

Инверсный микроконтактный спектр электрон-фононного взаимодействия в гомоконтактах из мышьяка

А.В. Хоткевич^{1,2}, А.С. Красный¹

¹Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины
пр. Науки, 47, г. Харьков, 61103, Украина

²Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61022, Украина
E-mail: khotkevich@ilt.kharkov.ua

Статья поступила в редакцию 25 декабря 2015 г., после переработки 25 января 2016 г., опубликована онлайн 24 февраля 2016 г.

При температуре жидкого гелия измерены микроконтактные (МК) спектры (вторые производные вольт-амперных характеристик) точечных гомоконтактов As/As. Наблюдалась инверсия знака МК спектра вследствие разрушения локализации электронов в контакте из мышьяка из-за электрон-фононного взаимодействия (ЭФВ). МК спектр содержит два основных максимума при энергиях 10 и 25 мэВ. Граница однофононной части спектра отвечает 34 мэВ. Это согласуется с известными результатами о плотности фононных состояний. Предполагая, что инверсный МК спектр отражает особенности спектральной функции ЭФВ, рассчитана среднеквадратичная частота фононов и получена оценка для температуры Дебая.

При температурі рідкого гелію виміряно мікроконтактні (МК) спектри (другі похідні вольт-амперних характеристик) точкових гомоконтактів As/As. Спостерігалася інверсія знаку МК спектра внаслідок руйнування локалізації електронів у контакті з миш'яку через електрон-фононну взаємодію (ЕФВ). МК спектр містить два основних піки при енергіях 10 та 25 меВ. Межа однофононної частини спектра відповідає 34 меВ. Це узгоджується з відомими результатами щодо щільності фононних станів. Припускаючи, що інверсний МК спектр відображає особливості спектральної функції ЕФВ, підраховано середньоквадратичну частоту фононів і отримано оцінку щодо температури Дебая.

PACS: 63.20.-e Фононы в кристаллической решетке;
73.40.Jn Контакты металл-металл;
81.05.Vx Металлы, полуметаллы и сплавы.

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

Для мышьяка в сравнении с большинством металлических элементов частотное распределение фононов слабо изучено, и известные нам данные отражены в работах [1,2]. Первые наши результаты по изучению электрон-фононного взаимодействия (ЭФВ) в мышьяке с использованием точечных гомоконтактов As/As представлены в [3]. Впоследствии в [4,5] были измерены МК спектры гетероконтактов As/Cu, имевшие как обычную полярность, так и инверсную. В настоящей работе приведены данные по экспериментальному исследованию спектра ЭФВ в гомоконтактах α -As методом неупругой микроконтактной спектроскопии [6].

Изготовление прижимных точечных контактов из мышьяка затрудняется сильным окислением открытой поверхности этого металла на воздухе. Поэтому точеч-

ные гомоконтакты скользящего типа [6] создавались между свежими сколами на каждом из двух электродов, полученных в результате разлома надвое первоначальной заготовки (рис. 1(а)).

Такие заготовки изготавливались из массивного мышьяка на электроискровом станке и представляли собой параллелепипед $1 \times 1 \times 10$ мм с надрезом глубиной $\approx 0,5$ мм по диагонали одной из граней. После химического травления и полировки на концах заготовки закреплялись миниатюрные бронзовые зажимы с припаянными к ним токовыми и потенциальными проводниками. Время с момента раскалывания заготовки по линии надреза на два электрода до помещения образцов в криостат с жидким гелием не превышало 1 мин. Взаимное положение электродов в механическом устройстве для их

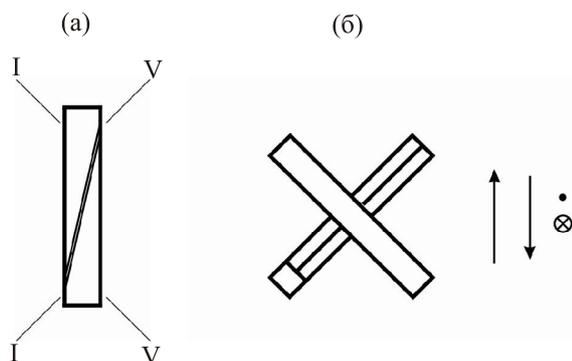


Рис. 1. Получение точечных контактов: заготовка в виде параллелепипеда для получения двух электродов при ее разломе по диагональному надрезу (вид в плане со стороны надреза, показаны места подключения токовых и потенциальных проводников) (а); схема положения электродов при получении контактов, вид в плоскости соприкосновения электродов (стрелки и символы — направления взаимного перемещения электродов) (б).

микроперемещений в жидком гелии (рис. 1(б)) позволяло в одном цикле охлаждения получать практически неограниченное число точечных контактов между всеми новыми участками поверхностей каждого из электродов. Исходные для изготовления электродов два слитка крупноблочного поликристаллического мышьяка имели отношение удельных сопротивлений $\rho_{300\text{ K}}/\rho_{4,2\text{ K}}$ равное 4,5 и 30. Существенных различий в характеристиках полученных на их основе точечных контактов не наблюдалось.

