

©1993

ДИОДНЫЙ ЭФФЕКТ В ВТСП КОЛЬЦЕ

А.И.Шельх, Е.К.Кудинов

Обнаружен эффект выпрямления тока в ВТСП кольце, когда приложенное перпендикулярно его плоскости синусоидальное переменное магнитное поле смещается параллельно направленным постоянным магнитным полем

1. В описываемом эксперименте ВТСП кольцо подвергалось воздействию двух независимых магнитных полей, перпендикулярных его плоскости. Одно из них создавалось проходящим через отверстие кольца соленоидом (число витков $n = 41 \text{ см}^{-1}$, радиус $r = 0.25 \text{ см}$, длина $l = 12 \text{ см}$), т.е. реализовалась конфигурация Ааронова-Бома. Через обмотку соленоида пропусклся синусоидальный переменный ток частоты $\omega/2\pi = (1 - 10) \cdot 10^3 \text{ Гц}$. Вся система помещалась в постоянное магнитное поле H_0 , созданное соленоидом с $n = 9 \text{ см}^{-1}$, $r = 5 \text{ см}$, $l = 15 \text{ см}$. На внутренней поверхности кольца с угловым раствором 45° расположены два контакта. Сопротивление между ними при 300 К порядка 1 Ом . Постоянное напряжение между контактами измерялось с помощью фотогальванометрического усилителя Ф 116/1. Схема эксперимента представлена на рис. 1.

2. В такой системе наблюдался диодный эффект (появление постоянного напряжения на контактах) при температуре жидкого азота на кольцах, изготовленных из различных партий керамики $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$. Типичная геометрия колец: радиус отверстия $0.3-0.35$, наружный радиус $0.65-0.7$, толщина $0.24-0.6 \text{ см}$.

Экспериментально определены следующие характеристики диодного эффекта: 1) зависимость выпрямленного напряжения U от амплитуды переменного магнитного поля соленоида H_s при фиксированных ω и H_0 (рис. 2); 2) зависимость V от H_0 при фиксированных ω , H_s (рис. 3).

Во всех опытах полярность напряжения V менялась при изменении полярности постоянного поля H_0 .

3. Приведем необходимые в дальнейшем обсуждении сведения о нелинейных явлениях, наблюдающихся при возбуждении незатухающего тока в сверхпроводящем кольце [1]. Последний обычно создается охлаждением кольца до $T < T_c$, когда отверстие кольца пронизывает внешний магнитный поток Φ . Это может быть реализовано в двух вариантах.

а) Магнитное поле сосредоточено в области вне материала кольца (конфигурация Ааронова-Бома — идеальный соленоид, проходящий через отверстие кольца). В этом случае единственное магнитное поле, ко-

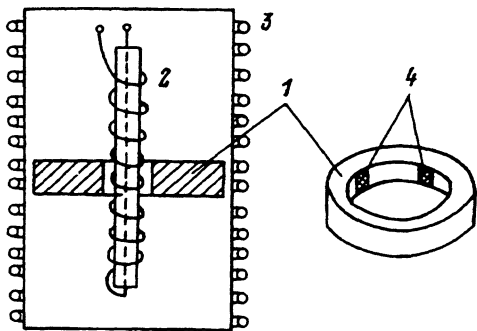


Рис. 1. Схема эксперимента.

1 — кольцо, 2 — внутренний соленоид, 3 — внешний соленоид, 4 — контакты.

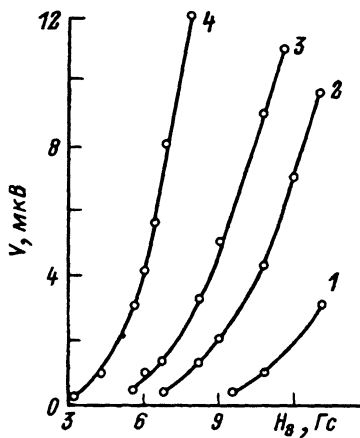


Рис. 3. Зависимость V от амплитуды поля внутри соленоида H_s .

H_0 , Гс: 1 — 1.3, 2 — 2.08, 3 — 2.6, 4 — 4.16. $T = 77$ К, $\omega/2\pi = 10^4$ с $^{-1}$.

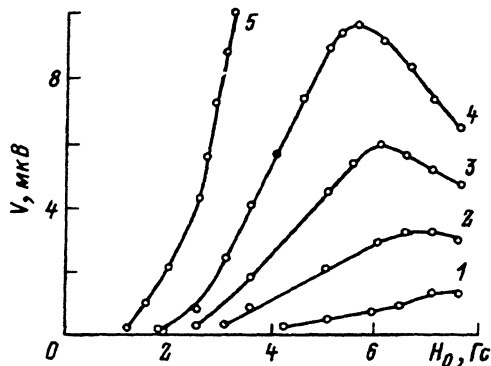


Рис. 2. Зависимости выпрямленного напряжения V от постоянного магнитного поля H_0 при различных значениях амплитуды поля H_s внутри соленоида, проходящего через отверстие кольца.

H_s , Гс: 1 — 3.3, 2 — 4.25, 3 — 5.45, 4 — 6.52, 5 — 8.7. $T = 77$ К, $\omega/2\pi = 10^4$ с $^{-1}$.

