Физика низких температур, 1996, т. 22, № 9, с. 1095–1099

Электро- и теплопроводность конических тепловых контактов, используемых при сверхнизких температурах

А. С. Рыбалко, М. Б. Стерин

Физико-технический институт низких температур им. Б. И. Веркина НАН Украины, Украина, 310164, г. Харьков, пр. Ленина, 47
E-mail: rybalko@ilt. kharkov. ua

Статья поступила в редакцию 4 сентября 1995 г. , после переработки 20 марта 1996 г.

Исследовано электросопротивление разъемных конических тепловых контактов как функция силы сжатия при комнатных и гелиевых температурах. Установлено, что проводимость контактов при $T = 4{,}2$ K имеет ярко выраженный максимум. Предполагается, что появление максимума связано с образованием микрозакороток скользящего типа, через которые происходит перенос зарядов в баллистическом режиме. Показано, что в этом случае можно получить сопротивление контактов 0,04 Ом/см^2.

Досліджено електроопір роз'ємних конічних теплових контактів як функції сили стиску при кімнатних та гелієвих температурах. Встановлено, що провідність контактів при $T = 4{,}2$ K має яскраво виражений максимум. Припускається, що поява максимума пов'язана з утворюванням мікрозакоротоқ ковзного типу, через які здійснюється перенос зарядів у балістичному режимі. Показано, що в цьому випадку можна одержати опір контактів 0,04 Ом/см^2.

Получение хорошего теплового контакта между двумя телами является важной задачей для физических исследований при низких, а особенно при сверхнизких температурах. При этом становится существенным, а в ряде случаев определяющим, тепловое сопротивление границы раздела соприкасающихся тел (сопротивление Капицы). Обычно в технике сверхнизких температур в качестве разъемных применяются соединения: резьбовые, обжимные, плоские прижимные и, в последнее время, конические тепловые контакты.

В настоящее время исследованы только резьбовые [1]и плоские прижимные контакты [2].

Суоми и др. [1] измерили сопротивление Капицы и электропроводность резьбовых контактов медь — медь в интервале температур 20–200 мК. Оказалось, что лучшим является соединение болт — гнездо, имеющее конический профиль. Даже при сильно оксидированных поверхностях сопротивление на единицу площади контакта, $R = 0{,}1$ мкОм/см^2, что удовлетворяет требованиям экспериментов при $T > 20$ мК. Однако при $T \sim 1$мК эти соединения будут иметь недостаточную теплопроводность.

Лау и Циммерман [2] провели измерение электрического сопротивления плоских прижимных соединений медь — медь, контактирующие поверхности стягивали болтом и гайкой. Как оказалось, электрическое сопротивление таких контактов, а значит, и теплопроводность, в значительной степени зависит от чистоты поверхности и имеет большой разброс (0,19–0,04 мкОм/см ^{2}).

В данной работе проведены систематические исследования теплопроводности конических тепловых контактов в зависимости от силы прижима.

Методика измерения

Исследовались серии по 6 образцов, изготовленные из технической и бескислородной меди (МОБ) (всего было изготовлено 24 образца). Одна из частей контактов представляла собой пластину толщиной 0,6 см, в которой растачивалось конусное отверстие 3° или 6°. Ответная деталь представляла собой цилиндр диаметром 0,7 см и длиной 5 см, конец которого был заточен под соответствующим углом. Соприкасающиеся поверхности деталей полировались до зеркального блеска. После электротравления и промывки образцы отжигались при $T = 850$ °C в течение 6 ч в проточной газовой среде аргона.

Схема измерений зависимости электросопротивления объемного материала и самого контакта от силы сжатия изображена на рис. 1. Направление электрического тока при измерении электрического сопротивления было выбрано совпадающим с

© А. С. Рыбалко, М. Б. Стерин, 1996

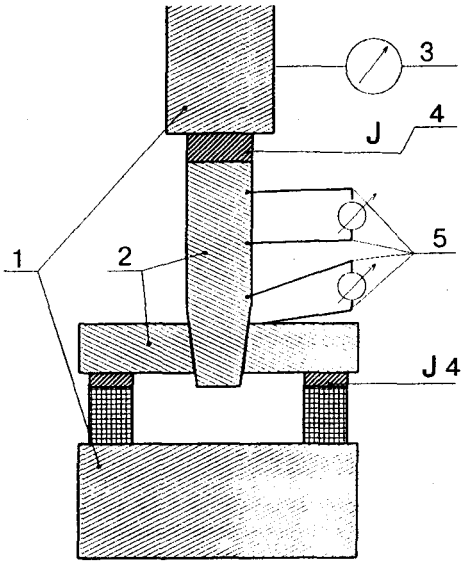

Рис. 1. Схема запрессовки разъемных конических контактов: *1* — пресс; *2* — образец; *3* — манометр; *4* — токовые провода; *5* — потенциальные провода.

