

## ДВОЙНОЙ РАЗМЕРНЫЙ ПЕРЕХОД $3D-2D-3D$ В СВЕРХПРОВОДЯЩИХ СЛОИСТЫХ СТРУКТУРАХ V/Cu

В.И. Дедю, В.А. Обознов, В.В. Рязанов,  
А.Г. Сандлер, А.С. Сидоренко

Обнаружено немонотонное изменение с температурой ширины сверхпроводящих переходов многослойных структур ванадий–медь в магнитном поле, а также изменения вида зависимости критического поля  $H_{c2}(T)$ , которые связываются с двойным размерным переходом  $3D-2D-3D$  в структуре при изменении температуры и магнитного поля.

Анизотропия критических магнитных полей и наличие  $3D-2D$ -размерного перехода (кроссовера) обнаружены к настоящему времени как в искусственно созданных слоистых сверхпроводящих структурах (ССС) <sup>1-3</sup>, так и в многокомпонентных сверхпроводниках, в том числе, монокристаллах ВТСП <sup>4</sup>. В зависимости от периода слоистой структуры  $d$  и температуры в <sup>3</sup> введена следующая классификация СССР:  $2D$ -сильносвязанные,  $2D$ -связанные,  $3D$ -структуры. Трехмерные состояния в СССР с кроссовером наблюдались до сих пор только при температурах, близких к критической; в частности, и в структурах SNS-типа с промежуточными слоями из нормального металла. Однако в SNS-структурах при низких температурах возможен обратный  $2D-3D$ -переход, если толщина нормальных слоев  $d_N$  мала по сравнению с длиной когерентности в нормальном металле  $\xi_N(T)$ . При удачном соотношении нормальных проводимостей и длин когерентностей в  $S$ - и  $N$ -слоях параметр порядка в  $N$ -слое в этом случае практически не подавлен по сравнению с соседним сверхпроводником. Наблюдению  $2D-3D$ -размерного перехода при низких температурах в слоистых структурах V/Cu посвящена данная работа.

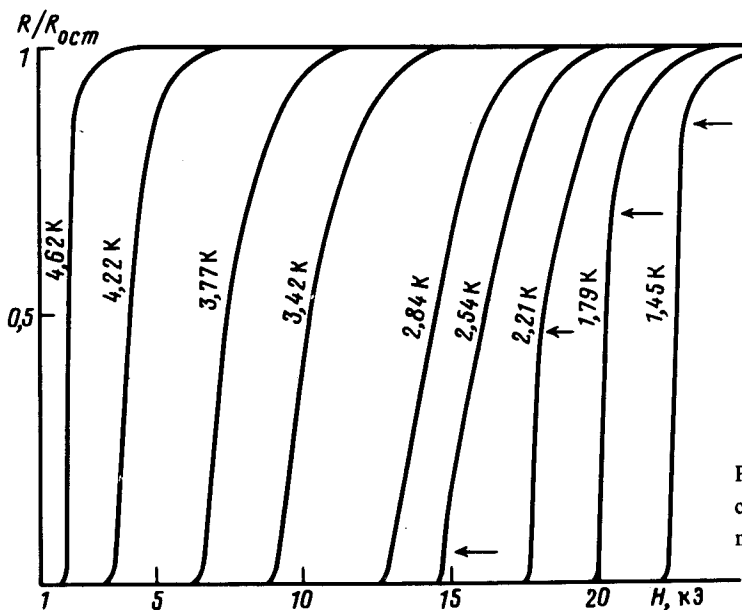


Рис. 1. Зависимости  $R(H)$  для структуры V/Cu (250 А/100 А) при различных температурах

В работе исследовались резистивные сверхпроводящие переходы  $R(H, T)$  структур V/Cu в широком интервале температур и магнитных полей. Структуры были изготовлены методом высокочастотного ионно-плазменного распыления в высоковакуумной установке; в качестве подложек использовались монокристаллические кремниевые пластины. Толщина слоев ва-

