

## КОГЕРЕНТНОЕ ДВИЖЕНИЕ ВИХРЕЙ В СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МОСТИКАХ БОЛЬШИХ РАЗМЕРОВ

В. Н. Губанков, В. П. Кошелец, К. К. Лихарев,  
Г. А. Овсянников.

Приведены экспериментальные доказательства того, что в сверхпроводящих пленочных мостиках "переменной толщины" можно реализовать когерентное движение вихрей в отсутствие упорядочивающего воздействия магнитного и СВЧ полей даже в случае, когда размеры мостика намного превышают длину когерентности.

1. Известно, что когерентное движение вихрей в сверхпроводящих пленочных мостиках с размерами, много большими длины когерентности  $\xi(T)$ , удается осуществить синхронизацией их движения внешним СВЧ полем [ 1]. Такая синхронизация облегчается наложением постоянного магнитного поля, нормального к плоскости мостика [ 2].

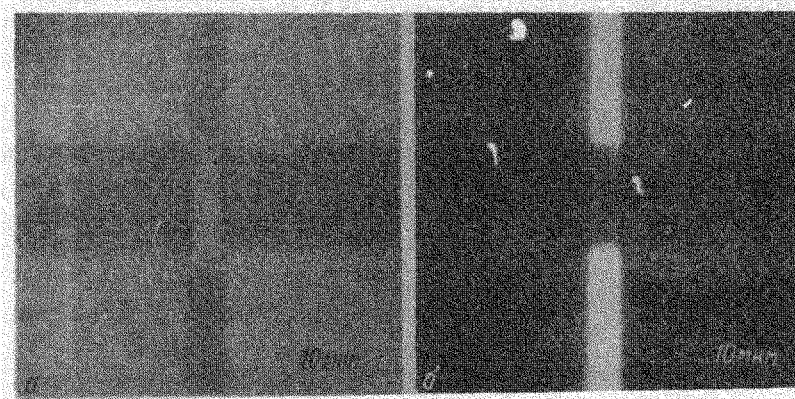


Рис. 1. Микрофотографии типичного мостика в отраженном (а) и проходящем (б) свете

Признаком когерентного движения вихрей в автономном мостике является появление джозефсоновских ступенек тока на его вольт-амперной характеристике (ВАХ) при воздействия слабого (пробного) СВЧ сигнала. Критерием малости этого сигнала может служить отсутствие изменения других участков ВАХ, например, критического тока  $I_c$ . Мы наблюдали этот эффект в оловянных мостиках "переменной" толщины, в которых толщина  $d$  пленки, образующей мостик, значительно меньше толщины  $d_0$  пленки "берегов".

2. Мостики имели прямоугольную форму с характерными размерами: длина  $l$  (размер вдоль транспортного тока)  $\approx 6 + 7$  мкм, ширина  $w \approx 30$  мкм и изготавливались в два этапа. Сначала на подложку из оптически полированного кристаллического кварца напылялись толстые

( $d_0 \approx 2000 \text{ \AA}$ , сопротивление на квадрат  $(R_{\square})_{4,2^{\circ}\text{K}} \approx 10^{-1} \text{ ом}$ ) пленки "берегов", разделенные узким промежутком. Экраном при напылении служила кварцевая нить, диаметр которой определял будущую длину мостика. Затем нить удалялась и устанавливалась маска со щелью шириной  $w$ , через которую производилось напыление тонкой ( $d \sim 50 + 100 \text{ \AA}$ ,  $(R_{\square})_{4,2^{\circ}\text{K}} \approx 2 + 10 \text{ ом}$ ) пленки мостика. Фотография одного из изготовленных таким способом мостиков показана на рис. 1.

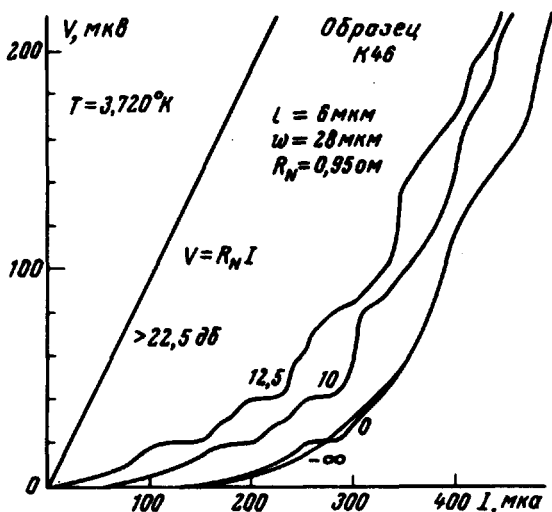


Рис. 2. Семейство ВАХ при различных уровнях падающей СВЧ мощности (частота 9,86 Гц)

3. На рис. 2 показано влияние СВЧ-излучения (длина волны 3 см) на ВАХ одного из мостиков. Видно, что при слабом сигнале первая джозефсоновская ступенька тока является симметричной относительно ВАХ автономного мостика, что, как известно, является характерным для когерентных джозефсоновских систем.

Как было показано в работе [3], возможность осуществления когерентного движения вихрей в мостиках "переменной" толщины связана с четкой локализацией области движения вихрей. Движущийся в таком мостике вихрь эффективно отталкивается от своих позитивных изображений в берегах. Поэтому если электродинамический размер вихря (порядка характерной глубины проникновения нормального магнитного поля в пленку  $\delta_{\perp}$ ) больше  $\ell$  и, кроме того,  $w \gg \ell$ , при увеличении тока движение первых вихрей осуществляется в одну строку и при достаточно малых неоднородностях пленки является когерентным.