направлением предполагаемого теплового потока, и поэтому выполнялось условие для определения теплопроводности контактов по закону Видемана—Франца. Силу сжатия, можно определить по показаниям манометра, зная площадь поверхности образца. Электросопротивление определялось по величине разности потенциалов, измеряемых микровольтметром.

Опыты проводили в следующей последовательности. Образец нагружался до определенного значения силы сжатия и одновременно под нагрузкой измеряли сопротивления конического контакта и самого образца. Поскольку угол конуса мал, после снятия нагрузки детали не распадались, и электросопротивление было стабильно во времени. После этого контактное соединение закреплялось на конце трубы-вставки, с помощью которой можно было погружать детали в транспортный дьюар с жидким гелием на несколько минут. Далее производилось измерение электросопротивления как при гелиевой температуре ($R_{4,2}$), так и после отепления, при комнатной температуре (R_{300}). И только затем образец нагружался до следующего значения силы сжатия, и цикл измерений повторялся.

Таким образом, было исследовано 12 образцов (по 6, изготовленных из МОБ и технической меди с конусностью 6° и 3°) до значений усилий, равных пределу текучести.

Электропроводность контакта

Типичная зависимость сопротивления от силы сжатия представлена на рис. 2,*а*. Как видно из рисунка, с увеличением давления величина R_{300}^{-1} возрастает, что свидетельствует об улучшении контакта. Затем наблюдается участок с не зависящим от давления сопротивлением. На этом участке сопротивление составляет $3 \cdot 10^{-6}$ Ом и по порядку величины совпадает с объемным для образца площадью 1 см ^{2} и длиной 1 см. При дальнейшем увеличении давления сопротивление начинает медленно увеличиваться. Это наблюдается при $P =$ = 2,4 кбар (~ 300 произв. ед.), т.е. вблизи предела текучести для объемной меди.

Электропроводность объемной меди, из которой были изготовлены образцы, при 4,2 К в 30 (для

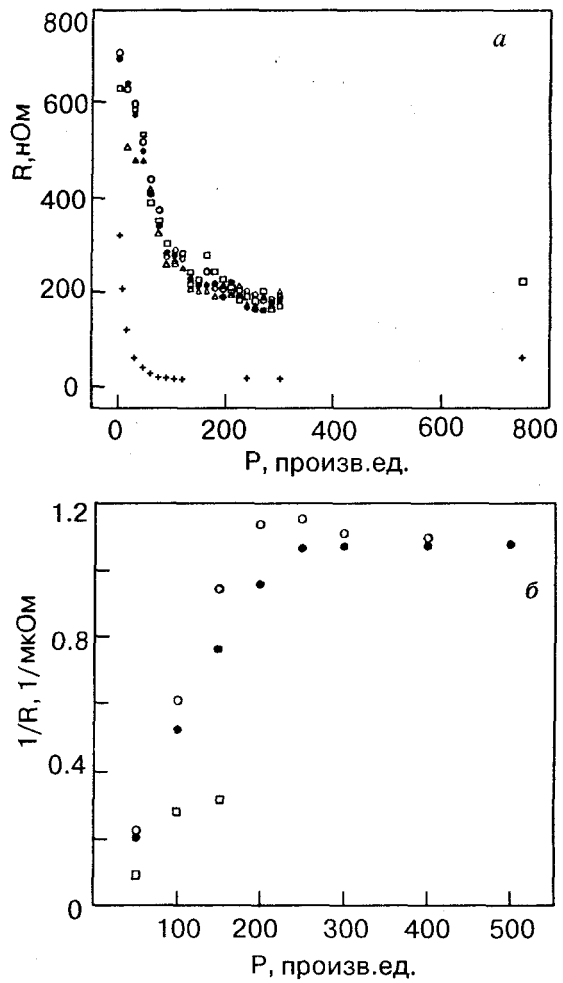

Рис. 2. Зависимость сопротивления (*а*) и проводимости (*б*) разъемных конических тепловых контактов от силы сжатия. *а* — $T =$ 300 К: ● — 1-я запрессовка, ○ — 2-я запрессовка, □ — 100-я запрессовка МОБ образца; $T =$ 4,2 К:+ — 1-я запрессовка. *б* — $T =$ 4,2 К: ○ — 1-я запрессовка, ● — 2-я запрессовка МОБ образца; □ — 1-я запрессовка образца из технической меди.

