

Микроконтактная функция электрон-фононного взаимодействия в цирконии

Н.Л. Бобров, Л.Ф. Рыбальченко, В.В. Фисун, А.В. Хоткевич

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

Статья поступила в редакцию 21 апреля 2016 г., опубликована онлайн 25 июля 2016 г.

Проведено экспериментальное исследование спектров электрон-фононного взаимодействия (ЭФВ) Zr с помощью микроконтактной (МК) спектроскопии Янсона. Определены спектральная функция ЭФВ и константа ЭФВ. Исследовались как гомоконтакты Zr–Zr, так и гетероконтакты Zr–Cu, Zr–Ag и Zr–Au. Обнаружено отсутствие вкладов меди, серебра и золота в МК спектры гетероконтактов. Установлено положение пяти фононных особенностей функции ЭФВ при энергиях 5–6, 9–11, 13–15, 18–20 и 27–29 мэВ. Вариация МК спектров ЭФВ связывается с анизотропией в Zr.

Проведено експериментальне дослідження спектрів електрон-фононної взаємодії (ЕФВ) Zr за допомогою мікроконтактною (МК) спектроскопії Янсона. Визначено спектральну функцію ЕФВ та константу ЕФВ. Досліджувалися як гомоконтакти Zr–Zr, так і гетероконтакти Zr–Cu, Zr–Ag і Zr–Au. Виявлено відсутність вкладів міді, срібла і золота в МК спектри гетероконтактів. Встановлено положення п'яти фононних особливостей функції ЕФВ при енергіях 5–6, 9–11, 13–15, 18–20 і 27–29 меВ. Варіація МК спектрів ЕФВ пов'язується з анізотропією в Zr.

PACS: **71.38.–k** Поляроны и электрон-фононные взаимодействия;
73.40.Jn Контакты металл–металл;
74.25.Kc Фононы.

Ключевые слова: микроконтактная спектроскопия Янсона, электрон-фононное взаимодействие, гетероконтакты.

Введение

Спектральные функции (СФ) электрон-фононного взаимодействия (ЭФВ) (термодинамическая, или функция Элиашберга, транспортная, микроконтактная и др.) являются наиболее детальными характеристиками взаимодействия электронов с фононами, определяют перенормировку электронного энергетического спектра металлов и многие важнейшие наблюдаемые свойства. СФ ЭФВ родственны плотности фононных состояний (ПФС), вследствие чего их изучение важно также с точки зрения динамики кристаллических решеток.

К настоящему времени экспериментальная информация о разного рода СФ ЭФВ в переходных металлах со сложной кристаллической решеткой ограничена данными микроконтактной спектроскопии [1,2] для Co, Tc, Re, Ru, Os. Попытки восстановить микрокон-

тактные функции ЭФВ для ГПУ металлов IV–V группы Ti, Zr, Hf сдерживались неблагоприятными физико-химическими свойствами этих металлических элементов (быстрым образованием прочного оксидного слоя на поверхности каждого из двух электродов, предназначенных для создания прижимных точечных контактов). В наших исследованиях использованы два различных подхода к преодолению указанных методических трудностей. В первом подходе в качестве образцов предложено создавать гетероконтакты Zr–благородный металл (Cu, Ag, Au). Тогда в область точечного контакта между двумя электродами попадает только одна поверхность электрода из Zr. В дополнение к этому применялся метод формовки таких гетероконтактов под воздействием токовых нагрузок [3]. Второй подход [4] состоял в использовании техники изломных контактов (break junctions) [5], когда удлинненный образец с утонь-

шением (надрезом) в средней части переламывается в жидком гелии и контакт затем образуется между чистыми неокисленными поверхностями.

Цель настоящей работы — получение микроконтактной функции ЭФВ и ее численных характеристик в α -Zr на основе экспериментальных данных. К сожалению, ценность приведенных в заметке [4] результатов теоретического расчета СФ ЭФВ для Zr весьма ограничена ввиду того, что расчетные графики представлены в координатах $f(\omega/\omega_{\max})$ (ω_{\max} — максимальная частота фононного спектра).

Методика эксперимента

В качестве материала для электродов использовался поликристалл, полученный переплавкой с помощью электронно-лучевой пушки в высоком вакууме йодидного циркония. Также использовались поликристаллы меди, серебра и золота с отношением сопротивлений $R_{300\text{K}}/R_{4,2\text{K}}$ порядка нескольких сотен. Электроды размером $1,5 \times 1,5 \times 10$ мм вырезались электроискровым методом и химически полировались. После этого промывались в дистиллированной воде, высушивались и монтировались в устройство для создания микроконтактов [6]. Контакты создавались по сдвиговой методике [7] с применением электроформовки, подробно описанной в [3]. Оптимальные сопротивления микроконтактов, при которых спектры демонстрируют максимальную интенсивность и минимальный уровень фона, составляли, как правило, несколько десятков Ом. Спектры ЭФВ, пропорциональные вторым производным вольт-амперных характеристик (ВАХ), измерялись модуляционным методом на звуковой частоте при температуре 4,2 К.