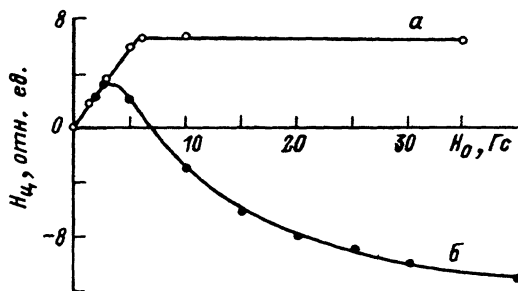


Рис. 4. Зависимости поля в центре кольца H_c с незатухающим током от поля H_0 , при котором кольцо охлаждалось ниже T_c .

a — конфигурация Ааронова-Бома (здесь H_0 — поле внутри соленоида), b — кольцо во внешнем однородном поле.

торое воздействует на материал кольца, — это поле индуцированного кольцевого тока H_a .

б) Магнитный поток создается однородным магнитным полем H_0 , последнее непосредственно воздействует на материал кольца.

В случае «мягкого» сверхпроводника II рода зависимость конечного состояния кольца после выключения потока (его можно охарактеризовать значением магнитного поля в центре кольца H_c) от начального потока для обоих вариантов примерно одинакова (рис. 4, а).¹

¹ Возможно некоторое сглаживание излома на рис. 4, а, что, по-видимому, наблюдалось в [2].

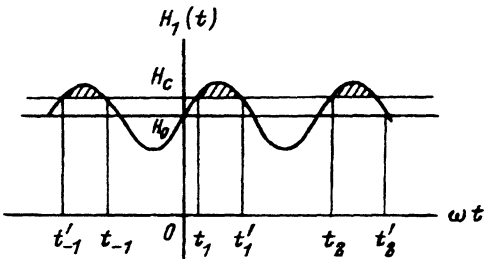


Рис. 5. Зависимости поля H_1 от времени. В течение интервалов времени (t_i, t_i') кольцо находится в резистивном состоянии. $H_1(t) = H_0 + H_a \sin \omega t$.

Для «жесткого» сверхпроводника ситуация резко меняется [1]. В то время как в случае а) ситуация аналогична приведенной на рис. 4, а, в случае б) захват потока может привести к обращению H_c в нуль и смене его знака при дальнейшем увеличении поля (рис. 4, б), поскольку захваченный поток создает в центре кольца поле, направленное противоположно полю кольцевого тока.

Представленные на рис. 2, 3 зависимости V от H_0 и H_s (очевидно, что поток Φ и поле H_a на поверхности кольца пропорциональны H_s) демонстрируют, что эффект выпрямления возникает тогда, когда поля H_0 , H_s превышают некоторые пороговые значения. Сопоставляя с данными рис. 4, видим, что диодный эффект реализуется примерно в той же области полей, где зависимости рис. 4 существенно нелинейны.

4. Обнаруженный эффект выпрямления следует уже из нарушения симметрии рассматриваемой системы при наложении постоянного магнитного поля H_0 . Простейшее его описание можно дать на основе (модифицированного) правила Сильбси. Предположим, что кольцо переходит в резистивное состояние, когда значение магнитного поля на поверхности кольца H_1 превысит некоторое критическое значение H_c . В рассматриваемой системе поле H_1 равно сумме поля $H_a(t)$, созданного кольцевым током (который индуцируется потоком Φ во внутреннем соленоиде), и внешнего постоянного поля H_0 (мы пренебрегаем возможными эффектами неоднородности полей у поверхности кольца). В промежутки времени, в течение которых $H_a(t) + H_0 \geq H_c$, кольцо находится в резистивном состоянии, а кольцевой ток создает разность потенциалов на электродах (рис. 5). Указанным промежуткам времени на рис. 5 соответствуют заштрихованные области; отсюда видно, что в резистивном состоянии кольцевой ток течет в определенном направлении, т.е. реализуется диодный эффект.² Из рис. 5 также видно, что изменение знака поля H_0 ведет к изменению направления тока в заштрихованных областях, а следовательно, к изменению знака разности потенциалов V .

Используя соображения, аналогичные приведенным в работе [3], можно оценить величину $H_c \sim 5$ Гс.

Такое простое описание, разумеется, справедливо лишь в не слишком больших полях H_0 . При дальнейшем увеличении поля фактически меняются параметры материала кольца и можно рассчитывать лишь на качественное описание.

² Отметим, что наблюдался также родственный эффект: при выключенном поле H_0 вольтметр переменного тока фиксировал падение напряжения на контактах, когда ток во внутреннем соленоиде превосходил некоторое значение. По сути дела это реализация того же механизма в отсутствие нарушения симметрии полем H_0 .

Список литературы

- [1] Шелых А.И. // ФТТ. 1990. Т. 32. № 6. С. 1820–1824.
- [2] Fuhun Liu, Rochelle R. Tucker, Peter Heller // Am. J. Phys. 1990. V. 58. N 3. P. 211–218.
- [3] Шелых А.И., Кудинов Е.К. // ФТТ. 1992. Т. 34. С. 251–253

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

Поступило в Редакцию
8 февраля 1993 г.