технической) и в 100 (для бескислородной) раз выше, чем при 300 К.

Зависимость электропроводности контактов при 4,2 К имеет более крутой наклон на начальном участке силы сжатия (рис. 2,*б*), затем достигает максимума для МОБ при определенном значении силы сжатия, далее несколько снижается и выходит на плато. Для образцов, изготовленных из обычной технической меди, максимум не наблюдался.

Следует отметить несколько наблюдаемых особенностей и закономерностей:

1) После запрессовки трехградусного конуса с силой равной 5% предела текучести, сопротивление оставалось стабильным и не изменялось с течением времени. Периодически в течение года делались контрольные измерения сопротивления. Сопротивление также не изменялось после многократных циклов охлаждения до азотных температур (более 100 циклов охлаждения). Аналогичные данные для 6° образцов были менее стабильны.

2) Многократная разборка конструкции с последующей запрессовкой до $P \le P_{max}$ (P_{max} — давление, при котором $RRR = R_{300} / R_{4,2}$ имеет максимальное значение) приводила к 30% разбросу по сопротивлению, но значение RRR оставалось стабильным.

3) Если же $P > P_{max}$, то поверхностное значение RRR_s снижалось при повторной запрессовке и оставалось низким, а в некоторых случаях даже исчезал максимум на зависимости $RRR_s(P)$.

Как видно из рис. 3, зависимость $RRR_s(P)$ свидетельствует о сильной чувствительности сопротивления к силе прижима. Существует оптимальное значение давления запрессовки, которое обеспечивает оптимальное значение RRR_s. На начальном участке проводимость пропорциональна силе сжатия, как это уже наблюдалось в работе [3] для плоского механического контакта. На этом участке результаты воспроизводятся, что говорит в пользу того, что эксперимент проводился в пределах микроскопической деформации. Полученные результаты не удается объяснить в рамках существующих представлений.

Влияние микроконтактов и деформации на электропроводность контакта

Основное загрязнение поверхности контакта обусловлено присутствием окиси металла. Когда два металлических тела приводятся в соприкосновение друг с другом, из-за шероховатости их поверхностей электрический контакт сначала осуществляется в местах выступов, где происходит прокол окисной пленки, образуя микроконтакты металл — металл.

Теплопроводность, электросопротивление и другие свойства микроконтактов металл — металл для Ag, Cu и Au экспериментально изучались в работах [4–6]. Было показано, что закон Видемана—Франца выполняется и большую роль играют деформации материала. Чем выше деформации, тем меньше теплопроводность и электропроводность. Оказалось, что прижимные контакты скользящего типа [6] существенно уменьшают деформацию материала в области их соприкосновения, что значительно снижает рассеяние на дефектах структуры металла.

Исследования конических поверхностей под микроскопом показали, что области шероховатости чередуются и их длина в среднем равна 10 мкм, а высота — 1 мкм. Поскольку поверхность шероховата и окислена, естественно предположить, что в первый момент образуется много микропроколов меди. В работе Шкляревского и др. [4] было показано, что типичное сопротивление микроконтакта медь — медь в момент прокола составляет 1 Ом. Измеренное нами сопротивление контакта в области RRR_{smax} составляет 10^{-6} Ом, что говорит о том, что в данном случае образуется 10^6 микропроколов. Эту же цифру дают и оценки удельной плотности шероховатостей, измеренных под микроскопом.