Обработка результатов измерений

Связь нелинейностей ВАХ точечного микроконтакта в нормальном состоянии, обусловленных неупругим рассеянием электронов в контактной области, со спектром ЭФВ определяется основным соотношением теории микроконтактной спектроскопии Янсона, которое можно записать с учетом фонового слагаемого как [2]

$$\frac{d^2 I}{dV^2}(V) = -\frac{4\pi e^3}{\hbar} n(\varepsilon_F) \Omega_{\text{eff}} \langle K \rangle [g_{pc}(\omega) + B(\omega)] \Big|_{\omega = eV/\hbar} \quad (1)$$

Здесь $d^2 I/dV^2(V)$ — зависимость второй производной ВАХ контакта от напряжения, $g_{pc}(\omega)$ — микроконтактная функция ЭФВ, $B(\omega)$ — функция фона, $n(\varepsilon_F)$ — плотность электронных состояний на уровне Ферми для одного направления спина, e — элементарный заряд, Ω_{eff} — эффективный объем генерации фононов в контакте, K — ненормированный микроконтактный формфактор, а угловые скобки означают усреднение по полной поверхности Ферми (ПФ). Наличие функции фона отражает тот факт, что вторая

производная ВАХ при $eV > \hbar\omega_{\max}$ отлична от нуля, тогда как функция ЭФВ должна быть тождественно равна нулю за границей фононного спектра. Величины Ω_{eff} и $\langle K \rangle$ зависят от геометрии и чистоты контакта, а K , кроме этого, зависит от ориентации оси контакта относительно кристаллографических направлений в металле. Соотношение (1) можно переписать через экспериментально измеряемые характеристики в виде, практически пригодном для восстановления функции ЭФВ $g_{pc}(\omega)$ [8]:

$$g_{pc}(\omega) + B(\omega) = C \tilde{V}_2(V) V_{1,0}^{-2} R_0^{1/2} \Big|_{V = \hbar\omega/e} \quad (2)$$

Здесь $\tilde{V}_2(V) \propto d^2 I/dV^2(V)$, $V_{1,0} \sim dV/dI$ и R_0 — модулирующее напряжение $V_1(V)$ и сопротивление микроконтакта R при $V \rightarrow 0$. Размерная константа C в приближении квадратичного изотропного закона дисперсии электронов определяется для модели чистого круглого отверстия как

$$C = -\frac{3}{8} \left(\frac{\hbar}{2\pi} \right)^{1/2} k_F v_F, \quad (3)$$

где k_F и v_F — фермиевский волновой вектор и скорость Ферми. Для Zr величины k_F и v_F подсчитывались по низкотемпературным постоянным решетки [9] $c/a = 5,141\text{\AA}/3,229\text{\AA}$ из соотношения [10] $k_F = (3\pi^2 Z/\Omega)^{1/3}$, где Z — число электронов проводимости на элементарную ячейку, Ω — объем элементарной ячейки (для ГПУ решетки $\Omega = (\sqrt{3}/2) a^2 c$). Используя для Zr значение $Z = 1,2$ [11], получаем $k_F = 0,915 \cdot 10^{-8} \text{ см}^{-1}$, $v_F = 1,06 \cdot 10^8 \text{ см/с}$.

Поскольку в эксперименте регистрировалось напряжение второй гармоники сигнала модулирующего тока $V_2(V) \propto d^2 V(V)/dI^2$, эта зависимость пересчитывалась в $\tilde{V}(V) \propto d^2 I(V)/dV^2$ в соответствии с теоремой о производной от обратной функции. Функция фона в соотношении (1) выбиралась, как в [12]. При оценке эффективного диаметра контакта из величины сопротивления удобно использовать формулу Шарвина для случая сферической ПФ и баллистического режима, записанную в виде

$$d = \frac{4}{ek_F} \left(\frac{\pi\hbar}{R_0} \right)^{1/2}. \quad (4)$$

Экспериментальные результаты

Были исследованы как гомоконтакты Zr–Zr, так и гетероконтакты Zr–Cu, Zr–Ag и Zr–Au. Несмотря на то, что трактовка спектров гомоконтактов заметно проще и не содержит многих допущений, делаемых при обработке спектров гетероконтактов, использование последних для восстановления функции ЭФВ в цирконии оказалось полностью оправданным. Как и для контактов Ta [3], в спектрах гетероконтактов не заметен вклад благородных металлов. Это объясняется не только их

меньшей интенсивностью, но и особенностями сложения парциальных вкладов в результирующий спектр берегов гетероконтактов.

Спектр гетероконтакта не совпадает с полусуммой вкладов спектров от гомоконтактов одинакового диаметра. Это связано с тем, что микроконтактные формфакторы металлов с различающимися импульсами в гетероконтакте не равны друг другу и соответственно не совпадают с формфактором гомоконтакта. В металле с большим p_F относительный фазовый объем неравновесно заполненных состояний меньше из-за отражения части электронных траекторий от границы раздела, что приводит к относительному увеличению времени неупругой релаксации τ_ϵ , а интенсивность МК спектра пропорциональна $d / v_F \tau_\epsilon$.

Другими словами, в гетероконтакте для металла с меньшим фермиевским импульсом результирующий вклад в спектр будет больше, чем от половины спектра соответствующего гомоконтакта такого же диаметра, а для металла с большим импульсом — соответственно меньше.

Отметим также, что МК спектр гетероконтакта симметричен относительно полярности приложенного напряжения и при $T = 0$ может быть представлен в виде суммы МК спектров каждого из контактирующих металлов.

Отношение интенсивностей МК спектров металлов, образующих гетероконтакт, не зависит от длин упругого рассеяния электронов. Загрязнение одного из металлов снижает интенсивность парциального вклада в МК спектр и чистого металла [13].

Оценим ожидаемый вклад золота в спектр гетероконтакта Zr–Au в свободноэлектронном приближении (вследствие близких фермиевских параметров для Ag и Cu результат для этой пары с Zr будет подобным).

