

Баллистический контактанс точечного контакта: высокотемпературный сверхпроводник/сильный ферромагнетик

Б.П. Водопьянов

Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского РАН, 420029 Казань, Россия

Проанализированы баллистические транспортные свойства контактов между высокотемпературными сверхпроводниками (ВТСП) и сильными металлическими ферромагнетиками. Вычислена зависимость подщелевого (андреевского) контактанса от степени поляризации зоны проводимости ферромагнетика. Найдено, что при наличии квазичастичных связанных состояний, локализованных в области контакта, нормированный андреевский контактанс меньше двух для любых значений коэффициента прохождения.

Основным отличием ВТСП от обычных s-волновых сверхпроводников является анизотропность параметра порядка. В настоящее время считается установленным [1, 2], что параметр порядка в ВТСП материалах имеет $d_{x^2+y^2}$ симметрию. Сверхпроводники с d-волновой симметрией имеют внутреннюю, зависящую от импульса фазу, которая сильно влияет на транспортные свойства контактов между ними и другими материалами. В работе [3] было показано, что когда угол α между a-осью ВТСП кристалла и нормалью к поверхности высокоомного контакта отличен от нуля, то вблизи высокоомной границы на уровне Ферми образуются квазичастичные связанные состояния. В работах [4, 5] было показано, что эти связанные состояния приводят к острому пику в нормированном туннельном контактансе ВТСП с обычными [4] и ферромагнитными [5] металлами при нулевом напряжении. В работе [4] и ряде других статей были сделаны выводы, что высота этих пиков может быть значительно больше двойки, которая появляется в контактах нормальных металлов с s-волновыми сверхпроводниками и характеризует удвоение контактанса из-за Андреевского отражения квазичастиц [6].

В данном докладе представлены результаты анализа расчетов баллистического контактанса точечного контакта: ВТСП /сильный ферромагнетик (S/F), выполненных с целью изучения влияния на контактанс взаимодействия спин поляризованных электронов с квазичастичными связанными состояниями. Расчёты выполнены методом квазиклассических функций Грина с учётом граничных условий для них на границе S/F, выведенных в работе [7] и справедливы при произвольной прозрачности границы. Отражение от границы считалось зеркальным.

На рисунке 1 представлена зависимость нормализованного Андреевского контактанса при нулевом напряжении от степени поляризации зоны проводимости ферромагнетика δ для непосредственного контакта между металлами. Для δ равной единице имеем контакт: ВТСП /нормальный металл. В этом случае наибольшее значение равно двум нормированный контактанс имеет для контакта с s-волновым сверхпроводником (нормировка на контактанс этого же контакта при температуре выше температуры сверхпроводящего перехода). Кондактанс с d – волновым сверхпроводником при угле α равном $\pi/4$ меньше контактанса с s-волновым сверхпроводником при любой прозрачности границы. При угле α равном нулю (связанные состояния отсутствуют) контактанс становится еще меньше.

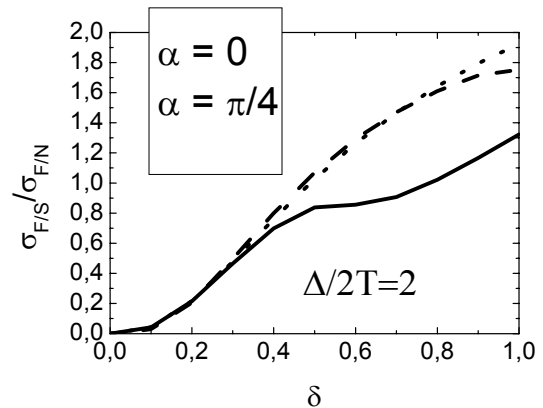


Рис. 1. Дельта равна отношению $p\downarrow/p\uparrow$, $p\downarrow < p\uparrow$, где $p\downarrow$, $p\uparrow$ и $p\downarrow$ – импульсы Ферми сверхпроводника и соответствующих спиновых подзон ферромагнетика, α – угол между a-осью ВТСП кристалла и нормалью к поверхности контакта. Линия из точек соответствует контакту с обычным s-волновым сверхпроводником. Импульс Ферми s-волновых и d – волновых сверхпроводников взят одинаковым.

Укажем физическую причину того, что нормированный андреевский контактанс ВТСП при угле α равном $\pi/4$ не может быть больше двух, несмотря на высокую плотность связанных состояний на поверхности Ферми. Из проведенных расчётов следует, что ширина связанных уровней пропорциональна коэффициенту прохождения. Ток тоже пропорционален коэффициенту прохождения, так что

вклад от связанных состояний в кондактанс становится конечным, а сам кондактанс меньше двух.