надия  $d_V$  составляла  $250 \text{ \AA}$ , толщина медных слоев в разных образцах варьировалась от 100 до  $250 \text{ \AA}$ . Все образцы имели 10 слоев ванадия и 11 медных слоев; для подавления поверхностной сверхпроводимости и предотвращения образования соединений V-Si первые и последние слои структур были медными. На рис. 1 представлены зависимости  $R/R_{\text{ост}}(H)$  в параллельном поле для структуры V/Cu ( $250 \text{ \AA}/100 \text{ \AA}$ );  $R_{\text{ост}}$  измерялось в сильных магнитных полях, подавляющих сверхпроводимость. Вблизи  $T_c(0)$  переходы  $R(H)$  довольно узкие; по мере удаления от  $T_c(0)$  вместе с увеличением  $H_{c2}$  происходит уширение переходов, сопровождающее кроссовер структуры в  $2D$ -состояние с разделенными двумерными сверхпроводящими слоями. При низких температурах, однако, переходы  $R(H)$  снова начинают сужаться, при этом на зависимостях  $R(H)$  можно выделить в конце перехода область аномально резкого уменьшения сопротивления, которая с понижением температуры постепенно распространяется на весь переход. Аналогичное поведение обнаружено и на структурах с другими соотношениями толщин слоев ванадия и меди, причем по мере увеличения толщины медных прослоек  $d_{\text{Cu}}$  сужение переходов  $R(H)$  начинается при более низких температурах. На зависимостях  $R(H)$  для перпендикулярных полей никаких аномалий обнаружено не было.

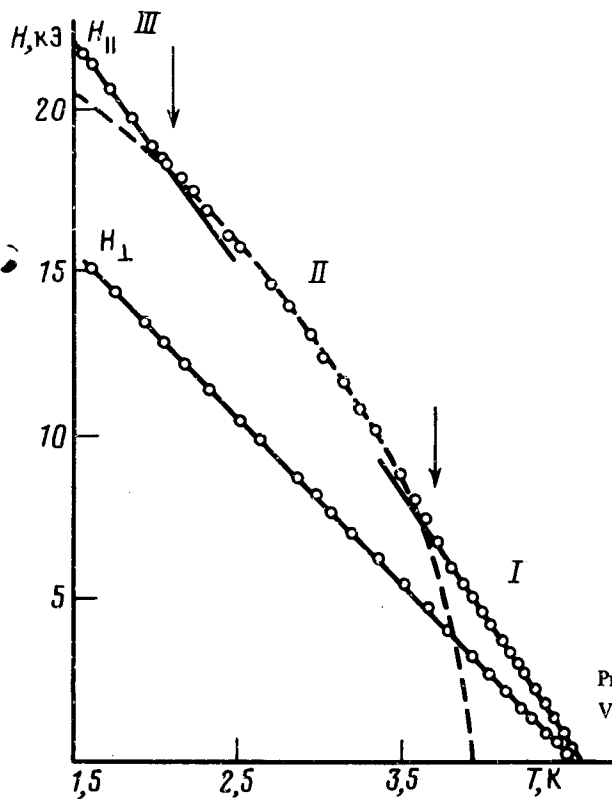


Рис. 2. Зависимости  $H_{c2}(T)$  для структуры V/Cu ( $250 \text{ \AA}/150 \text{ \AA}$ )