Как следует из [13], отношение интенсивностей парциальных вкладов в спектре гетероконтакта равно

$$L = \left(\frac{d^2 I}{dV^2} \right)_1 \bigg/ \left(\frac{d^2 I}{dV^2} \right)_2 = \frac{v_{F2}}{v_{F1}} \left(\frac{p_{F2}}{p_{F1}} \right)^2 \frac{g_{pc}^{(1)}}{g_{pc}^{(2)}}. \quad (5)$$

Поскольку в [13] аналогичное соотношение получено для модельных металлов, имеющих одинаковые по форме и абсолютной интенсивности МК функции ЭФВ, но с различными фермиевскими скоростями и импульсами, в [13] сомножитель $g_{pc}^{(1)} / g_{pc}^{(2)}$ отсутствует.

Полученная нами (см. рис. 3) абсолютная интенсивность МК функции ЭФВ циркония в гомоконтактах в свободноэлектронном приближении $g_{pc}^{Zr} \approx 0,34$; $g_{pc}^{Au} \approx 0,079$ [2]; $v_F^{Zr} = 1,06 \cdot 10^8$ см/с; $v_F^{Au} = 1,4 \cdot 10^8$ см/с; $k_F^{Zr} = 0,915 \cdot 10^{-8}$ см⁻¹; $k_F^{Au} = 1,21 \cdot 10^8$ см⁻¹, тогда вклад золота в спектр гетероконтакта $L_{Au} \approx 0,1$. Отметим, что это оценка сверху. Если для золота накоплена достаточно большая статистика и интенсивность функции ЭФВ определена с высокой достоверностью, то для Zr

это не так. Как следует из рис. 1, спектр, из которого восстановлена функция ЭФВ циркония, отличается высоким уровнем фона, что не характерно для баллистических микроконтактов. Поэтому велика вероятность того, что усовершенствовав технологию и/или используя в качестве электродов качественные монокристаллы, удастся получить более интенсивные спектры. О важной роли технологии можно судить, если сравнить значение функции ЭФВ, полученное в предыдущей работе [4] при использовании техники разломных контактов, с результатами настоящей работы. Несмотря на использование качественного монокристалла Zr для электродов в [4], интенсивность функции ЭФВ там ниже в 9 раз (ср. кривые 1 и 5 на рис. 9).

Основное преимущество гетероконтактов — значительно более высокое качество их спектров. Во-первых, в несколько раз меньший уровень фона (см. рис. 1). Во-вторых, заметно лучшее проявление фононной структуры, особенно в высокочастотной области. Также следует отметить более высокий процент выхода качественных спектров по сравнению со случаем гомоконтактов. Таким образом, для возможно более точного определения графика функции ЭФВ во многих переходных металлах гетероконтакты с благородными металлами представляются предпочтительной альтернативой гомоконтактам.

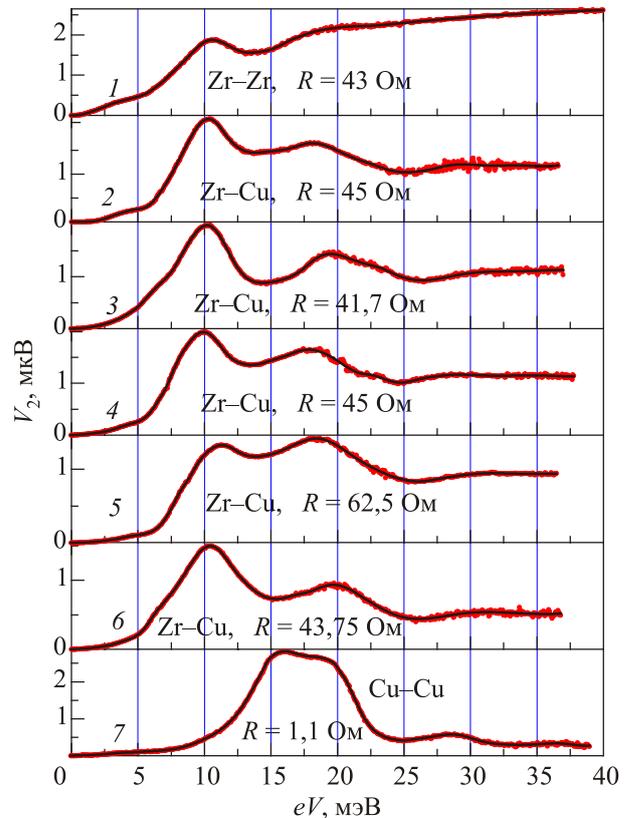


Рис. 1. (Онлайн в цвете) МК спектры ЭФВ $V_2 \sim d^2V / dI^2$, $T = 4,2$ К: $V_1(0) = 0,55$ (1); 0,89 (2); 0,763 (3); 0,878 (4); 1,028 (5); 1,196 (6); 0,655 (7) мВ.

Все полученные спектры можно разделить на три группы. Наиболее многочисленная группа представлена на рис. 1 и 2. Как следует из этих рисунков, на спектрах присутствуют два основных максимума в районах 9–11 и 18–20 мэВ. Кроме того, на многих спектрах присутствует мягкая мода вблизи 4–6 мэВ. На этих же рисунках для сравнения приведены спектры гомоконтактов Cu, Ag и Au. Несмотря на то, что положение некоторых фоновых особенностей на спектрах благородных металлов и спектрах гетероконтактов Zr достаточно близки по энергиям, однако в целом форма спектров гетероконтактов заметно отличается от приведенных спектров благородных металлов. Граница спектров для этой группы заканчивается в окрестности 25 мэВ.

Вторая группа спектров представлена на рис. 3. Как и в предыдущем случае, на спектрах наблюдаются два основных максимума, но уже при энергиях 5–6 и 13–15 мэВ. На спектрах отсутствуют особенности, которые совпадают по энергиям в спектрах Ag и Au, образующих гетероконтакты. Граница спектров для этой группы расположена в окрестности 20 мэВ.

