

Новый метод получения точечных контактов

В.В. Фисун¹, А.В. Хоткевич¹, С.В. Морлок², Б.Л. Конопацкий¹,
Ю.Л. Александров², Г.В. Камарчук¹

¹*Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины
пр. Ленина, 47, г. Харьков, 61103, Украина
E-mail: khotkevich@ilt.kharkov.ua*

²*Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»
ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, 61002, Украина*

Статья поступила в редакцию 19 сентября 2007 г.

Предложен и исследован новый способ получения точечных контактов малого размера путем скручивания (свивания) электродов из металлических проволок. При низких температурах созданы чистые стабильные контакты с воспроизводимыми электрическими характеристиками. Наблюдались микроконтактные спектры электрон-фононного взаимодействия (ЭФВ) в меди с высокой интенсивностью и спектры ЭФВ в гетероконтактах медь/золото. Для молибдена получены более детальные, чем известные ранее, микроконтактные спектры, которые содержат тонкую структуру, и определены интегральные параметры ЭФВ. Изучены характеристики сверхпроводящих точечных контактов из твердой ртути. При комнатной температуре контакты из тантала использованы как газовые сенсоры для анализа газа, выдыхаемого человеком.

Запропоновано й досліджено новий спосіб отримання точкових контактів малого розміру шляхом скручування (звивання) електродів з металевих дрітків. При низьких температурах створено чисті стабільні контакти з відтворюваними електричними характеристиками. Спостерігалися мікроконтактні спектри електрон-фононої взаємодії (ЕФВ) у міді з високою інтенсивністю й спектри ЕФВ у гетероконтактах мідь/золото. Для молибдену отримано більш детальні, ніж відомі раніше, мікроконтактні спектри, які містять тонку структуру, і визначено інтегральні параметри ЕФВ. Вивчено характеристики надпровідних точкових контактів із твердої ртуті. При кімнатній температурі контакти з танталу використано як газові сенсори для аналізу газу, що видихається людиною.

PACS: 72.15.–v Электронная проводимость в металлах и сплавах.

Ключевые слова: металлы, электрон-фононное взаимодействие, микроконтактная спектроскопия, газовый анализ.

В фундаментальных научных исследованиях точечные контакты используют для изучения энергетического спектра металлических систем [1]. При этом оказывается, что работы, в которых предлагаются новые способы получения точечных контактов, являются, как правило, ключевыми для целой серии последующих публикаций, посвященных нелинейным электрическим явлениям в данных объектах. Целью настоящей работы было исследование потенциала предложенного нами нового способа получения контактов путем скручивания (свивания) электродов из металлических проволок [2] для решения задач микроконтактной спектроскопии металлов при низких

температурах [1,3], а также анализа газовых сред при комнатной температуре [4] (так называемого микроконтактного газочувствительного эффекта).

В использованном нами способе получения контактов два изолированных друг от друга параллельно расположенных и закрепленных на концах металлических электрода в виде проволок или полосок фольги скручиваются при последовательном взаимном вращении и сближении противоположных мест закрепления электродов до появления электрического контакта. При этом, как очевидно, в одной серии измерений могут быть получены точечные контакты каждый раз между все новыми участками боковых поверхностей

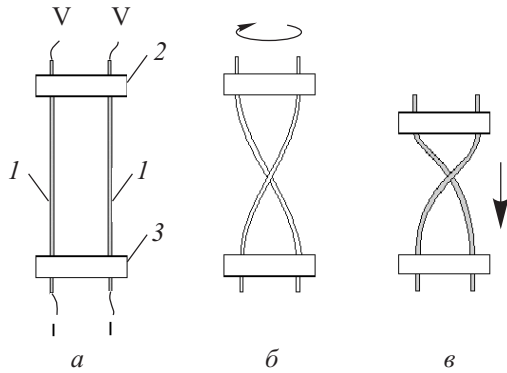


Рис. 1. Схема получения точечных контактов при скручивании/свивании электродов. 1 — электроды в виде проволок или полосок фольги; 2,3 — подвижная и неподвижная деки для закрепления электродов. Показаны токовые и потенциальные проводники. Стрелки — один из возможных вариантов последовательного перемещения элементов конструкции. В положении (а) и (в) контакт между электродами отсутствует (электроды выделены темным цветом). В положении (б) электроды соприкасаются.

каждого из электродов. Стадии одного из возможных вариантов получения контакта описываемым способом иллюстрирует рис. 1. После выполнения взаимных перемещений электродов, показанных на рисунке, при дальнейшем скручивании электродов между ними образуется новый точечный контакт.