На рис. 2 показаны температурные зависимости параллельного и перпендикулярного критических магнитных полей  $H_{c2}^{\parallel}$  и  $H_{c2}^{\perp}$  для структуры V/Cu ( $250 \text{ \AA}/150 \text{ \AA}$ ). Величина  $H_{c2}$  определялась по уровню сопротивления  $0,5R_{\text{ост}}$ . Определение  $H_{c2}$  по другим уровням не изменяет качественную картину.  $H_{c2}^{\perp}$  линейно зависит от  $T$  во всей области температур, что типично для слоистых структур<sup>2</sup>. Вместе с тем, на зависимостях  $H_{c2}^{\parallel}(T)$  можно выделить три участка. Вблизи  $T_c$  зависимость линейна ( $H_{c2}^{\parallel} \sim (T_c - T)$ ) и переходит в корневую зависимость ( $H_{c2}^{\parallel} \sim (T_c^* - T)^{1/2}$ ) по мере удаления от  $T_c$ , что согласуется с предположением о размерном переходе ( $3D-2D$ ) в данной структуре<sup>1-4</sup>. При более низких температурах ( $T \approx 0,4T_c$ ) наблюдается отклонение от корневого закона, и температурная зависимость  $H_{c2}^{\parallel}$  становится опять близкой к линейной.

Наблюдаемые зависимости  $R(H)$  и  $H_{c2}^{\parallel}(T)$  можно объяснить, если предположить, что в исследуемом температурном диапазоне в системе происходит двойной кроссовер  $3D-2D-3D$ . Первый переход происходит, когда при уменьшении температуры длина когерентности анизотропной  $3D$ -структуры ( $\xi^{\perp}(T) \sim (T_c - T)^{1/2}$ ) сравнивается с расстояниями между  $S$ -слоями  $d_{Cu}^{2-3}$ . На основе результатов, представленных на рис. 2, можно оценить  $\xi^{\perp}(T = 3,6 \text{ K}) \approx 170 \text{ \AA}$  при температуре первого кроссовера для структуры с  $d_{Cu} \approx 150 \text{ \AA}$ . При дальнейшем уменьшении температуры (до  $T \approx 2 \text{ K}$  на рис. 2) состояние с изолированными  $2D$ -сверхпроводящими слоями, по-видимому, разрушается в связи с увеличением длины когерентности в  $N$ -слоях ( $\xi_N \sim T^{-1/2}$ ) и возникновением в них значительного параметра порядка. В отсутствие подробного численного расчета, подобного <sup>6</sup>, для наших  $SN$ -структур трудно объяснить, почему  $2D-3D$ -переход происходит именно при этих температурах и толщинах структуры; наши оценки показывают, что  $\xi_N(T)$  значительно превышает  $d_{Cu}$  уже при  $T \approx 4 \text{ K}$ . Вместе с тем, мы обращаем внимание, что в аналогичном эксперименте <sup>3</sup> на Nb/Cu-структурах ( $d_{Cu} = d_{Nb} \approx 170 \text{ \AA}$ ) при  $T \approx 1,2 \text{ K}$  была получена угловая зависимость  $H_{c2}$ , соответствующая  $3D$ -анизотропному случаю, которая не нашла четкого объяснения.  $3D$ -состояние может разрушаться в ходе резистивного перехода, в связи с подавлением параметра порядка; соответствующие точки показаны на рис. 1 стрелками. С увеличением толщины медных слоев переход  $2D-3D$  на кривых  $H_{c2}^{\parallel}(T)$  смещается в область более низких температур, что согласуется с приведенными рассуждениями.

Авторы выражают благодарность А.А.Голубу и А.А.Голубову за полезные обсуждения.

#### Литература

1. Ruggiero S.T. et al. Phys. Rev. Lett., 1980, 45, 1299.
2. Chun C.S.L. et al. Phys. Rev. B, 1984, 29, 4915.
3. Banerjee I., Shuller I.K. J.Low.Temp.Phys., 1984, 54, 501.
4. Фогель Н.Я. и др. Тезисы XXV Всесоюз. совещ. по физ. низк. темп. Ленинград, 1988, ч. 1, с. 235.
5. Голубов А.А. и др. Микроэлектроника, 1983, 12, 342.
6. Takahashi S., Tachiki M. Phys. Rev. B, 1986, 33, 4620.

Институт физики твердого тела  
Академии наук СССР

Институт прикладной физики  
Академии наук Молдавской ССР

Поступила в редакцию  
25 апреля 1989 г.