Третья группа представлена на рис. 4. Положение фоновых особенностей и форма спектров здесь варьируется в широких пределах, включая предыдущие случаи. Отличительный признак этой группы — наличие

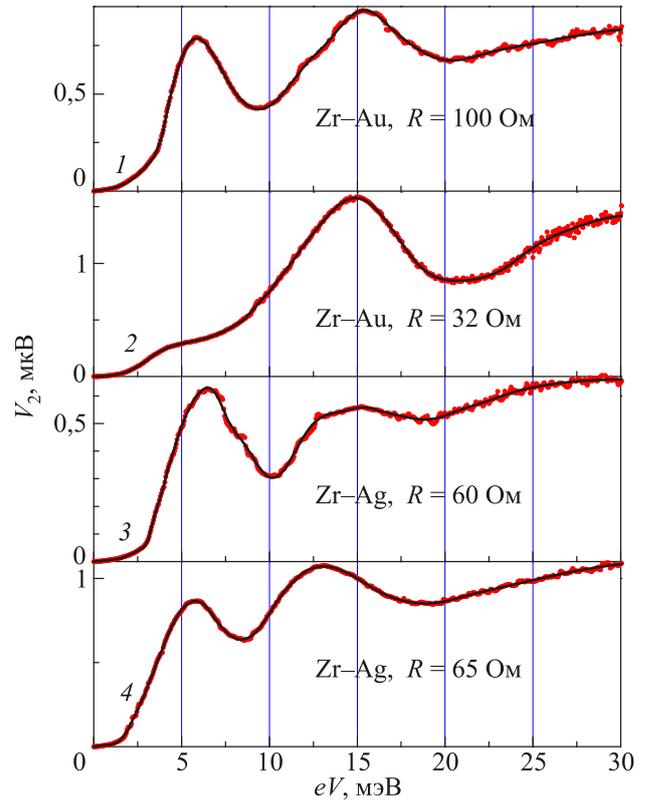


Рис. 3. (Онлайн в цвете) МК спектры ЭФВ $V_2 \sim d^2V / dI^2$, $T = 4,2$ К: $V_1(0) = 1,516$ (1); 1,633 (2); 1,646 (3); 1,648 (4) мВ.

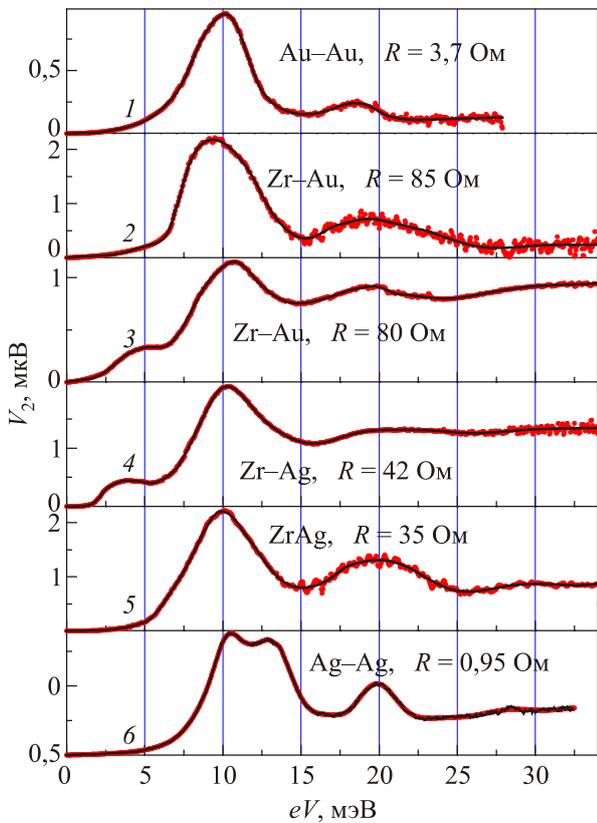


Рис. 2. (Онлайн в цвете) МК спектры ЭФВ $V_2 \sim d^2V / dI^2$, $T = 4,2$ К (кроме кривой 6): $V_1(0) = 0,55$ (1); 1,213 (2); 1,355 (3); 0,778 (4); 0,933 (5) мВ; кривая 6 — $V_1(0) = 0,45$ мВ, $T = 1,6$ К.

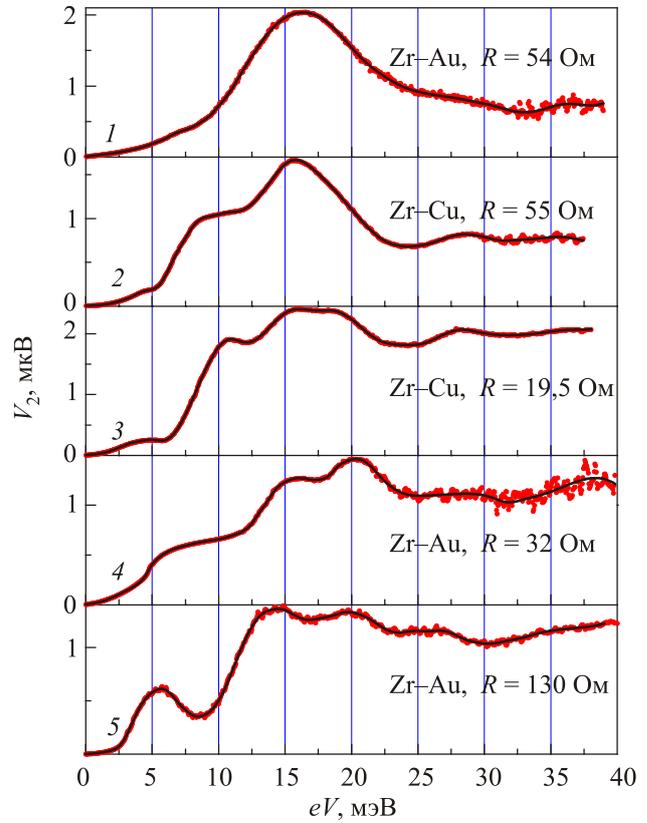


Рис. 4. (Онлайн в цвете) МК спектры ЭФВ $V_2 \sim d^2V / dI^2$, $T = 4,2$ К: $V_1(0) = 1,557$ (1); 1,062 (2); 0,751 (3); 1,06 (4); 1,777 (5) мВ.