Измерялись зависимости первой и второй гармоники сигнала модулирующего тока от напряжения на контакте, пропорциональные первым и вторым производным вольт-амперных характеристик (ВАХ): $V_1(V) \propto dV(V)/dI$ и $V_2(V) \propto d^2V(V)/dI^2$. Вторую производную ВАХ точечного контакта и/или соответствующую зависимость напряжения второй гармоники модулирующего сигнала называют МК спектром. Типичное начальное значение дифференциального сопротивления контактов $R_0 = R \equiv dV/dI$ при $V \rightarrow 0$ составляло ~ 10 Ом.

Наблюдался полупроводниковый характер изменения сопротивления контактов (уменьшение с увеличением напряжения), что отвечает отрицательным значениям напряжения второй гармоники модулирующего сигнала V_2 (рис. 2).

Такое явление инверсии знака второй производной ВАХ впервые зарегистрировано в [8], наблюдалось для полуметаллов (см. монографию [9]) Sb, Bi, а также C в виде графита и связано, согласно теории [10], с разрушением локализации электронов при ЭФВ в грязных полуметаллах, вследствие чего проводимость точечных контактов в диффузионном токовом режиме возрастает вблизи характерных фононных частот, а положение особенностей микроконтактных спектров и

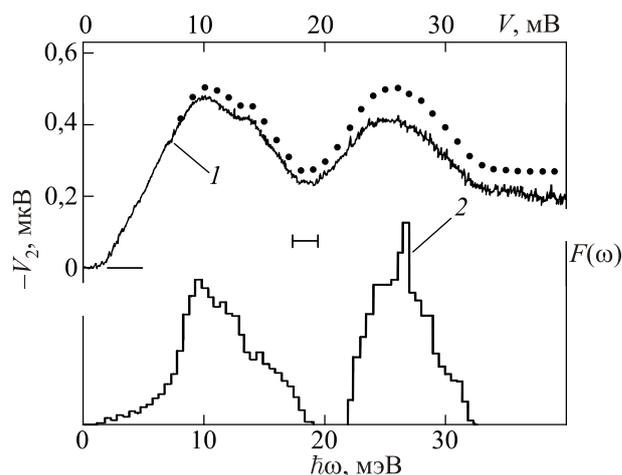


Рис. 2. Микроконтактный спектр ЭФВ и плотность фононных состояний: $V_2(V) \propto d^2V(V)/dI^2$ ($R_0 = 16,5$ Ом, $V_1(V=0) = 711$ мкВ), точки — $\tilde{V}(V) \propto d^2I(V)/dV^2$ (I); расчет $F(\omega)$ [1] (приводится по справочнику [7]) (2).

плотности фононных состояний (ПФС) должно совпадать. Поэтому полученные вторые производные ВАХ гомоконтактов из мышьяка содержат информацию об ЭФВ. По нашим данным (рис. 2) спектр ЭФВ в α -As имеет два основных пика при энергиях в районе 10 и 25 мэВ. Кроме того, наблюдается плечо на низкочастотном максимуме в районе 14 мэВ. Отмеченная особенность обусловлена, как логично заключить из анализа дисперсионных кривых фононов [7], продольными акустическими колебаниями. Граница однофононной части спектра расположена вблизи 34 мэВ. Эти данные воспроизводятся для различных образцов и хорошо согласуются с результатами, полученными для ПФС $F(\omega)$ (рис. 2). В то же время нужно отметить, что граница в неинверсных спектрах из работ [4,5] ближе к 30 мэВ.

В [4,5] для гетероконтактов As/Cu, созданных по технологии игла-плоскость (игла — Cu), наблюдались не только инверсные спектры, но и спектры обычной полярности, и наличие инверсных спектров связывалось с неоднородностями металла в области контакта, внесенными при его получении. Применение в настоящей работе точечных гомоконтактов исключило возможное искажающее воздействие на результаты измерений использования гетероконтактов, но не позволило, однако, получить чистые контакты с неинверсным МК спектром. При этом наблюдение только инверсных спектров ЭФВ в гомоконтактах As/As может являться следствием малой импульсной длины свободного пробега электрона в доступных в лабораторной практике образцах мышьяка в связи с трудностями его очистки [11].

