

МИКРОКОНТАКТНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ АНИЗОТРОПИИ ЭЛЕКТРОН-ФОНОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В МЕТАЛЛАХ

И.К.Янсон, А.Г.Батрак

Измерены зависимости второй производной вольт-амперных характеристик от напряжения для точечных контактов из монокристаллов Cu и Zn различной ориентации. Обнаруженная анизотропия микроконтактных спектров качественно согласуется с анизотропией фононных спектров этих металлов.

В отличие от туннельной спектроскопии, микроконтактная спектроскопия основывается на изучении малых нелинейностей вольт-амперных характеристик контакта двух металлов, соединенных проводящим мостиком микроскопических размеров ($\approx 100 \text{ \AA}$) [1]. Теория этого эффекта [2, 3] предсказывает возможность исследовать анизотропию электрон-фононного взаимодействия (ЭФВ), если в качестве электродов выбрать достаточно чистые монокристаллы. В работе [4] было показано, что наблюдение микроконтактных спектров (МК спектров) возможно и в случае точечного контакта двух массивных металлов. В настоящей работе сообщается о наблюдении МК спектров ЭФВ на монокристаллах Cu и Zn различной ориентации. Обнаруженная анизотропия функций ЭФВ $G(\omega) = \tilde{\alpha}^2(\omega)F(\omega)$ ¹⁾ качественно согласуется с анизотропией фононных спектров этих металлов.

Из двух одинаковых монокристаллов с размерами $10 \times 2 \times 2 \text{ мм}^3$ электролитическим травлением и полировкой изготавливались электроды точечного контакта: игла с углом заточки $22 - 53^\circ$ и радиусом кривизны 50 мкм^2 и "наковальня", имеющая плоский торец (поз. 1 на рис. 1), которые приводились в соприкосновение в жидком гелии с помощью скобы 2 с дифференциальным винтом 3, регулируемым снаружи криостата через червячную передачу 4. Сопротивление стабильных контактов контролируется изменялось в пределах от нескольких десятых долей до нескольких десятков ом. Изучаемая кристаллографическая ориентация совпадала с осью образца. Измерение вольт-амперных характеристик и их производных проводились четырехконтактным способом на обычном туннельном спектрометре.

На рис. 2 представлены зависимости второй гармоники модулирующего напряжения V_2 , пропорциональные второй производной вольт-амперной характеристики, от постоянной составляющей напряжения на контакте для Cu в трех главных ориентациях. Согласно [2, 3] эти зависимости пропорциональны микроконтактным спектрам ЭФВ — $G(eV)$. МК спектры монокристаллов, в основном, подобны МК спектрам, полученным ранее на поликристаллических пленочных контактах Cu [5], от-

¹⁾ Определение функции ЭФВ $G(\omega)$ дано в работах [2, 3].

²⁾ Эффективный диаметр контакта много меньше этой величины. Он оценивается по формуле Шарвина $d \sim (\rho l / R_0)^{1/2}$ и составляет $70 \div 700 \text{ \AA}$.

личаясь от последних заметно меньшим уровнем фона при больших напряжениях.

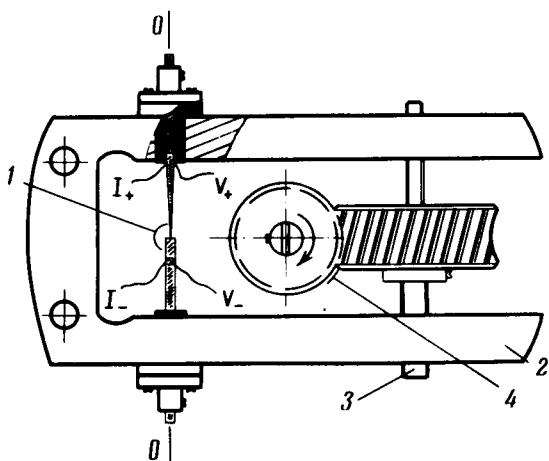


Рис. 1. Конструкция регулируемого точечного контакта: 1 — монокристаллические электроды, одинаковой ориентации вдоль оси 00, 2 — скоба, 3 — дифференциальный винт, 4 — червячная передача