высокочастотного максимума при энергиях 27–29 мэВ. Граница фононных спектров расположена в окрестности 31 мэВ.

На рис. 5, 6, 7, 8 приведены функции ЭФВ, восстановленные из графиков на рис. 1, 2, 3, 4 соответственно. Все значения g_{pc} и λ , приведенные в подписях к рис. 5–9, в случае гетероконтактов рассчитывались так же, как и для гомоконтактов Zr–Zr такого же сопротивления.

Для более точного определения g_{pc} и λ Zr в гетероконтакте можно оценить уточняющий коэффициент:

$$K_{\text{corr}} = \frac{\lambda_{pc}^{\text{get}}}{\lambda_{pc}^{\text{gom}}} = \frac{g_{pc}^{\text{get}}}{g_{pc}^{\text{gom}}} = \frac{2\langle K_{Zr} \rangle d_{Zr}}{\langle K_0 \rangle d_{\text{get}}}. \quad (6)$$

Здесь $\langle K_0 \rangle$ и $\langle K_{Zr} \rangle$ — усредненные по поверхности Ферми формфакторы в гомо- и гетероконтакте, d_{Zr} и d_{get} — диаметры гомо- и гетероконтакта соответственно. Цифра 2 в числителе введена для учета того обстоятельства, что объем генерации фононов в Zr в гетероконтакте вдвое меньше, чем в гомоконтакте того же диаметра.

При расчете диаметра гетероконтакта со стороны циркония имеем выражение [3]

$$d_{\text{get}} = d_{Zr} \left[2\langle \alpha_1 D(\alpha_1) \rangle_{V_z > 0} \right]^{-1/2}. \quad (7)$$

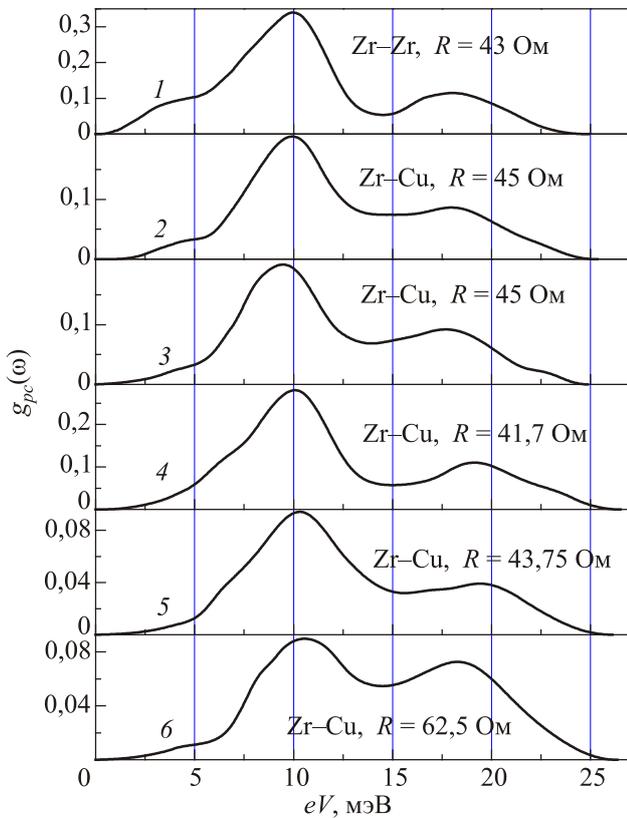


Рис. 5. Микроконтактные функции ЭФВ, восстановленные из спектров на рис. 1: $\lambda = 0,66$ (1); 0,34 (2); 0,36 (3); 0,46 (4); 0,16 (5); 0,18 (6).

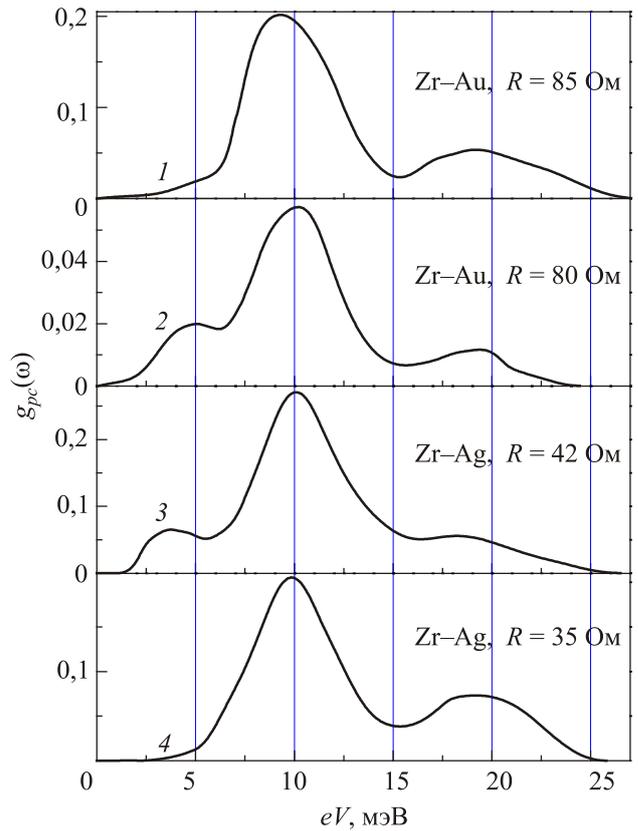


Рис. 6. Микроконтактные функции ЭФВ, восстановленные из спектров на рис. 2: $\lambda = 0,295$ (1); 0,103 (2); 0,45 (3); 0,285 (4).

