Физика низких температур, 1995, т. 21, № 12, с. 1258–1260 УДК 538.945

Наблюдение экстремального увеличения сверхпроводящих параметров внутреннего слоя Nb/Al в ниобиевых структурах с двойным туннельным барьером

И. П. Невирковец

Институт металлофизики НАН Украины, Украина, 252142, г. Киев, пр. Вернадского, 36
E-mail: ipn@d24imp.kiev.ua

М. Г. Бламайер, Дж. Е. Иветс

Department of Materials Science & Metallurgy, University of Cambridge, Pembroke Street, Cambridge CB2 3QZ, UK

Статья поступила в редакцию 4 мая 1995 г., после переработки 1 августа 1995 г.

Изготовлены и исследованы двойные туннельные переходы Nb/Al–AlO_x–Nb′/Al–AlO_x–Nb и Nb/Al/Nb′/Al–AlO_x–Nb″/Al–AlO_x–Nb′/Al/Nb. Обнаружено увеличение сверхпроводимости двойного слоя Nb′/Al при $T = 4{,}2$ K в структурах первого типа, если собственная сверхпроводимость Nb′ (Nb″) подавлена, а толщина двойных слоев Nb′/Al (Nb″/Al) порядка длины когерентности в ниобии. Эффект усиления сверхпроводимости двойного слоя Nb′/Al в структурах первого типа по сравнению со сверхпроводимостью двойного слоя Nb″/Al в структурах второго типа включает как увеличение энергетической щели, так и увеличение плотности критического тока Джозефсона при напряжении $V = 0$, измеренном поперек всех слоев структуры. Эти эффекты свидетельствуют о возможности значительного наведения сверхпроводимости в тонком двойном слое Nb′/Al из внешних более толстых ниобиевых электродов, обладающих лучшими сверхпроводящими свойствами, вследствие эффекта близости через туннельный барьер.

Виготовлено та досліджено подвійні тунельні переходи Nb/Al–AlO_x–Nb′/Al–AlO_x–Nb та Nb/Al/Nb′/Al–AlO_x–Nb″/Al–AlO_x–Nb′/Al/Nb. Виявлено збільшення надпровідності подвійного шару Nb′/Al в структурах першого типу при $T = 4{,}2$ K, якщо власна надпровідність Nb′ (Nb″) ослаблена, а товщина подвійних шарів Nb′/Al (Nb″/Al) по порядку величини дорівнює довжині когерентності в ніобії. Ефект підсилення надпровідності подвійного шару Nb′/Al в структурах першого типу порівняно з надпровідністю подвійного шару Nb″/Al в структурах другого типу включає як збільшення енергетичної щілини, так і збільшення густини критичного струму Джозефсона при напрузі $V = 0$, виміряного поперек всіх шарів структури. Ці ефекти свідчать про можливість значного наведення надпровідності в тонкому подвійному шарі Nb′/Al із зовнішніх більш товстих та краще надпровідних ніобієвих електродів внаслідок ефекту близькості черєз тунельний бар'єр.

В настоящее время внимание различных групп исследователей привлекает изучение физических явлений в двух- и многобарьерных туннельных структурах, в частности, возможность значительного усиления сверхпроводимости в тонкой пленке, заключенной между двумя туннельными барьерами [1,2]. Стимуляция сверхпроводимости наблюдалась в пленке алюминия при напряжениях, близких к сумме энергетических щелей сверхпроводников, и связывалась с экстракцией квазичастиц [1]. Этот механизм стимуляции сверхпроводимости эффективен для сверхпроводников с большими временами рекомбинации квазичастиц. Одним из таких сверхпроводников является алюминий. С другой стороны, такие материалы, как ниобий и более высокотемпературные сверхпроводники, обладают короткими временами неупругого рассеяния квазичастиц и наблюдение значительного эффекта стимуляции сверхпроводимости на них маловероятно. О незначительном усилении сверхпроводимости пленок ниобия в двойных туннельных переходах сообщалось в работе [3]. В настоящей работе представлены экспериментальные данные, свидетельствующие о возможности значительного усиления сверхпроводящих свойств тонких (толщиной порядка длины когерентности ниобия) двойных слоев Nb/Al с пониженной собственной сверхпроводимостью Nb [4].

