на новых физических принципах».

1. J. R. Friedman, V. Patel, W. Chen et al., Nature 406, 43 (2000).
2. W.A. Little and R.D. Parks, Phys. Rev. Lett. 9, 9 (1962).
3. H. Vloeberghs, V.V. Moshchalkov et al., Phys. Rev. Lett. 69, 1268 (1992).
4. S.V. Dubonos, V.I. Kuznetsov et al., JETP Lett. 77, 371 (2003).
5. B.I. Ivlev, N.B. Kopnin, Adv. Phys. 33, 47 (1984).