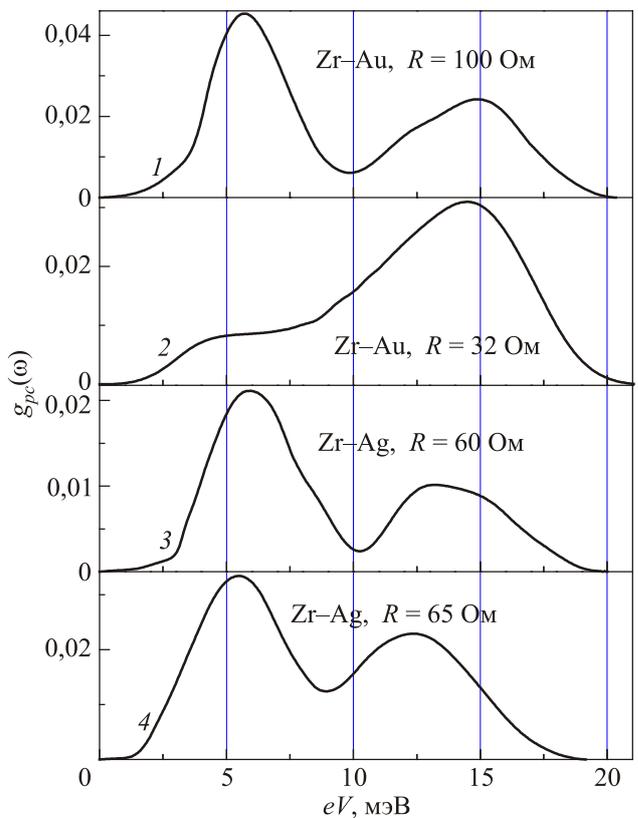


Рис. 7. Микроконтактные функции ЭФВ, восстановленные из спектров на рис. 3: $\lambda = 0,085$ (1); 0,053 (2); 0,04 (3); 0,084 (4).

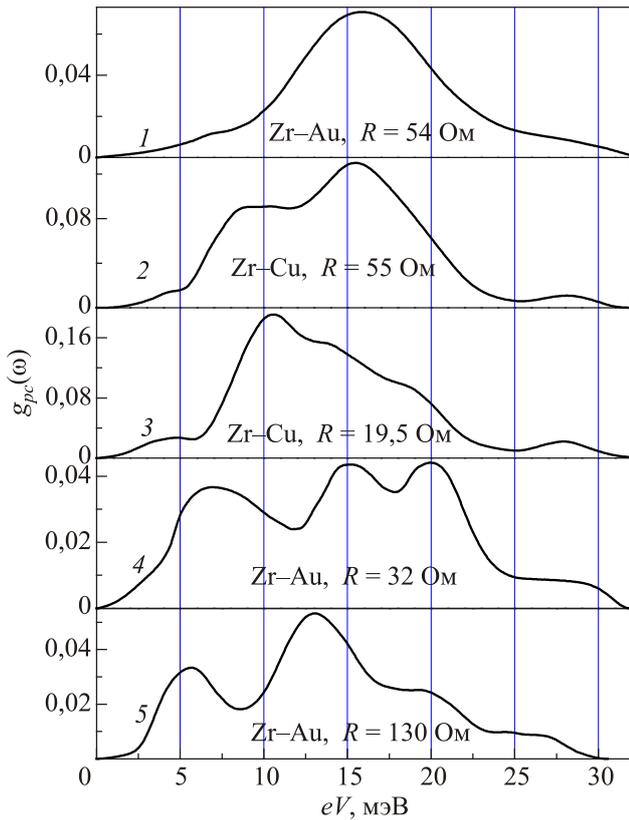


Рис. 8. Микроконтактные функции ЭФВ, восстановленные из спектров на рис. 4: $\lambda = 0,115$ (1); $0,254$ (2); $0,367$ (3); $0,138$ (4); $\lambda = 0,124$ (5).

Обозначим $p_{F1}/p_{F2} = b$; $v_{F1}/v_{F2} = c$; пусть $b, c < 1$, тогда

$$D(\alpha_1) = \frac{4b\alpha_1\sqrt{\alpha_1^2 + b^{-2} - 1}}{c\left(\alpha_1 + \frac{b}{c}\sqrt{\alpha_1^2 + b^{-2} - 1}\right)^2}; \quad (8)$$

$$2\langle\alpha_1 D(\alpha_1)\rangle_{V_z > 0} = 2\int_0^1 \alpha_1 D(\alpha_1) d\alpha_1. \quad (9)$$

Запишем выражения для формфакторов чистого гетероконтакта [13]:

$$K_s(\mathbf{p}, \mathbf{p}') = \frac{D(\mathbf{p}_s = \mathbf{p})D(\mathbf{p}_s = \mathbf{p}')}{4\langle\alpha D(\alpha)\rangle_s} K_0(\mathbf{p}, \mathbf{p}'), \quad (10)$$

где $K_0(\mathbf{p}, \mathbf{p}')$ — формфакторы чистых гомоконтактов, одинаковые для обоих металлов; $K_s(\mathbf{p}, \mathbf{p}')$ — формфактор циркония или благородного металла.