Двойные туннельные переходы изготовлялись при помощи технологии, описанной в работе [5], из структур двух типов: Nb/Al–AlO_x–Nb′/Al–AlO_x–Nb — обычной и Nb/Al/Nb′/Al–AlO_x–Nb″/Al–AlO_x–Nb′/Al/Nb — модифицированной геометрии

© И. П. Невирковец, М. Г. Бламайер, Дж. Е. Иветс, 1995

(МГ). Структуры изготовлялись таким образом, что соответствующая каждой обычной структуре МГ структура создавалась в одинаковых условиях и с одинаковыми толщинами соответствующих слоев, но дополнительно вводились двойные слои Al/Nb′ и Nb′/Al соответственно под нижним и над верхним туннельными барьерами, причем алюминий в этих двойных слоях не окислялся. Толщины всех пленок алюминия для одной и той же структуры после стадии напыления были одинаковыми, так же, как и толщины пленок Nb′ и Nb″. Толщины самого верхнего и самого нижнего слоев ниобия для всех изготовленных структур равнялись соответственно 90 и 150 нм, в то время как толщины других слоев варьировались для структур, полученных в разных циклах изготовления.

На рис. 1 показаны вольт-амперные характеристики (ВАХ) двухвыводных устройств — двойных туннельных переходов, изготовленных из обычной (*1*) и МГ (*2*) структур. На вставке рис. 1 схематически показана геометрия двойных переходов (*A* и *B* для обычной и МГ структуры соответственно) в сечении. Все двойные слои (Al/Nb′, Nb′/Al и Nb″/Al) непосредственно после стадии напыления имели толщину 13 нм. Как видно из рисунка, введение дополнительных двойных слоев Al/Nb′ и Nb′/Al в МГ структуру приводит к очень значительному изменению ВАХ двойных туннельных переходов по сравнению с ВАХ двойных переходов, изготовленных из соответствующих обычных структур. В частности, в устройстве на базе МГ структуры наблюдается значительное уменьшение как критического тока Джозефсона, так и суммы энергетических щелей. Причем уменьшение критического тока Джозефсона не связано с уменьшением прозрачности туннельных барьеров. Напротив, удельное туннельное сопротивление для переходов МГ структуры даже несколько меньше, чем удельное туннельное сопротивление более высокоомного туннельного перехода обычной структуры (который и определяет критический ток всего устройства).

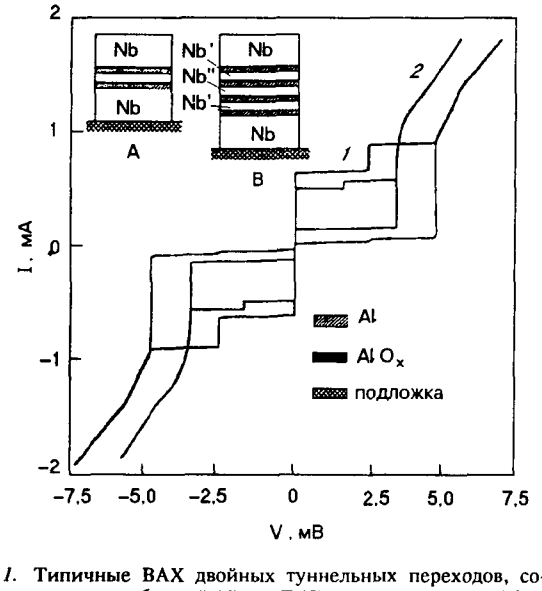

Рис. 1. Типичные ВАХ двойных туннельных переходов, созданных на основе обычной (*1*) и МГ (*2*) структур при $T = 4{,}2$ К. Площадь переходов равна 9×9 мкм. На вставке схематически показана геометрия обычной *A* и МГ структур *B*.