То, что разрушение мейсснеровского состояния мостика транспортным током происходит за счет образования единичной движущейся строки вихрей, подтверждается также совпадением экспериментальных значений  $I_c$  при температурах  $T$ , близких к критической  $T_c$ , с вычисленными в [3]. Например, для образца К46 в диапазоне  $5 \cdot 10^{-2} \text{ K} \lesssim (T_c - T) \lesssim 2 \cdot 10^{-1} \text{ K}$ , в котором выполнялись предполагаемые теорией [3] неравенства  $\xi \ll \ell \ll w \ll \delta_{\perp}$ , критический ток  $I_c \sim (T_c - T)$  и  $|dI_c/dT| = (2,0 \pm 0,1) \text{ ма/К}$ , тогда как теория дает  $|dI_c/dT| = (2,1 \pm 0,2) \text{ ма/К}^1$ .

1) Здесь учтено, что  $I_c$  на самом деле в  $\pi$  раз больше даваемого формулой (5) в [3].

При увеличении тока через мостик становится возможным образование второй и следующих строк вихрей. Это должно приводить к периодическим изменениям дифференциального сопротивления  $R_g$  с ростом тока. Такой эффект наблюдался у всех мостиков (см., например, рис. 2, а также рис. 3, где показано изменение вида ВАХ при изменении температуры). При этом количество осцилляций  $R_g$  до выхода на линейную асимптоту с  $R_g = R_N$  примерно равно максимальному количеству  $N$  строк вихрей, вычисленному из условия разрушения сверхпроводимости. (используя выражение для  $H_{c2}$ , имеем  $N \sim 0,4 e / \xi$ ).

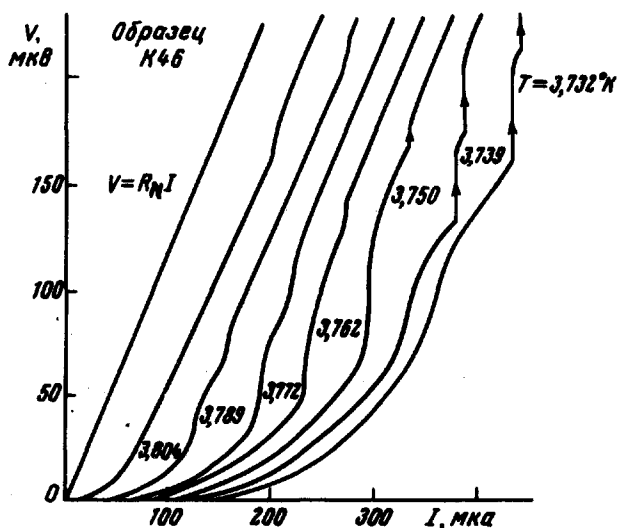


Рис. 3. Семейство ВАХ при изменении температуры. Падающие участки при относительно низких значениях  $T$  обусловлены неизотермичностью ВАХ [4]

4. Следует отметить, что поведение некоторых из изготовленных подобным образом мостиков отличалось от описанного. Именно, джозефсоновские ступеньки тока не наблюдались, одновременно имело место небольшое ( $\leq 10\%$ ) увеличение  $I_c$  под действием СВЧ поля. Кроме того, для этих же мостиков значения  $I_c$ , как правило, были больше полученных из теории. Качественно эти результаты можно объяснить, предполагая, что в данных случаях неизбежно присутствующие неоднородности пленки мостика создают такое расположение слабых участков<sup>2)</sup>, что движение вихрей происходит по "каналу", проходящему в основном через них. Тогда остальные участки мостика фактически играют роль "берегов", т.е. эффективная длина мостика уменьшается и  $I_c$  должен возрастать. При этом в области динамического смешанного состояния токи становятся больше тока распаривания слабых участков и обуславливают практически полное разрушение сверхпроводимости в "канале". Джозефсоновские ступеньки тока при этом, естественно, отсутствуют. В этих условиях не является удивительным и появление сверхпроводимости, стимулированной СВЧ полем, так как этот эффект наблюдается в мостиках с длиной порядка  $\xi$  [5].

5. Таким образом, результаты настоящей работы дают основание полагать, что в достаточно однородных сверхпроводящих мостиках с

2) То есть областей локальных минимумов собственной энергии вихря.

размерами гораздо больше  $\xi$  реализуется когерентное движение вихрей даже в отсутствие упорядочивающего действия магнитного и СВЧ полей. Из таких мостиков, по всей вероятности, возможно непосредственное наблюдение джозефсоновской генерации.

Институт радиотехники  
и электроники  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
10 июля 1973 г.

### Литература

- [ 1 ] P.Anderson, A.Dayem. Phys. Rev. Lett., 13, 195, 1964.
  - [ 2 ] A.T.Fiory. Phys. Rev. Lett., 27, 501, 1971.
  - [ 3 ] К.К.Лихарев. ЖЭТФ, 61, 1700, 1971.
  - [ 4 ] В.Н.Губанков, К.К.Лихарев, Н.М.Марголин. ФТТ, 14, 953, 1972.
  - [ 5 ] A.F.G.Wyatt, V.M.Dmitriev, W.S.Moore, F.S.Sheard. Phys. Rev. Lett., 16, 1166, 1966; A.Dayem, I.Wiegand. Phys. Rev., 155, 419, 1967.
-