

## ОБНАРУЖЕНИЕ НЕМОНОТОННОГО ПОПЕРЕЧНОГО НАПРЯЖЕНИЯ В ТОНКОЙ СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ ПЛЕНКЕ ИНДУЦИРОВАННОГО ДВИЖЕНИЕМ ВИХРЕЙ

*И.Ю.Антонова, В.М.Закосяренко, Е.В.Ильичев, В.И.Кузнецов,  
В.А.Тулин*

*Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов  
АН СССР*

Поступила в редакцию 8 октября 1991 г.

Впервые экспериментально зарегистрировано предсказанное ранее теоретически индуцированное вихрями поперечное напряжение в сверхпроводящей пленке. Величина напряжения и его немонотонная зависимость от тока объясняются искривлением траектории движения вихрей в результате их взаимодействия. Получено хорошее согласие теории и эксперимента.

Взаимодействие между вихрями магнитного потока разного знака в тонкой сверхпроводящей пленке с током может привести к появлению поперечного по отношению к транспортному току напряжения. Этот эффект был рассмотрен теоретически в <sup>1</sup>. В представленной работе дается экспериментальное подтверждение предсказанного явления.

Суть расчетов <sup>1</sup> заключается в следующем. Магнитное поле транспортного тока проникает в полосу из пленки в виде вихрей разного знака из-за различного направления поля на противоположных краях пленки. Вследствие притяжения между вихрями траектории их движения искривляются, если они входят в пленку с противоположных краев в местах, смещенных вдоль тока. В результате этого возникает поперечное напряжение, причем поперечная вольт-амперная характеристика (ВАХ) оказывается немонотонной.

Изготовление образцов состояло из следующих основных этапов: 1) термическое напыление олова толщиной  $d = 400 - 700 \text{ \AA}$  на кремниевые подложки; 2) формирование рисунка в резисте с помощью электронной литографии; 3) травление пленки в плазме аргона. Центральная часть образца показана на вставке к рис. 1. Образец представляет собой полосу пленки шириной  $w = 4 - 8 \text{ мкм}$  с поперечными потенциальными подводами. Для облегчения вхождения вихрей магнитного потока в пленке сделаны насечки А, смещенные вдоль течения тока на ширину потенциальных подводов  $s = 3 - 5 \text{ мкм}$ . Величина насечек составляла  $0,2 - 0,7 \text{ мкм}$ .

Продольная и поперечная ВАХ записывались на постоянном токе в сверхпроводящем экране, который захолаживался таким образом, что земное поле выталкивалось из экрана при его переходе в сверхпроводящее состояние. Магнитное поле, перпендикулярное пленке, создавалось медным соленоидом, расположенным внутри сверхпроводящего экрана. Температура определялась по давлению паров гелия и стабилизировалась мембранным регулятором откачки. Производная ВАХ измерялась, используя модуляцию тока на звуковых частотах.

На рис.1 представлены типичные продольная (вверху) и поперечная (внизу) ВАХ записанные в нулевом магнитном поле. На поперечной ВАХ отчетливо видны предсказанные в <sup>1</sup> всплески напряжения. Отметим отличия экспериментальных кривых от расчетных. Во-первых, пики напряжения возникают при токах существенно больших, чем  $I_c$  пленки, а в <sup>1</sup> показано, что эти пики должны наблюдаться при токах близких к  $I_c$ . По-видимому, другие участки

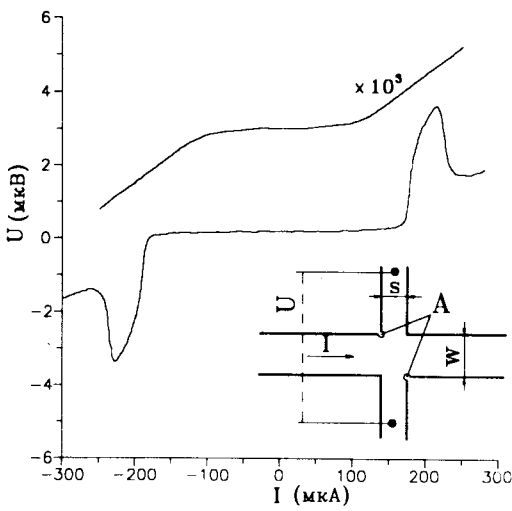


Рис. 1. Продольная (вверху) и поперечная вольт-амперные характеристики. Продольная ВАХ смещена вверх для ясности, а напряжение по вертикальной оси отложено в милливольтх. На вставке изображена центральная часть образца

пленки имеют меньший критический ток, что может быть связано как с неоднородностью пленки, так и с растеканием тока в области перекрестия, поскольку ширина потенциальных контактов порядка ширины пленки. Во-вторых, в <sup>1</sup> на расчетной поперечной ВАХ напряжение после всплеска падает до нуля. Наблюдаемая же нами картина иная - напряжение опускается до некоторого значения и, далее, при росте  $I$  выходит на линейный закон. Такое несоответствие, с нашей точки зрения, объясняется несоосностью потенциальных подводов, которая, в частности, связана с наличием насечек А. Для проверки этого утверждения мы измерили поперечную ВАХ в нормальном состоянии образца при  $T > T_c$ . ВАХ оказалась линейной с сопротивлением для данной структуры  $\sim 10^{-2}$  Ом, что соответствует рассовмещению потенциальных контактов на 0,25 мкм.