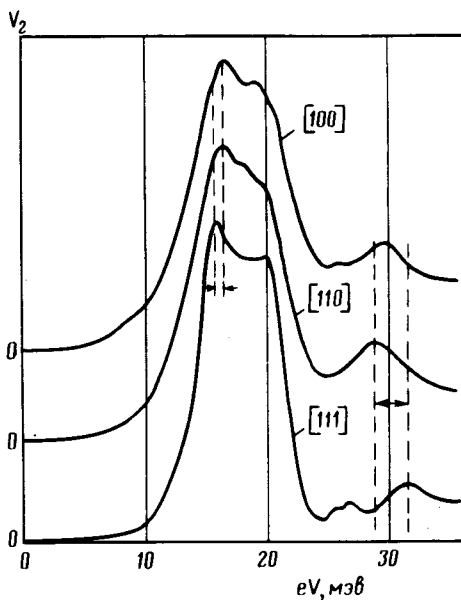


Рис. 2. Микроконтактные спектры меди для различных кристаллографических ориентаций. Температура, сопротивление контактов и амплитуда модуляции равны соответственно: [100] — 1,5 К, 6,25 Ом, 0,7 мВ; [110] — 4,2 К, 10,5 Ом, 0,56 мВ; [111] — 1,5 К, 1,0 Ом, 0,7 мВ

Как и следовало ожидать, изменения МК спектров ЭФВ для различных ориентаций высокосимметричного металла Cu малы, а их интенсивность приблизительно одинакова. Тем не менее, принимая во внимание достаточно высокую восприимчивость результатов¹⁾, можно уверенно регистрировать небольшие сдвиги максимумов при $eV^{(1)} \approx 16$ мэВ и $eV^{(2)} = 29 \div 31$ мэВ, обусловленные анизотропией фононного спек-

¹⁾ Среднеквадратичные отклонения положений особенностей $V^{(1)}$ и $V^{(2)}$ на МК спектрах указаны в виде погрешностей в таблице.

ра (таблица). Так как электроны в районе контакта наиболее эффективно рассеиваются на фононах с максимальными волновыми векторами, распространяющимися против направления тока, то положения особенностей на МК спектрах следует сравнивать с энергиями фононов вблизи границы зоны Бриллюэна в данном направлении. Для этих фононов обычно $d\omega/dq \approx 0$ и плотность состояний максимальна. Эти соображения объясняют следующие корреляции между фоннными и МК спектрами в одинаковых направлениях. Максимумы плотности состояний поперечных акустических (TA) фононов в направлениях $[110]$ и $[100]$ приблизительно совпадают и расположены при больших энергиях, чем в направлении $[111]$. С другой стороны, LA -максимум в направлении $[111]$ сдвинут в область больших энергий, причем соответствующий максимум в направлении $[110]$ расположен при наименьших энергиях. Соответствующие сдвиги максимумов $V^{(1)}$ и $V^{(2)}$ наблюдаются и на МК спектрах, снятых в различных направлениях (таблица). Отсюда следует, что некоторое несоответствие между положениями LA -максимумов на МК и фоннных спектрах, отмеченное в работе [4] для серебра и работе [5] для пленочных контактов из меди, по-видимому, обусловлено текстурой металла в районе контакта.

Положение максимумов $V^{(1)}$ и $V^{(2)}$ на микроконтактных спектрах и энергии фононов, соответствующие особенностям $d\omega/dq = 0$ на дисперсионных кривых для меди

Ориентация	Микроконтактные спектры		Положение особенностей на дисперсионных кривых для фононов (по данным работы [8])	
	$V^{(1)}, \text{ мэв}$	$V^{(2)}, \text{ мэв}$	$TA, \text{ мэв}$	$LA, \text{ мэв}$
$[111]$	$15,7 \pm 0,1$	$31 \pm 0,4$	$14,1 \pm 0,4$	$30,2 \pm 0,8$
$[110]$	$16,2 \pm 0,1$	$28,8 \pm 0,2$	$21,2 \pm 0,6$ $30,0 \pm 0,8$	$26,5 \pm 0,6$
$[100]$	$16,4 \pm 0,1$	$29,8 \pm 0,2$	$21,2 \pm 0,6$	$30,0 \pm 0,8$

Дополнительный максимум при $eV \approx 26 \text{ мэв}$ наблюдается на МК спектрах Cu в направлении $[111]$ и реже — $[100]$ (рис. 2). Его можно связать с максимумом плотности состояний фононов в направлении $[110]$. Несовпадение этих направлений неудивительно, так как прямое сопоставление МК спектра и особенностей дисперсионных кривых для фононов в данном направлении имеет лишь грубый характер. Более точное сравнение эксперимента с теорией возможно лишь в случае результата довольно сложного численного расчета на основе формул, полученных в [2, 3].

Наиболее ярко угловая зависимость МК спектров ЭФВ может быть выявлена на примере сильно анизотропных металлов. На рис. 3 представлены $V_2(eV)$ — характеристики точечного контакта из для двух взаимно перпендикулярных ориентаций. МК спектр, снятый вдоль оси c , содержит интенсивный низкочастотный пик при $eV \approx 8$ мэв, наблюдавшийся и на поликристаллических пленочных образцах в работе [6]. В средней части спектра значение эффективной функции ЭФВ сравнительно мало. Спектр, снятый в базовой плоскости, напротив, имеет наибольшую интенсивность в средней области, тогда как интенсивность низкочастотного пика существенно уменьшена. Оба спектра имеют максимумы при высоких энергиях, соответствующие максимумам плотности состояний оптических фононов.