Теоретически сопротивление и теплопроводность микроконтактов металл–окисел–металл исследовались в работе [7], а в полупроводниках — в

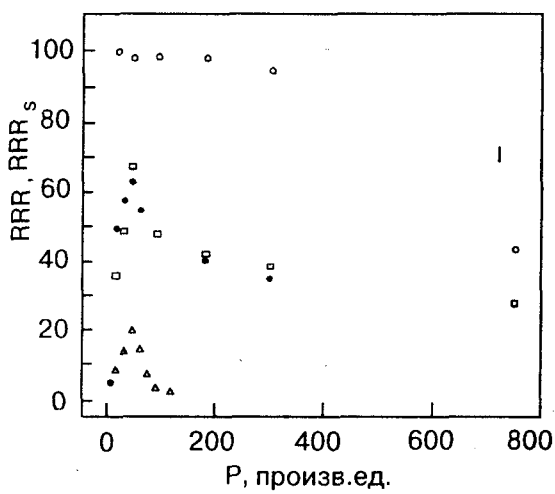

Рис. 3. Зависимость отношения сопротивлений $(R_{300}/R_{4,2}) = RRR$ от силы сжатия: ○ — объемное RRR для образца из бескислородной меди; □ — поверхностное RRR_s для образца из бескислородной меди; △, ● — поверхностное RRR_s для контакта образца из двух сортов технической меди.

работах [8–13]. В этих работах было показано, что в баллистическом режиме транспорта электронов через контакт можно получить более высокую плотность теплового потока. Для микроконтакта градиент температуры обусловлен не рассеянием электронов на границе, а их отражением от поверхности окисной пленки в области сужения. Условие баллистического режима имеет вид

$$\lambda < d < l_e , \qquad (1)$$

где λ — длина волны де-Бройля электрона; d — диаметр микроконтакта; l_e — длина свободного пробега электронов. Это неравенство выполняется для отожженных, достаточно чистых и недеформированных образцов МОБ. В момент запрессовки под действием деформации уменьшается l_e и растет d, и правая часть неравенства может быть нарушена, начиная с определенного значения силы сжатия. Переход на новый режим может повлиять на проводимость. Таким образом, полученные данные свидетельствуют в пользу существования большого количества микрозакороток на начальном участке $RRR_s(P)$. Высказанное выше предположение требует дальнейшей экспериментальной проверки.

О качестве теплопередачи через границу соприкосновения различных металлических образцов (также как и через весь объем) можно судить по отношению электросопротивления при комнатной температуре к сопротивлению при 4,2 К [14]. Зависимость RRR от силы сжатия представлена на рис. 3. Как видно из рисунка, значение RRR_s с увеличением нагрузки сначала возрастает, достигая максимума, а затем уменьшается. Для различных образцов максимальное значение RRR_s = 60–20 для МОБ и 10–3 для технической меди. В то же время объемное RRR при малых нагрузках остается в пределах 100 и уменьшается с увеличением нагрузки. Эти результаты хорошо согласуются с литературными данными [15] по зависимости объемного сопротивления от деформации.

Теплопроводность конических контактов

Оценим величину теплопроводности конического контакта, используя закон Видемана—Франца. В чистых металлах при низких температурах почти весь тепловой поток переносится электронами, и поэтому выполняется соотношение [13]

$$K / \sigma = LT. \qquad (2)$$

Здесь K — коэффициент теплопроводности; L = $= 2{,}45 \cdot 10^{-8}$ Вт·Ом^2/К; — постоянная Лоренца; σ — удельная электропроводность. Обычно это универсальное соотношение используется для вычисления удельной теплопроводности металлов при низких температурах, поскольку входящее в него значение электропроводности довольно легко измеряется экспериментально. Применение закона Видемана—Франца к области контакта в данном случае оправдано, так как длина свободного пробега электронов (0,1–0,001 мм) много больше линейных размеров площади соприкосновения. Для образцов в области максимума RRR_s характерные значения $R_{4,2K} = 1\text{–}4 \cdot 10^{-8}$ Ом. Тогда $K = 2{,}5$ Вт/К при 4,2 К и $2{,}5 \cdot 10^{-4}$ Вт/К при 400 мкК. При типичном тепловом потоке $Q =$ $= 10^{-8}$ Вт значение $\Delta T = Q / K \equiv 10^{-8}/2{,}5 \cdot 10^{-4} =$ $= 4 \cdot 10^{-5}$ К, т.е. 40 мкК. Увеличение или уменьшение силы сжатия (запрессовки) приводит к увеличению ΔT.