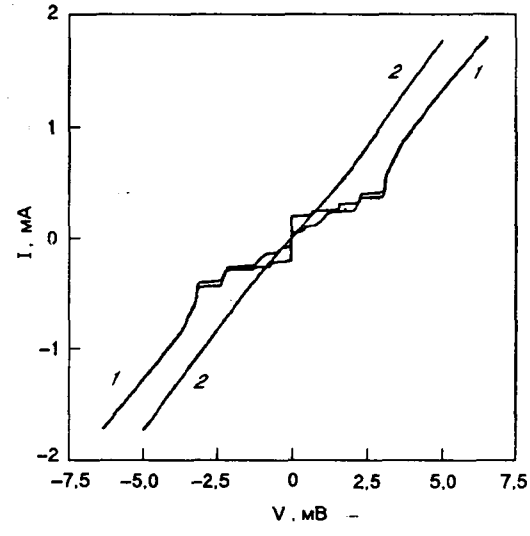

Рис. 2. ВАХ тех же устройств, характеристики которых приведены на рис. 1, при $T = 6{,}4$ К. Кривые *1* и *2* соответствуют обычной и МГ структурам.

Более наглядно отличие в сверхпроводящих свойствах обычной и МГ структур видно на рис. 2, на котором приведены ВАХ тех же устройств при $T = 6{,}4$ К. При этой температуре устройства, изготовленные из обычной структуры, ведут себя как переходы типа *S*–*I*–*S*′–*I*–*S*, в то время как устройства, изготовленные из МГ структуры, являются переходами типа *S*–*I*–*N*–*I*–*S*. Нами установлено, что путем подбора технологических параметров на основе МГ структуры можно создать переходы типа *S*–*I*–*N*–*I*–*S* даже при $T = 4{,}2$ К, в этом случае отличие обычной и МГ структур становится еще более ярко выраженным.

Энергетическая щель двойного слоя Nb′/Al, вычисленная для переходов обычного типа по ВАХ в магнитном поле (достаточном по величине для наблюдения особенности, связанной с полуразностью энергетических щелей), при $T = 4{,}2$ К равна $\Delta = 1{,}0$ мэВ, а для внешних электродов $\Delta = 1{,}38$ мэВ. Для МГ переходов (рис. 1, кривая *2*) среднее значение энергетической щели при этой же температуре равно 0,85 мэВ. Хотя это значение, очевидно, является верхней оценкой для Δ двойного слоя Nb″/Al МГ структуры, оно значительно меньше, чем Δ среднего слоя Nb′/Al обычной структуры. Этот результат является необычным ввиду того, что все рассматриваемые нами двойные слои Nb′/Al в

обычной структуре и Al/Nb′, Nb′/Al и Nb″/Al в МГ структуре были приготовлены в одинаковых технологических условиях и должны иметь одинаковые физические свойства. Наш опыт создания многослойных туннельных структур показывает [6], что по крайней мере при количестве туннельных барьеров порядка десяти ухудшения свойств сверхпроводящих слоев с увеличением высоты стопки не происходит. Единственной, на наш взгляд, возможной причиной происхождения данного эффекта является влияние того окружения, в котором находится рассматриваемый тонкий двойной слой Nb′/Al (Nb″/Al). В МГ структуре наиболее глубокий слой Nb″/Al окружен подобными же слоями (с ухудшенными сверхпроводящими свойствами) вне туннельных барьеров. Поэтому он имеет величину энергетической щели значительно меньшую, чем двойной слой Nb′/Al в обычной структуре, который вместе с туннельными барьерами заключен между относительно толстыми пленками Nb с лучшими сверхпроводящими свойствами.

Таким образом, сверхпроводящие свойства внутренних по отношению к двойному барьеру слоев сильно зависят от свойств внешних электродов. Поскольку увеличенное значение энергетической щели внутреннего электрода для обычной структуры (по сравнению с энергетической щелью внутреннего электрода МГ структуры) коррелирует с увеличенным значением постоянного тока Джозефсона при $V = 0$, оно не может быть обусловлено неравновесными эффектами. Такое увеличение полностью нельзя объяснить и каким-либо взаимодействием Nb′ и Al на границе в двойном слое Nb′/Al, ибо в таком случае не было бы различия в сверхпроводящих свойствах внутреннего слоя Nb′/Al в обычной структуре и двойного слоя Nb″/Al в МГ структуре. Повышение в столь значительной степени T_c пленок Al вследствие технологических причин следует исключить по тем же соображениям, а кроме того, из независимых экспериментов [1] нами было установлено, что T_c таких алюминиевых пленок составляет 2,4 K.