На рисунке видно, что по мере роста спиновой поляризации зоны проводимости ферромагнетика, андреевское отражение подавляется. Это связано с тем, что эффективность Андреевского отражения определяется числом проводящих каналов в подзоне с меньшим значением импульса Ферми, в данном случае это $p \downarrow$. В d-волновых сверхпроводниках появляется еще один канал влияния обменного взаимодействия в ферромагнетике на кондактанс. Это влияние осуществляется через анизотропную часть параметра порядка, модулю которой пропорционален кондактанс. Требование равенства параллельной компоненты импульса на границе устанавливает соотношение, зависящее от спиновой поляризации зоны проводимости ферромагнетика, между углом падения электрона на границу из ферромагнетика и анизотропной частью параметра порядка. На рисунке 2 показана зависимость, усредненной по косинусам углов падения электронов из нижней подзоны ферромагнетика, анизотропной части параметра порядка от степени поляризованности зоны проводимости ферромагнетика.

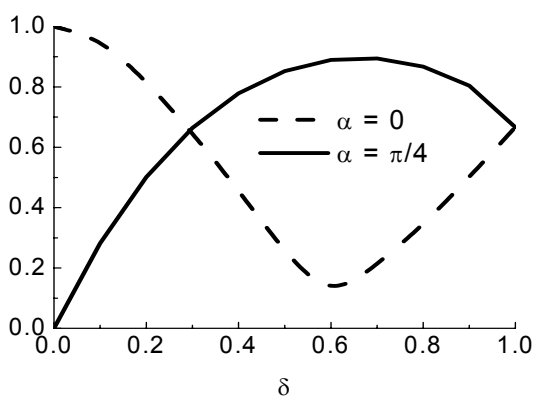


Рис. 2. Зависимость, усредненной по косинусам углов падения электронов из нижней подзоны ферромагнетика, анизотропной части параметра порядка от степени спиновой поляризации зоны проводимости ферромагнетика для двух ориентаций кристаллических осей ВТСП.

Рисунок 2 позволяет лучше понять зависимость нормализованного андреевского кондактанса при нулевом напряжении от степени спиновой поляризации зоны проводимости ферромагнетика, представленную на рисунке 1. С ростом поляризованности ферромагнетика, при ориентационном угле $\alpha = 0$, происходит подавление андреевского отражения как за счет уменьшения числа проводящих каналов, так и за счет подавления анизотропной части параметра порядка, соответствующей этим проводящим каналам. С дальнейшим ростом поляризованности зоны проводимости ферромагнетика подавление анизотропной части параметра порядка, соответ-

ствующей проводящим каналам (их число уменьшается), прекращается и начинается ее рост. Вторым механизмом начинает компенсировать подавление кондактанса за счет уменьшения числа проводящих каналов. Этим объясняется почти горизонтальная зависимость приведенного кондактанса от поляризованности зоны проводимости ферромагнетика при $0,5 < \delta < 0,7$ (см. на рисунок 1). С дальнейшим уменьшением δ подавление андреевского отражения из-за уменьшения числа проводящих каналов доминирует и, при $\delta = 0$, андреевский кондактанс становится равен нулю. Совсем другая ситуация возникает, при ориентационном угле α равном $\pi/4$. Как видно из рисунка 2, рост анизотропной части параметра порядка, соответствующей проводящим каналам, не очень большой и лишь несколько замедляет подавление андреевского отражения из-за уменьшения числа проводящих каналов, но этого роста хватает (см. рисунок 1), чтобы в некоторой области значений δ превзойти андреевский кондактанс для s-волнового сверхпроводника.

Таким образом нами получены следующие новые результаты:

1. Найдена зависимость андреевского кондактанса точечного контакта сильный ферромагнетик/ВТСП от спин-зависящих коэффициентов прохождения и отражения.
2. Найдена ширина квазичастичных связанных состояний локализованных у границы сильный ферромагнетик/ВТСП и установлена их зависимость от спин-зависящих коэффициентов прохождения и отражения.
3. Найдено, что вклад квазичастичных связанных состояний в андреевский кондактанс конечен и не может быть больше двух.
4. Найдена зависимость андреевского кондактанса точечного контакта сильный ферромагнетик/ВТСП от степени спиновой поляризации зоны проводимости ферромагнетика.
5. Изучены механизмы влияния обменного взаимодействия в ферромагнетике на величину андреевского кондактанса точечного контакта сильный ферромагнетик/ВТСП.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, грант № 03-02-17432.

1. D.J. Van Harlingen, Rev. Mod. Phys. 67, 515 (1995).
2. C.C. Tsuei and J.R. Kirtley, Rev. Mod. Phys. 72, 969 (2000).
3. C.-R. Hu, Phys. Rev. Lett. 72, 1526 (1994).
4. Y. Tanaka and S. Kashiwaya, Phys. Rev. Lett. 74, 3451 (1995).
5. S. Kashiwaya, Y. Tanaka, N. Yoshida, and M.R. Beasley, Phys. Rev. B, 60, 3572 (1999).
6. G.E. Blonder, M. Tinkham, and T.M. Klapwijk, Phys. Rev. B, 25, 4515 (1982).
7. Б.П. Водопьянов, Л.Р. Тагиров, Письма в ЖЭТФ, 153 (2003) [JETP Letters 77, 126 (2003)].