Для определения усредненного формфактора циркония в гетероконтакте в баллистическом режиме необходимо вначале вычислить числитель формулы (10):

$$A_{s=Zr} = \langle D_{12}(\mathbf{p}_s = \mathbf{p})D_{12}(\mathbf{p}_s = \mathbf{p}')K_{0s}(\mathbf{p}_s, \mathbf{p}') \rangle_{V_z > 0}.$$

В модели отверстия [13]

$$K_{0s} = K_0(\mathbf{p}, \mathbf{p}') = \frac{|v_z v'_z| \theta(-v_z v')}{|v_z \mathbf{v}' - v'_z \mathbf{v}|} \quad (11)$$

(здесь θ — функция Хевисайда).

Для сферической поверхности Ферми после преобразования получаем [3]

$$A = 16 \int_0^1 dx \int_0^1 dy \frac{x D(\alpha_1 = x) D(\alpha_1 = y)}{(m+n)^2}, \quad y > x, \quad (12)$$

$$n = (1-x^2)^{1/4} + (1-x^2/y^2)^{1/4},$$

$$m = \left\{ 8 \left[(1-x^2) \left(1 - \frac{x^2}{y^2} \right) \right]^{1/4} \left[(1-x^2)^{1/2} + \left(1 - \frac{x^2}{y^2} \right)^{1/2} \right] \right\}^{1/4}.$$

Принимая для пары Zr-Cu $b = c = 0,673$, получаем $A = 0,19$, $[2\langle\alpha_1 D(\alpha_1)\rangle_{V_z > 0}]^{-1/2} = 0,86$, тогда $K_{\text{сог}}^{\text{Cu}} = 1,77$. Для гетероконтактов Zr-Ag и Zr-Au b и c приблизительно одинаковы, принимая $b = c = 0,76$, получаем $A = 0,21$, $[2\langle\alpha_1 D(\alpha_1)\rangle_{V_z > 0}]^{-1/2} = 0,9$, тогда $K_{\text{сог}}^{\text{Ag, Au}} = 1,87$.

Таким образом, с учетом уточняющих коэффициентов максимальные значения для гетероконтактов Zr-Cu составляют: $\lambda = 0,81$, $g_{pc}^{\text{max}} = 0,5$ (рис. 5, панель 4, рис. 9, панель 2, $R = 41,7$ Ом). Соответственно для Zr-Ag имеем: $\lambda = 0,84$, $g_{pc}^{\text{max}} = 0,51$ (рис. 6 панель 3, $R = 42$ Ом). И наконец, для Zr-Au: $\lambda = 0,55$, $g_{pc}^{\text{max}} = 0,38$ (рис. 6, панель 1, $R = 85$ Ом). Напомним, что для гомоконтакта Zr-Zr получено: $\lambda = 0,66$, $g_{pc}^{\text{max}} = 0,34$ (рис. 5, панель 1, рис. 9, панель 1, $R = 43$ Ом).

Тот факт, что уточненные значения для гетероконтактов Zr-Cu и Zr-Ag оказались весьма близки между собой, свидетельствует в пользу того, что здесь мы достигли предела технологии и, по-видимому, имеем баллистический предел для этих контактов. Несколько меньшие значения для пары Zr-Au отражают тот факт, что к рассмотрению было принято меньшее количество таких спектров.

Таким образом, использование гетероконтактов позволило не только уточнить положение фоновых особенностей в спектрах, но и скорректировать значение константы λ и функции ЭФВ g_{pc} .

Отметим, что данный уточняющий коэффициент, помимо сферической поверхности Ферми, подразумевает геометрически симметричный гетероконтакт с плоской (зеркальной) границей между берегами. Поэтому любые численные значения, полученные с помощью этих коэффициентов, носят оценочный характер.

Наконец, на рис. 9 сгруппированы для большей наглядности все вышеперечисленные типы микроконтактных функций ЭФВ, связанные, по-видимому, с различными направлениями оси контакта по отношению к кристаллографической ориентации Zr электрода. Там же

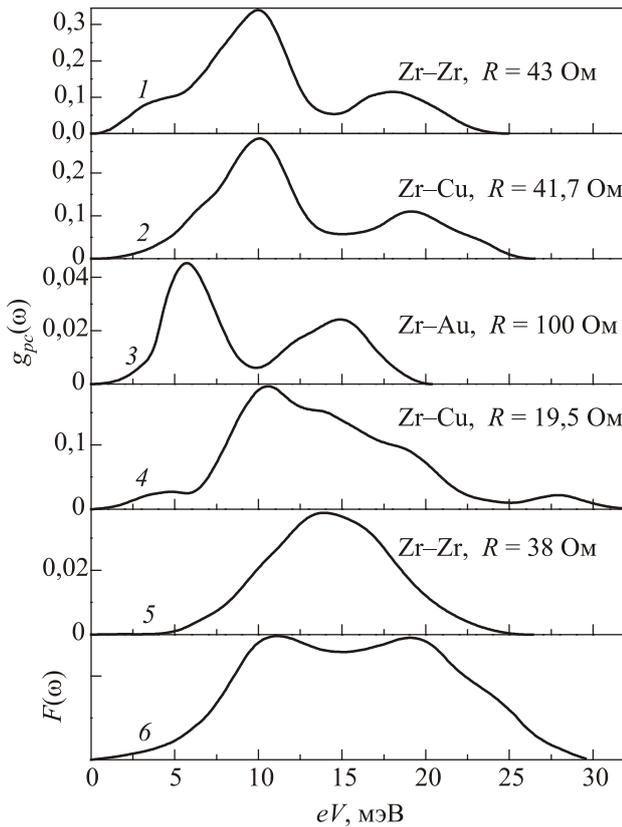


Рис. 9. Кривые 1–4 — микроконтактные функции ЭФВ, отобранные с рис. 5–8, которые, по-видимому, отвечают различным кристаллографическим направлениям: $\lambda = 0,66$ (1); $0,46$ (2); $0,085$ (3); $0,367$ (4); кривая 5 — функция ЭФВ из [4], ось контакта совпадает с кристаллографической осью c Zr; $\lambda = 0,055$; 6 — функция плотности фононных состояний (данные нейтронных измерений) [14].