Предложенный способ создания контактов испытан для различных сечений проволочных электродов (от 0,02 до 0,8 мм) и толщин электродов из фольг (0,05, 0,1 и 0,2 мм) шириной 0,5–1 мм при получении точечных контактов из меди, молибдена, тантала, гетероконтактов между медью и золотом, а также сверхпроводящих точечных контактов из твердой ртути. Длина электродов составляла 20–30 мм. Точечные

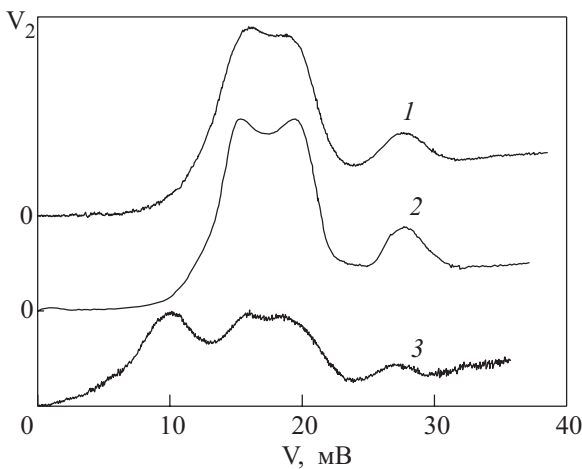


Рис. 2. Микроконтактные спектры ЭФВ в меди (1,2) и в гетероконтакте Cu/Au (3): 1,3 — наши данные; 2 — данные [3]. $T = 1,5$ К. Для контакта 3 $R_0 = 3,5$ Ом.

контакты были получены также при использовании электродов в виде тросиков, которые состояли из двух/нескольких проволок. Поверхность электродов предварительно полировали [5]. Контакты из ртути образовывались в жидком гелии между ртутными покрытиями, наносившимися на электроды из латуни путем их смачивания в объеме ртути [6]. Для манипуляций электродами использовали механическое устройство, в основу которого положена конструкция, приведенная в [7].

При температуре 1,5 К измеряли величину сопротивления контакта R_0 , его вольт-амперную характеристику (ВАХ), а также первые и вторые производные ВАХ. Для сверхпроводящих контактов анализировали величины критического тока Джозефсона I_c и избыточного тока I_{exc} . Последние, как и абсолютная интенсивность (амплитуда) микроконтактных спектров в нормальном состоянии (зависимостей вторых производных ВАХ от напряжения на контакте) оказываются наибольшими для чистых контактов [3] и являются критерием чистоты точечных контактов. Обработку микроконтактных спектров в нормальном состоянии осуществляли как в [3]. При этом восстанавливали микроконтактную функцию электрон-фононного взаимодействия (ЭФВ) $g_{pc}(\omega)$, подсчитывали константу ЭФВ λ , а также среднюю и среднеквадратичную частоты фононов $\langle\omega\rangle$ и $\langle\omega^2\rangle$.

Для контактов из меди, созданных по новому способу, получены микроконтактные спектры ЭФВ (рис. 2) с высокой интенсивностью, очень близкие к справочным данным [3]. Оказалось, что электроды из технического провода марки ПЭВ могут быть использованы для создания контактов высокого качества. Лаковую изоляцию проводов удаляли химическим путем. Величина сопротивления контактов из меди лежала в интервале от единиц Ом до 50 Ом. Получены также спектры гетероконтактов Cu/Au, которые содержат линии (максимумы), отвечающие как меди, так и золоту (см. кривую 3 на рис. 2). Результат расчета интегральных характеристик спектров ЭФВ в меди (величин $\langle\omega\rangle$ и λ) приведен в табл. 1. Расчет выполнен с одним и тем же коэффициентом пропорциональности между экспериментально измеряемыми величинами и функцией $g_{pc}(\omega)$, графики которой приведены на рис. 3. Здесь и ниже приводится величина модулирую-

Таблица 1. Характеристики точечных контактов из меди, представленных на рис. 2 и 3.

Параметр	R_0 , Ом	$V_{1,0}$, мВ	$\langle\omega\rangle$, мэВ	λ
Наши данные	7,0	550	16,04	0,20
Данные [3]	2,5	440	16,18	0,24

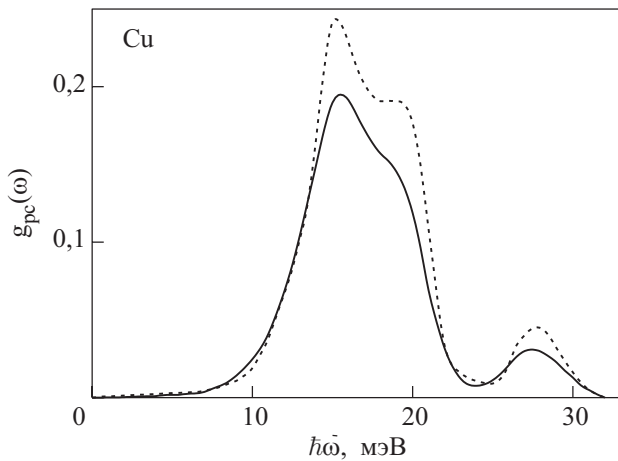


Рис. 3. Микроконтактные функции ЭФВ, восстановленные из микроконтактных спектров 1,2 на рис. 2: сплошная линия — наши данные; штриховая линия — данные [3].