Используя экспериментальные данные, можно провести оценку ожидаемого всплеска напряжения на поперечной ВАХ, индуцированного движением и аннигиляцией пары вихрь-антивихрь. Кривые на рис. 1 получены на структуре с параметрами:  $w = 7$  мкм,  $s = 4$  мкм,  $d = 600 \text{ \AA}$ ,  $R_{\square} = 0,28$  Ом,  $T_c = 3,94$  К при температуре  $T = 3,89$  К. Воспользуемся выражением <sup>1</sup>, которым учтена величина смещения точек входа вихрей  $s$ :

$$V \simeq h\Phi_0^2/8\pi^2 w e \eta d \lambda_{\perp} s. \quad (1)$$

Здесь  $e$  - заряд электрона,  $\Phi_0 = hc/2e$  - квант магнитного потока,  $\lambda_{\perp} = 2\lambda^2/d$  ( $\lambda$  - глубина проникновения магнитного поля). Коэффициент вязкости  $\eta$  можно оценить  $\eta \simeq \Phi_0 H_{c2}/\rho c^2$  <sup>2</sup>, тогда, используя  $H_{c2} = \Phi_0/2\pi\xi^2$  и  $\rho/d = R_{\square}$ , произведение

$$\eta d \simeq \Phi_0^2/2\pi c^2 \xi^2 R_{\square}. \quad (2)$$

Оценку длины свободного пробега электрона  $l$  можно сделать по сопротивлению при гелиевой температуре, считая  $\rho l \simeq 6 \cdot 10^{-12}$  Ом  $\cdot$  см <sup>3</sup>. Оценка дает  $l \simeq 360 \text{ \AA}$ , а длина когерентности для олова  $\xi_0 = 2300 \text{ \AA}$  <sup>4</sup>, поэтому последующие вычисления проводятся для случая грязных сверхпроводников <sup>5</sup>:

$$\xi(T) = 0,85(\xi_0 l)^{1/2}(1 - T/T_c)^{-1/2}, \quad (3)$$

а глубину проникновения удобно оценить используя  $R_{\square}$  <sup>6</sup>

$$\lambda_{\perp} (\text{мкм}) \simeq 0,83 R_{\square} (\text{Ом}) / (T_c - T). \quad (4)$$

Вычисления дают  $\lambda_{\perp} \simeq 5$  мкм,  $\eta d \simeq 5 \cdot 10^{-15}$  ед. СГС и, соответственно,  $V \simeq 3$  мкВ. Отметим, что эти, достаточно простые оценки дают хорошее согласие с экспериментом (рис.1). Из равенства силы Лоренца и силы трения (пренебрегая пиннингом) можно оценить скорость движения вихрей  $v = \Phi_0 I / c w d \eta \simeq 5 \cdot 10^5$  см/с. Это значение порядка скорости звука в материале.

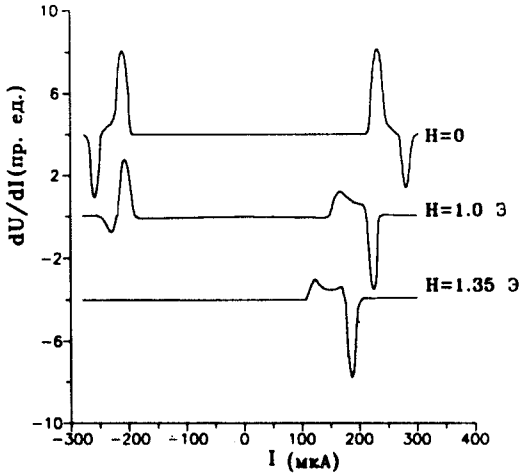


Рис. 2. Производные поперечной вольт-амперной характеристики записанные при 3,89 К в различных магнитных полях. Кривые смещены по вертикали для ясности

На рис.2 представлены производные поперечного напряжения  $dU/dI$  в зависимости от  $I$ , записанные в различных магнитных полях. При  $H = 0$  характеристика имеет симметричный вид. С увеличением поля появляется асимметрия от направления транспортного тока и в поле  $H = 2,3$  Э особенности поперечного напряжения полностью исчезают. Наблюдаемая асимметрия, с нашей точки зрения, объясняется неравноценностью насечек  $A$ .

Таким образом, предсказанный в <sup>1</sup> эффект наблюдается и имеется количественное согласие теории и эксперимента.

В заключение выражаем благодарность Волкову В.Т. и Пронину А.Н. за травление структур.

1. Глазман Л.И., ФНТ, 1986, 7, 688.
2. Bardeen I., Stephen M.I., Phys. Rev., 1965, 140, No 4A, 1197.
3. Ашкрофт Н., Мермин Н., Физика твердого тела. М.: Мир, 1979.
4. Ван Дузер Т., Тернер Ч.У., Физические основы сверхпроводниковых устройств и цепей М.: Радио и связь, 1984.
5. Горьков Л.П., ЖЭТФ, 1959, 36, 1918.
6. Лихарев К.К., ЖЭТФ, 1971, 61, 1700.