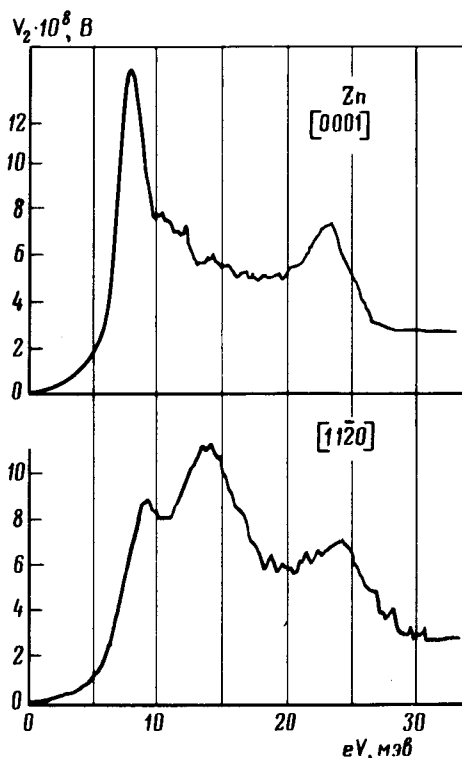


Рис. 3. Микроконтактные спектры цинка для двух взаимно перпендикулярных ориентаций, $T = 1,5\text{K}$. Сопротивление контактов и амплитуда модуляции равны соответственно: $[0001] - 9,7\text{ом}$, $0,42\text{мэв}$; $[11\bar{2}0] - 9,8\text{ом}$, $0,7\text{мэв}$

В работе [7] проведен расчет анизотропных функций ЭФВ $g_{\mathbf{k}}(\omega) = a_{\mathbf{k}}^2(\omega) F_{\mathbf{k}}(\omega)$ для Zn. Несмотря на то, что эти функции отличаются от

транспортных функций ЭФВ $G(\omega)$, измеряемых в МК спектроскопии, можно ожидать, что их анизотропия качественно будет совпадать. Действительно, отмеченные выше особенности МК спектров Zn, снятых во взаимно перпендикулярных направлениях, совпадают с предсказанной анизотропией векторных функций $g_k(\omega)$.

Таким образом, проведенное качественное сравнение микроконтактных спектров с известными фононными спектрами или анизотропными функциями электрон-фононного взаимодействия позволяет заключить, что анизотропия микроконтактных спектров действительно отражает анизотропию электрон-фононного взаимодействия в металлах.

Физико-технический институт
низких температур
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию
2 января 1978 г.

Литература

- [1] И.К.Янсон. Нелинейные эффекты в электропроводности точечных контактов и электрон-фононное взаимодействие в нормальных металлах. ЖЭТФ, **66**, 1035, 1974.
- [2] I.O.Kulik, R.I.Shekhter, A.N.Omelyanchouk. Electron-phonon coupling and phonon-generation in normal metal microbridges. Solid State Comm., **23**, 303, 1977.
- [3] И.О.Кулик, А.Н.Омельянчук, Р.И.Шехтер. Электропроводность точечных микроконтактов и спектроскопия фононов и примесей в нормальных металлах. ФНТ, **3**, вып. 12, 1977.
- [4] A.G.M.Jansen, F.M.Mucller, P.Wyder. Direct measurement of electron-phonon coupling $\alpha^2F(\omega)$ using point-contacts: noble metals. Proc. 2-nd Rochester Conference on S.-c. in d- and f- Band metals, 1976, Phys. Rev., **B16**, 1325, 1977.
- [5] И.К.Янсон, Ю.Н.Шалов. Спектр электрон-фононного взаимодействия в меди. ЖЭТФ, **71**, 286, 1976.
- [6] И.К.Янсон. Микроконтактная спектроскопия электрон-фононного взаимодействия в цинке и кадмии. ФНТ, **3**, 1516, 1977.
- [7] P.T.Truant, J.P.Carbotte. Theory of Phonon Induced Anisotropy in h.c.p. Metals: Zn. Can J. Phys., **51**, 922, 1973.
- [8] R.M.Nickleow, G.Gilat, H.G.Smith, L.J.Raubenheimer, M.K.Wilkinson. Phonon frequencies in Copper at 49 and 298k. Phys. Rev., **164**, 922, 1967.