шего напряжения $V_{1,0}$, которая наряду со значением абсолютной температуры характеризует достигнутую при измерении микроконтактных спектров разрешающую способность.

В серии измерений резистивных свойств контактов между отоженными проволоками из молибдена получены микроконтактные спектры, которые оказались более детальными, чем известные ранее [3]. В качестве примера может служить зависимость $V_2(V)$, приведенная на рис. 4. Спектры содержат два основных максимума в области 22 и 32 мВ, связанных с рассеянием электронов на поперечных (Т) и продольных (L) акустических фононах. С помощью созданных по новому методу контактов оказалось возможным детектировать не наблюдавшиеся ранее особенности тонкой структуры Т-максимума в районе 15, 24 и 28 мВ.

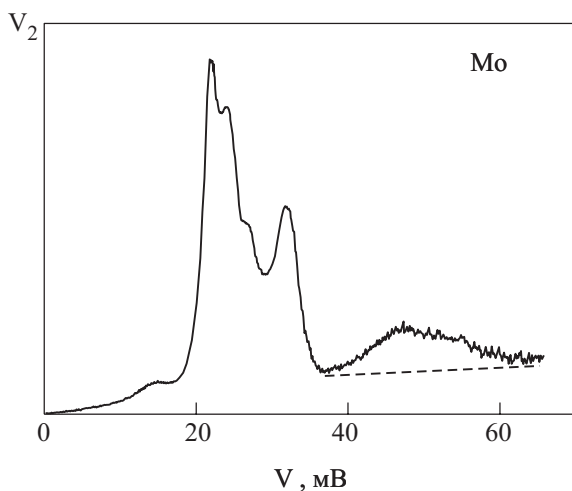


Рис. 4. Микроконтактный спектр ЭФВ. Штриховой линией выделена двухфононная часть спектра. $R_0 = 2,5$ Ом, $V_{1,0} = 440$ мкВ, $T = 1,5$ К.

Эти нелинейности связаны с аномалиями закона дисперсии фононов во внутренних областях зоны Бриллюэна и проявляются также для наиболее достоверной плотности фононных состояний в молибдене [8]. Из экспериментальных данных прямым расчетом определены средняя и среднеквадратичная частоты фононов $\langle \omega \rangle = (22,9 \pm 0,02)$ мэВ и $\langle \omega^2 \rangle^{1/2} = (23,1 \pm 0,02)$ мэВ (приведено среднее арифметическое по 4 образцам и ошибка среднего). Величина $\langle \omega^2 \rangle^{1/2}$, а также полученное оценочное значение 0,43 для константы ЭФВ очень хорошо согласуются с величинами 23,1 мэВ и 0,44, известными из литературы [9], но определенными косвенным путем (по данным электронной теплоемкости).

Как следует из полученных экспериментальных данных, для контактов из ртути при температуре 1,5 К (критическая температура сверхпроводящего перехода в ртути $T_c = 4,19$ К) величина произведения $I_c e R_0 / \Delta$ (2Δ — энергетическая щель, для ртути $\Delta = 0,83$ мэВ), а также $I_{exc} e R_0 / \Delta$ (в области постоянства I_{exc} при $eV > 2\Delta$) составляет 3,0 и 2,5. Эти величины оказываются близкими к теоретически ожидаемым при $T = 0$ значениям $\pi = 3,14$ и $8/3 = 2,67$ в чистом пределе (см. [3, табл. 3]), т.е. для чистых контактов с баллистическим характером движения носителей заряда.