Обработка, согласно [6], экспериментальных микроконтактных спектров As путем исключения фоновой составляющей из зависимости $\tilde{V}(V) \propto d^2I(V)/dV^2$ не показывает щели в фононном спектре, как для $F(\omega)$ на

рис. 2. Это вполне объяснимо конечной разрешающей способностью при измерении микроконтактных спектров ЭФВ (отмечена на рис. 2 горизонтальным отрезком с засечками). Щель между областью энергий акустических и оптических колебаний сложных ромбоэдрических решеток As, Sb, Bi с двумя атомами на элементарную решетку не наблюдается также, в силу конечной разрешающей способности по энергии, при измерениях ПФС на нейтронных спектрометрах по времени пролета [7]. Восстановление спектральной функции ЭФВ и подсчет константы ЭФВ из инверсных микроконтактных спектров не представляется оправданным. В то же время можно подсчитать неизвестную ранее для α -As среднеквадратичную частоту фононов $\langle \omega^2 \rangle$, предполагая, что инверсный спектр отражает особенности ПФС и спектральной функции ЭФВ в мышьяке. Эта величина не зависит от нормировки функции ЭФВ и может быть определена из данных микроконтактной спектроскопии с высокой точностью. По нашим данным $\langle \omega^2 \rangle^{1/2} = (15,1 \pm 0,2)$ мэВ. Указан результат усреднения по 4-м спектрам, приведенная ошибка среднего значения характеризует воспроизводимость результатов, а не точность в определении абсолютных значений. Подсчитанная из соотношения [12] $\Theta_D = (\frac{3}{2}\langle \omega^2 \rangle)^{1/2}$ температура Дебая 215 К оказывается близка к своему справочному значению 224 К [13]. Это, а также проведенные измерения на образцах с различным уровнем остаточного сопротивления, показывают, что полученные экспериментальные характеристики точечных гомоконтактов отражают свойства мышьяка, более соответствующие его неупорядоченному состоянию.

Авторы выражают благодарность А.П. Королюку и А.С. Сидоренко, предоставившим образцы мышьяка, а также Ю.Г. Найдюку, Н.Л. Боброву и О.Е. Квитницкой за полезные замечания к рукописи статьи.

1. W. Reichardt and K.H. Rieder, *Proc. Conf. Neutron Scattering, Gatlinburg, Tenn., USA 1976*, R.M.S.I. Moon (ed.), Gatlinburg (1976).
2. J. Leadbetter, P.M. Smith, and P. Seyfert, *Philos. Mag.* **33**, 441 (1976).
3. С.Н. Крайнюков, А.В. Хоткевич, *III Школа по актуальным вопросам физики полуметаллов и узкозонных полупроводников: Тез. докл.*, Штиинца, Кишинев (1987), с. 10.
4. N.N. Gribov, P. Samuely, J.A. Kokkedee, A.G.M. Jansen, P. Wyder, and I.K. Yanson, *Physica B* **165–166**, 917 (1990).

5. N.N. Gribov, P. Samuely, J.A. Kokkedee, A.G.M. Jansen, P. Wyder, and I.K. Yanson, *Phys. Rev. Lett.* **66**, 786 (1991).
6. 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).
7. W. Kress, *Phonon Dispersion, One-Phonon Densities of States, and Impurity Vibrations of Metallic Systems*, Physics Data, Fachinformationzentrum, Karlsruhe (1987), v. 26-1.
8. И.К. Янсон, Н.Н. Грибов, О.И. Шкляревский, *Письма в ЖЭТФ* **42**, 159 (1985).
9. Yu.G. Naidyuk and I.K. Yanson, *Point-Contact Spectroscopy*, Springer, New York (2005).
10. И.Ф. Ицкович, И.О. Кулик, Р.И. Шехтер, *ФНТ* **13**, 1166 (1987) [*Sov. J. Low Temp. Phys.* **13**, 659 (1987)].
11. Б.Н. Александров, *ФНТ* **10**, 291 (1984) [*Sov. J. Low Temp. Phys.* **10**, 151 (1984)].
12. F.J. Pinski, P.B. Allen, and W.H. Butler, *Phys. Rev. B* **15**, 2943 (1977).
13. *Физический энциклопедический словарь*, Советская энциклопедия, Москва (1963), т. 3.

Inverted point-contact spectrum of electron-phonon interaction in arsenic homocontacts

A.V. Khotkevich and O.S. Krasnyi

Point-contact (PC) spectra (second derivatives of the current-voltage characteristics) of the point homocontacts As/As were measured at liquid He temperatures. Inversion of the PC spectrum sign was observed as a result of destruction of the electron localization inside the arsenic-based contacts caused by the electron-phonon interaction (EPI). The PC spectrum is characterised by two dominant maxima at 10 and 25 meV. The boundary of single-phonon part of the spectrum corresponds to 34 meV. The latter is in agreement with known data on the phonon density of states in As. In assumption that the inversed PC spectrum reflects peculiarities of the EPI spectral function the mean square phonon frequency was calculated along with an estimated value of the Debye temperature.

PACS **63.20.-e** Phonons in crystal lattices;
73.40.Jn Metal-to-metal contacts;
81.05.Bx Metals, semimetals and alloys.

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