

- [9] Гусев Б.Н., Гуревич А.Г., Анисимов А.Н., Чивилева О.А., Винник М.А., Березин И.Л. // ФТТ. 1986. Т. 28. № 10. С. 2969-2974.
- [10] Дудко Г.М., Казаков Г.Т., Кожевников А.В., Филимонов Ю.А. Тезисы докладов региональной конференции "Спиральные явления электроники СВЧ", Краснодар, 1987, с. 119-120.
- [11] Карамзин Ю.Н., Сухорукоев А.П., Филичук Т.С. // Вестник МГУ, серия физика, астрономия. 1978. Т. 19. № 4. С. 91-98.

Ленинградский
электротехнический
институт им В.И. Ульянова (Ленина)

Поступило в Редакцию
18 октября 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 1
05.4; 12

12 января 1989 г.

ТОНКОСТЕННЫЙ НИОБИЕВЫЙ ЦИЛИНДР КАК СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ КВАНТОВЫЙ МАГНИТОМЕТР

В.М. Закосаренко, Е.В. Ильичев,
В.А. Тулин

Обычно при исследовании одноконтанных скивдов (ВЧ-скивдов) измеряют напряжение на резонансном контуре ω , индуктивно связанном с датчиком скивда, в зависимости от тока накачки контура I_{\sim} (ВЧ-ВАХ) и зависимость ω от постоянного магнитного потока через контур датчика скивда при фиксированном I_{\sim} (сигнальная характеристика скивда) [1].

При исследовании пленочных ВЧ-скивдов на ВЧ-ВАХ некоторых образцов мы обнаружили нелинейности при уровнях накачки, не достигающих характерного плато на ВЧ-ВАХ скивда, т.е. когда индуцированный экранирующий ток в скивде меньше критического тока слабой связи. Соответствующие этим особенностям сигнальные характеристики (магнитный поток Φ в скивде создавался введением постоянного тока I_{\sim} в катушку связи) были периодичны, причем период по магнитному потоку через площадь контура датчика для различных образцов варьировался в пределах 5-30 Φ_0 ($\Phi_0 = = \pi \hbar / e$ - квант магнитного потока).

Мы предположили, что наблюдаемые особенности не связаны со свойствами слабой связи, поскольку при таких уровнях I_{\sim} слабая связь находится в сверхпроводящем состоянии, и приготовили образцы без джозефсоновского контакта. На боковую поверхность вращающегося кварцевого цилиндра \varnothing 0.9 мм магнетронным распылением наносился ниобий толщиной 800-1000 Å. Образцы длиной 5-15 мм помещались в катушку связи \varnothing 1 мм, намотанную в один слой медным проводом \varnothing 0.1 или 0.05 мм, которая включалась

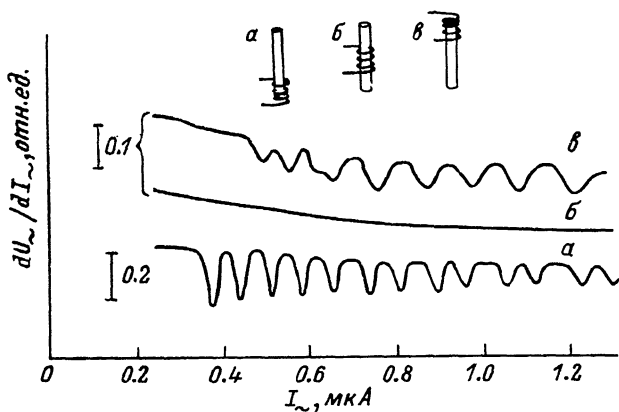


Рис. 1. Зависимость dU_{\sim}/dI_{\sim} от тока накачки I_{\sim} (производная ВЧ-ВАХ) для различных взаимных расположений образца и катушки связи. Кривая (в) получена после анодирования края пленки. Вертикальные отрезки показывают величину сигнала при изменении импеданса контура на 20 % и на 10 % (б, в).

в контур с резонансной частотой 25–30 МГц добротностью $Q \approx \approx 30$.

Записывались ВЧ-ВАХ и сигнальные характеристики резонансного контура с образцом, а также производные dU_{\sim}/dI_{\sim} и dU_{\sim}/dI_{\pm} в зависимости от I_{\sim} и от I_{\pm} . Для измерений производных использовалась амплитудная модуляция соответственно I_{\sim} , либо I_{\pm} на частоте 630 Гц, не превышающая по величине 1 % диапазона развертки. Более подробно измерительная схема описана в [2]. Все измерения проводились в жидком гелии при 4.2 К в сверхпроводящих экранах.

Первые эксперименты показали, что на некоторых опыленных цилиндрах наблюдаются нелинейности на ВЧ-ВАХ, причем эти нелинейности возникают только в том случае, когда торец цилиндра находится в катушке связи. Для выяснения влияния края цилиндра была изготовлена короткая катушка связи (длина 2.5 мм) и были проведены измерения на длинных образцах.