Как видно, существует оптимальное значение силы сжатия конических тепловых контактов. Для достижения оптимальных значений нами была сконструирована переносная гидравлическая приставка к прессу, позволяющая непосредственно на ядерной ступени рефрижератора размагничивания запрессовывать различные холодопроводы и ячейки с коническими контактами. Она представляет собой цилиндр с поршнем, соединенный с разборной рамкой-упором. Соединяемые детали помещаются между поршнем и рамкой. По капилляру на поршень подается масло для создания необходимого давления. Контролирующими параметрами являются давление и электросопротивление.

Заключение

В заключение отметим, что в работе исследована зависимость электропроводности разъемных конических тепловых контактов от силы сжатия. Установлено, что проводимость контактов при 4,2 К имеет максимум. Показано, что в этом случае можно получить сопротивление контактов меньше 0,04 Ом /см^2.

Как видно из вышеизложенного, существует оптимальное значение давления запрессовки, которое обеспечивает максимальное отношение RRR_s. Превышение этого значения давления приводит к снижению RRR_s и появлению необратимых процессов.

Предполагается, что появление максимума связано с образованием большого числа стабильных во времени микрозакороток скользящего типа, через которые происходит перенос зарядов в баллистическом режиме. Реализованный на практике

случай одновременного образования большого количества микрозакороток на конических контактах требует дальнейшего изучения.

Выражаем благодарность Э. Я. Рудавскому, А. Г. Шкорбатову, О. И. Шкляревскому, В. В. Пустовалову за обсуждение и полезные советы, а также Б. С. Фельдману за помощь в приготовлении образцов.

Работа частично поддержана Нидерландским фондом фундаментальных исследований материи (проект NWO), фондом Сороса (проект U2N2000) и программой INTAS (поект 94-3416).

1. M. Suomi, A. C. Anderson, and B. Holmstrom, *Physica* **38**, 67 (1968).
2. К. М. Лау, М. Циммерман, *ПНИ* №2, 122 (1979).
3. R. W. Hill and G. R. Pickett, *Ann. Acad. Sci. Fenn. Ser.* **A6**, No 210, 40 (1966).
4. О. И. Шкляревский, А. П. Янсен, П. Вебер, *ФТН* **12**, 947 (1986).
5. О. И. Шкляревский, Дисс. ... д-ра физ. мат. наук, ФТИНТ НАНУ, Харьков (1991).
6. П. И. Чубов, А. И. Акименко, И. К. Янсон, А. С. 834803. Опублик. в Б. И. №20 (1981).
7. Э. И. Богачек, И. О. Кулик, А. Г. Шкорбатов, *ФНТ*, **11**, 1188 (1985).
8. А. М. Загоскин, И. О. Кулик, *ФНТ* **16**, 91 (1990).
9. E. G. Haanapel and D. van der Marel, *Phys. Rev.* **B39**, 5484 (1989).
10. B. J. van Wees, N. van Honten, C. W. J. Beenaker, J. G. Williamson, L. P. Kouwanhoven, D. van der Marel, and C. T. Foxon, *Phys. Rev. Lett.* **60**, 848 (1988).
11. D. A. Wharam, T. J. Thornton, R. Newbury, M. Pepper, H. Ahmed, J. E. F. Frost, D. G. Hasko, D. C. Peacock, D. A. Pitchic, and G. A. C. Jones, *J. Phys.* C21, L 209 (1988), ibid. 22, L887 (1988).
12. Л. И. Глазман, Л. Б. Лесовик, Д. Е. Хмельницкий, Р. И. Шехтер, *Письма в ЖЭТФ* **48**, 276 (1988).
13. И. Б. Левинсон, *Письма в ЖЭТФ* **48**, 273 (1988).
14. F. Pobell, *Matter and Methods at Low Temperatures*, Springer-Verlag (1992), p. 57.
15. H. Buchna, Proceding of the Second Int. Conf. of Magnet Tekhnology, Oxford, The Ruherford Lab. (1967), p. 305.

Electrical and thermal conductivity of the conical thermal contacts used at ultra low temperature

A. S. Rybalko and M. B. Sterin

Electrical and thermal resistance of the split conical thermal contacts has been investigated as a function of compression force at room and helium temperatures. It is found that at $T = 4.2$ K the conductivity of the contacts shows a sharp maximum. The appearance of the maximum is supposed to be connected with a formation of a variety of micropoints of slipping type through which transport of charges takes place in ballistic mode. It is shown that in this case the resistance of the contacts may be as high as 0.04 Ohm/см^2.