приведена функция ЭФВ, восстановленная в работе [4]. Для нее известно, что направление оси микроконтакта совпадает с направлением оси c монокристалла Zr. Отметим, что функция ЭФВ (кривая 1 на рис. 8) фактически совпадает с ней по форме, что свидетельствует о той же ориентации оси контакта. Интересно заметить, что кривая 4 на рис. 9 включает в себя все 5 особенностей, встречающихся в различных типах спектров. Завершает рис. 9 функция плотности фононных состояний (кривая 6). К сожалению, поскольку в экспериментах использовались поликристаллические электроды, определить направление осей микроконтактов не представляется возможным. Тем не менее, поскольку большинство спектров имеют особенности в районах 9–11 и 18–20 мэВ, что совпадает с функцией плотности фононных состояний, можно предположить, что для большинства кристаллографических направлений эти фононные моды преобладающие.

Основные результаты

1. Для экспериментального исследования ЭФВ в α -цирконии методом микроконтактной спектроскопии Янсона использованы как гомоконтакты Zr–Zr, так и гетероконтакты между Zr и благородными металлами Cu, Ag и Au.

2. Обнаружено, что в МК спектрах гетероконтактов Zr–Cu, Zr–Ag, Zr–Au (на вторых производных ВАХ) вклад благородных металлов не проявляется. В сравнении с характеристиками гомоконтактов из Zr, спектры гетероконтактов имеют меньший уровень фона и более четкие высокочастотные особенности.

3. Из экспериментальных данных восстановлены графики и определены абсолютные значения микроконтактной функции ЭФВ, получены оценки величины константы ЭФВ. Наблюдались проявления анизотропии спектра ЭФВ в цирконии.

Работа выполнена при финансовой поддержке НАН Украины по проекту ФЦ 3-19. Авторы признательны Ю.Г. Найдюку за замечания и дополнения, высказанные в процессе обсуждения статьи.

1. И.К. Янсон, *ЖЭТФ* **66**, 1035 (1974).
2. И.К. Янсон, А.В. Хоткевич, Атлас микроконтактных спектров электрон-фононного взаимодействия в металлах, Наукова Думка, Киев (1986) [A.V. Khotkevich, I.K. Yanson, Atlas of Point-Contact Spectra of Electron-Phonon Interactions in Metals, Kluwer Academic Publishers, Boston/Dordrecht/London (1995)].
3. Н.Л. Бобров, Л.Ф. Рыбальченко, В.В. Фисун, И.К. Янсон, *ФНТ* **13**, 611 (1987) [*Sov. J. Low Temp. Phys.* **13**, 344 (1987)].
4. В.В. Хоткевич, А.В. Хоткевич, А.П. Жернов, Т.Н. Кулагина, Э.К. Фольк, *Вісник ХНУ*, №476, серия «Фізика», вип. 4, 96 (2000).
5. J. Moreland and J.W. Ekin, *J. Appl. Phys.* **58**, 3888 (1985).
6. 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.
7. П.Н. Чубов, А.И. Акименко, И.К. Янсон, А.С. 834803 (СССР) М. Кл. 3. Н 01 L 21/28. Опубл. 10.06.81. Бюл. № 20.
8. А.В. Хоткевич, Дисс. ... докт. физ.-мат. наук, ФТИНТ, Харьков (1990).
9. В.А. Финкель, *Низкотемпературная рентгенография металлов*, Металлургия, Москва (1971).
10. У. Харрисон, *Теория твердого тела*, Мир, Москва (1972).
11. G. Vambakidis, *Phys. Status Solidi (b)* **54**, K57 (1972).
12. I.K. Yanson, I.O. Kulik, and A.G. Batrak, *J. Low Temp. Phys.* **42**, 527 (1981).
13. Р.И. Шехтер, И.О. Кулик, *ФНТ* **9**, 46 (1983) [*Sov. J. Low Temp. Phys.* **9**, 22 (1983)].
14. F. Gompf and W. Reichardt, *Progress Report of the Teilinstitut Nucleare Festkorperphysik*, Fachinformationzentrum, Karlsruhe, KFK-2183, 33 (1975).

Point-contact function of the electron–phonon interaction in zirconium

N.L. Bobrov, L.F. Rybaltchenko, V.V. Fisun,
and A.V. Khotkevich

Experimental study of the electron–phonon interaction (EPI) spectra was conducted for zirconium by means of the Yanson’s point-contact (PC) spectroscopy. The EPI constant and the spectral function of electron–phonon interaction were defined. Both homocontacts (Zr–Zr) and heterocontacts (Zr–Cu, Zr–Ag and Zr–Au) were studied. No contribution to the he-

terocontact spectra from copper, silver or gold was detected. Five phonon peculiarities of the EPI function were seen in the positions with energies of 5–6, 9–11, 13–15, 18–20 and 27–29 meV. The PC spectra variation linked to anisotropy in Zr.

PACS: **71.38.–k** Polarons and electron-phonon interactions;
73.40.Jn Metal-to-metal contacts;
74.25.Kc Phonons.

Keywords: Yanson’s point-contact spectroscopy, electron–phonon interaction, heterocontacts.