На рис. 1 представлена производная ВЧ-ВАХ и изображено взаимное расположение катушки связи и образца длиной 7 мм. В том случае, когда край цилиндра находится в катушке связи (а) на кривой видны отчетливые минимумы, соответствующие дополнительному поглощению мощности. Их положение зависит от постоянного магнитного поля. Если зафиксировать I_{\sim} в области минимумов и разворачивать I_{\pm} , то на полученной зависимости dU_{\sim}/dI_{\pm} от I_{\pm} (рис. 2, а) видны всплески периодически возникающие при прохождении минимумов производной ВЧ-ВАХ через данный уровень I_{\sim} с периодом $\Delta I \approx 4.6$ мкА. Оценки из размеров катушки и контрольные эксперименты с циммермановским сквидом показали,

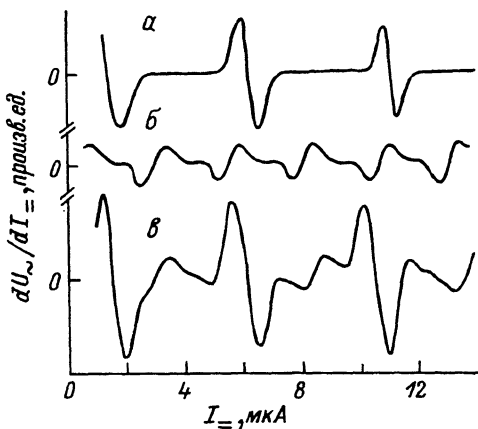


Рис. 2. Зависимость dU_{\sim}/dI_{\sim} от постоянного тока I_{\sim} , когда в катушке связи находятся нижний (а), верхний (б) и оба (в) торца образца.

что период ΔI_{\sim} соответствует потоку через сечение катушки $\Delta\Phi = 23\Phi_0$.

В том случае, когда катушка расположена по центру образца минимумы исчезают и dU_{\sim}/dI_{\sim} не зависит от I_{\sim} и от I_{\sim} (рис. 1, б). Слабый наклон кривой (б) наблюдался и без образца и обусловлен нелинейностью модулятора.

Приведенные результаты можно объяснить следующим образом. Проникновение магнитного поля в цилиндр связано с движением вихрей магнитного потока, перпендикулярных пленке. В том случае, когда торец цилиндра находится в катушке, вблизи края пленки возникают искажения магнитного поля (появляется перпендикулярная пленке составляющая), что существенно облегчает вход и движение вихрей в пленке. Движение вихрей может быть затруднено в результате пиннинга на краю или на дефектах в пленке. Этим объясняется тот факт, что не всегда образец был чувствителен к магнитному полю, когда его торец находился в катушке. Так, другой торец образца, показанного на рис. 1 (положение 1, в), не „работал“, т.е. особенности на производной ВЧ-ВАХ появлялись только при уровнях накачки, превышающих приведенные на рис. 1 значения I_{\sim} на 2 порядка.

Исходя из этой модели, мы решили заставить „работать“ другой край образца, уточнив там ниобиевую пленку. Для этой цели мы использовали электролитическое анодирование ниобия в 1% растворе NH_4Cl . Торец образца погружался в электролит на глубину ~ 0.5 мм и прикладывалось напряжение 30 В (константа анодирования ниобия ~ 10 А/В [3]). Зависимость dU_{\sim}/dI_{\sim} от I_{\sim} для утоненного края изображена на рис. 1 (кривая в), а соответствующая производная сигнальной характеристики на рис. 2, б. Период по потоку в сечении катушки связи в этом случае равен $\sim 12\Phi_0$.

Для наблюдения осцилляций с обоих торцов вместе мы поместили образец в катушку связи, длина которой больше длины образца. Полученная кривая, на которой отчетливо видны особенности с обоих торцов, изображена на рис. 2, в.

В [4] сообщалось, что тонкостенные ниобиевые цилиндры после анодирования могут служить в качестве измерителей магнитного потока. Используя стандартную аппаратуру радиочастотного сквида, авторам работы [4] удалось наблюдать отклик на изменение постоянного магнитного поля, но никаких объяснений этого факта в [4] не предлагалось.

В заключение отметим, что с помощью электролитического анодирования удалось сделать датчик с периодом по постоянному току 0.4 мкА (что соответствует $2 \Phi_0$ в сечении катушки). Шумы прибора определялись шумами электроники. Без оптимизации по шумам получена чувствительность $3 \cdot 10^{-4} \Phi_0 / \sqrt{\Gamma \text{ч}}$.

Мы выражаем благодарность Глазману Л.И. и Мицену К.В. за полезные обсуждения представленных результатов.

Л и т е р а т у р а

- [1] Бароне А., Патерно Дж. Эффект Джозефсона. Физика и применение. М.: Мир, 1984. Гл. 13.
- [2] З а к о с а р е н к о В.М., И л ь и ч е в Е.В., Н и к и - ф о р о в а Т.В., Т у л и н В.А. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. С. 1389.
- [3] Д и д е н к о А.Н., С е в р ю к о в а Л.М., Я т и с А.А. Сверхпроводящие ускоряющие СВЧ-структуры. М.: Энергоиздат, 1981. С. 146.
- [4] G o o d k i n d J.M., J e f f r e y M. // Dundon Rev. Sci. Instr. 1971. V. 42. P. 1264.

Поступило в Редакцию
24 октября 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 1
05.2

12 января 1989 г.

ФЕРРОМАГНИТНОЕ МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКАЯ АНИЗОТРОПИЯ

В.Г. П ы н ь к о, Н.И. К и с е л е в

Зависимость электросопротивления ферромагнитного металла или сплава от ориентации в них вектора намагниченности M_S , обнаруженная в 1857 году Томсоном, в последние 15–20 лет привлекла к себе новое внимание как практиков, так и теоретиков. Внимание