Эксперименты, проведенные при низких температурах, позволяют хорошо идентифицировать получаемые образцы и обосновывают возможность применения предложенного метода для исследований в более широком интервале температур. Точечные контакты между электрополированными проволоками из тантала, созданные по описанному способу при комнатной температуре, были использованы как сенсоры для анализа газа, выдыхаемого человеком. Такие образцы продемонстрировали высокую чувствительность к

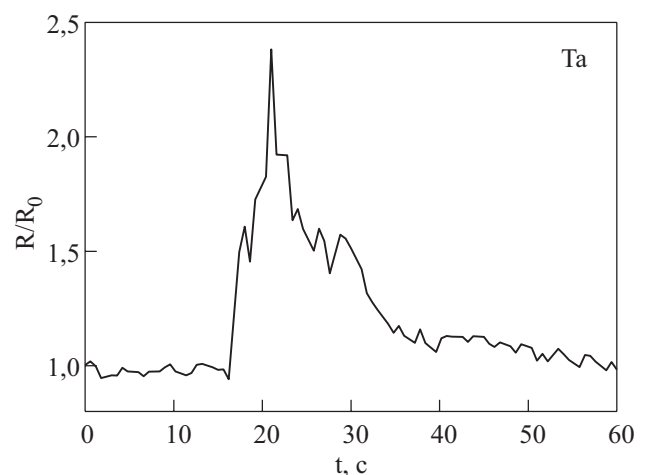


Рис. 5. Отклик точечного контакта из тантала на газ, выдыхаемый человеком при комнатной температуре. $R_0 = 250$ Ом.

данной биологической среде. Их поведение соответствует микроконтактному газочувствительному эффекту, обнаруженному недавно [4] на медных контактах, которые создавали по традиционным методикам. В качестве примера на рис. 5 показан отклик контакта (зависимость относительного изменения сопротивления контакта от времени) на действие газа, выдыхаемого человеком. Такие зависимости хорошо воспроизводились для каждого отдельного добровольца и различались для различных испытуемых.

Таким образом, показано, что предложенный новый метод получения точечных контактов не уступает известным способам [1,3] создания совершенных чистых металлических контактов при низких температурах и может быть использован также при комнатной температуре. Достоинствами метода является техническая простота, обнаруженная высокая механическая стабильность контактов, возможность использования проводников, доступных в виде проволок или фольги, а также применимость для изучения проводящих покрытий.

Авторы благодарят И.К. Янсона и Ю.А. Колесниченко за интерес к работе.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Украины и Украинского научно-технологического центра, проект № 3268.

1. Yu.G. Naidyuk and I.K. Yanson, *Point-contact Spectroscopy*, Springer, New York (2004).
2. В.В. Фисун, А.В. Хоткевич, Ю.Л. Александров, Г.В. Камарчук, Заявка на видання патенту України на винахід «Спосіб одержання притискових мікроконтактів між металевими електродами» № u 2007 07761 від 10.07.2007.
3. A.V. Khotkevich and I.K. Yanson, *Atlas of Point Contact Spectra of Electron-Phonon Interactions in Metals*, Kluwer Academic Publishers, Boston-Dordrecht-London (1995).
4. G.V. Kamarchuk, A.P. Pospelov, A.V. Yeremenko, E. Faulques, and I.K. Yanson, *Europhys. Lett.* **76**, 575 (2006).
5. Л.Я. Попилов, Л.П. Зайцева, *Электрополирование и электротравление металлических штифтов*, Металлургиздат, Москва (1963).

6. А.В. Хоткевич, В.В. Хоткевич, С.В. Морлок, Б.Л. Конопатский, *ФНТ* **33**, 935 (2007).
7. Н.Л. Бобров, Л.Ф. Рыбальченко, А.В. Хоткевич, П.Н. Чубов, И.К. Янсон. А.с. 1631626 СССР. М. Кл.5. Н 01. L 21/28. Опубл. 28.02.91. Бюл № 8.
8. В.М. Powell, P. Martel and A.D.B. Woods, *Can. J. Phys.* **55**, 1601 (1977).
9. Е.Л. Вольф, *Принципы электронной туннельной спектроскопии*, Наукова думка. Киев (1990).

A new method of producing point-contacts

V.V. Fisun, A.V. Khotkevich, S.V. Morlok,
B.L. Konopatskyi, Yu.L. Alexandrov, and
G.V. Kamarchuk

A new method of producing small-size of point-contacts by way of twisting (twinning) metallic wire-electrodes was proposed and examined. Pure stable ballistic contacts with reproducible electrical characteristics were fabricated at low temperatures. High-intensity point-contact spectra of electron-phonon interaction (EPI) in copper and EPI-spectra of Cu/Au hetero-contacts were observed. For the case of molybdenum the most detailed point-contact spectra with previously unknown fine structures were obtained and the integral parameters of EPI were determined. The characteristics of the crystalline mercury-based superconducting point-contacts were studied. At room temperature the tantalum-based contacts were employed as gas sensors to analyse the human breathed-out air.

PACS: **72.15.-v** Electronic conduction in metals and alloys

Keywords: metals, electron-phonon interaction, point-contact spectroscopy, gas analysis.