На основании результатов проведенных экспериментов мы пришли к выводу, что в двойных туннельных переходах на базе ниобия может происходить значительное увеличение энергетической щели внутреннего двойного слоя Nb′/Al. Оно может быть связано с наведением сверхпроводимости внешнего ниобиевого электрода из-за эффекта близости через туннельный барьер, а не с неравновесной стимуляцией сверхпроводимости. В данном случае может реализоваться ситуация, теоретически предсказанная Куприяновым и Лукичевым [7], а именно, двухбарьерный переход может вести себя как один джозефсоновский переход. Признаки такого поведения наблюдались нами ранее для подобных структур [8]. Однако для количественного анализа этих структур в рамках теории эффекта близости [7,9,10] необходимо более детальное знание параметров пленок, из которых состоит структура, в особенности величины удельного сопротивления тонких слоев Nb и Al в нормальном состоянии. Выполнение данной задачи является целью наших дальнейших исследований.

Авторы выражают благодарность А. А. Голубову, М. Ю. Куприянову, Э. М. Руденко и С. Е. Шафранюку за обсуждение результатов работы и ценные замечания.

1. M. G. Blamire, E. C. G. Kirk, J. E. Evetts, and T. M. Klapwijk, *Phys. Rev. Lett.* **66**, 220 (1991).
2. А. В. Зайцев, *Письма в ЖЭТФ* **55**, 66 (1992).
3. G. A. Ovsyannikov, K. V. Pobydzey, and L. V. Fillipenko, *Physica* **B194–196**, 2397 (1994).
4. В. А. Комашко, В. И. Попов, С. А. Козийчук, И. В. Белоусов, С. П. Репецкий, *Электроника СВЧ* **4**, 106 (1976).
5. H. Amin, M. G. Blamire, K. Page, and J. E. Evetts, *IEEE Trans. Magn.* **27**, 3145 (1991).
6. I. P. Nevirkovets, H. Kohlstedt, and C. Heiden, *Cryogenics* **32**, 583 (1992); H. Kohlstedt, G. Hallmanns, I. P. Nevirkovets, D. Guggi, and C. Heiden, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **3**, 2197 (1993).
7. М. Ю. Куприянов, В. Ф. Лукичев, *ЖЭТФ* **94**, 139 (1988).
8. I. P. Nevirkovets, J. E. Evetts, and M. G. Blamire, *Phys. Lett.* **A187**, 119 (1994).
9. А. А. Голубов, М. Ю. Куприянов, В. Ф. Лукичев, *ФНТ* **10**, 799 (1984).
10. А. А. Голубов, М. Ю. Куприянов, *ЖЭТФ* **96**, 1420 (1989).

Observation of the extreme enhancement of superconducting properties of the middle Nb/Al layer in the double-barrier tunnel structures

I. P. Nevirkovets,
M. G. Blamire, and J. E. Evetts

Double tunnel junctions Nb/Al–AlO_x–Nb′/Al–AlO_x–Nb and Nb/Al/Nb′/Al–AlO_x–Nb″/Al–AlO_x/Al/Nb *have been fabricated and investigated. It is found that if the thicknesses of the* Nb′/Al (Nb″/Al) *bilayers is of order of the coherence length in Nb, and the superconductivity of the thin* Nb′ (Nb″) *layers is originally reduced, the enhancement of superconductivity of the middle* Nb′/Al *bilayer in the first type of devices occures at* $T = 4{,}2$ K. *The effect involves both a considerable enhancement of the superconducting energy gap and an increase of the dc Josephson critical current density when measured across all the layers. The effect is supposed to be due to induction of superconductivity (proximity effect) in the* Nb′/Al *bilayer from the outermost Nb electrodes through the tunnel barriers.*