

## Механизмы повышения разрешающей способности МК спектроскопии на высоких частотах

О. П. Балкашин

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

Статья поступила в редакцию 14 июля 1997 г.

Показано, что улучшение разрешающей способности высокочастотной МК спектроскопии обусловлено уменьшением вклада в измеряемый сигнал тепловых эффектов и процессов реабсорбции неравновесных фононов.

Показано, що покращення розрізняльної спроможності високочастотної МК спектроскопії обумовлено зменшенням внеску в вимірюваний сигнал теплових ефектів та процесів реабсорбції нерівноважних фононів.

PACS: 73.40.Jn, 73.40.Ei

К настоящему времени микроконтактная спектроскопия — изучение неупругой релаксации электронов по энергиям при пропускании тока через массивный образец с микросужением — утвердилась как относительно простой и вместе с тем достаточно эффективный метод исследования спектров элементарных возбуждений в чистых металлах [1], металлических сплавах и соединениях [2]. Эффективность метода определяется соотношением между геометрическими размерами области концентрации тока (диаметром контакта  $d$ ) и длинами свободного пробега электронов при релаксации по энергиям  $l_\epsilon$  и импульсам  $l_i$ . В предельном случае «грязных» контактов  $d \lesssim \lambda_\epsilon = (l_i l_\epsilon)^{1/2}$ , как показал теоретический анализ [3], спектроскопия еще возможна, однако интенсивность спектральных линий уменьшается, стремясь к нулю при  $\lambda_\epsilon/d \rightarrow 0$ . Если при этом становятся существенными процессы реабсорбции неравновесных фононов, т.е. диаметр  $d$  превышает длину пробега фононов при рассеянии на электронах  $l_{\text{ph-e}}$ , то происходит джоулев разогрев области контакта до температур, определяемых напряжением смещения  $kT = eV/3,63$ , разрешающая способность метода уменьшается ( $\Delta\epsilon \sim kT$ ) и значительно возрастает амплитуда фонового сигнала. Из-за трудностей расчета количественный анализ видоизменений МК спектров при переходе к тепловому режиму

выполнен лишь для эйнштейновской модели плотности состояний фононов [3]. Как известно, неупругая длина свободного пробега электронов зависит от избыточной энергии, задаваемой напряжением на микроконтакте,  $l_\epsilon$  (eV), поэтому при малых длинах пробега может осуществляться переход от спектрального режима в области малых смещений к тепловому режиму при больших напряжениях смещения.

Измерения микроконтактных спектров на высоких частотах  $\omega\tau_i \sim 1$ , где  $\tau_i$  — характерные времена процессов рассеяния квазичастиц, позволили по частотной дисперсии измеряемого сигнала исследовать кинетику релаксационных процессов в контактах и определить характерные времена релаксации  $\tau_i$  для квазичастичных возбуждений различного типа [4–8]. При этом на высокочастотных спектрах некоторых контактов были обнаружены спектральные особенности, отсутствующие в спектрах, измеренных традиционным низкочастотным методом [4,5].

Настоящее сообщение посвящено выяснению возможных причин улучшения разрешающей способности МК спектроскопии при использовании высокочастотной модуляции. Исследования были выполнены на микроконтактах меди со сплавом медь–бериллий Cu–Cu(2,7 ат.% Be), а также из чистого никеля Ni–Ni при температуре 4,2 К. Использовалась модуляционная методика с регистрацией

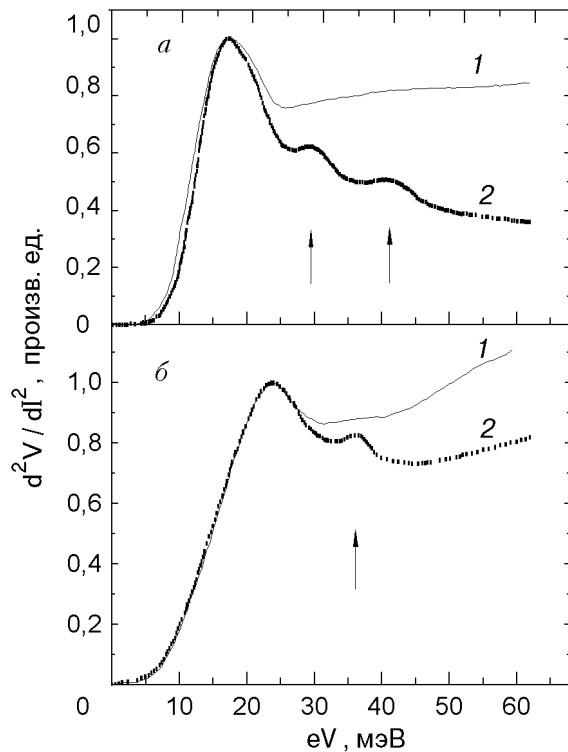


Рис. 1. Спектры микроконтактов Cu–Cu(2,7 ат.% Be) (а) и Ni–Ni (б), измеренные при 3747 Гц (1) и 78 Гц (2).

амплитуды второй гармонике тока модуляции в низкочастотных экспериментах и амплитуды выпрямленного напряжения при облучении контакта ВЧ полем частотой 78 ГГц. Подробное описание техники эксперимента приведено в работе [4].

Измеренные низкочастотные МК спектры, представленные на рис. 1 (кривые 1), характеризуются малой интенсивностью пика, связанного с рассеянием электронов на фононах с поперечной поляризацией ( $T$ -пик, обычно преобладающий в спектре), отсутствием  $L$ -пика, обусловленного продольными фононами, большим уровнем фона и его монотонным ростом с увеличением напряжения. Подобными спектрами, как правило, обладают «грязные» контакты с малой величиной отношения  $l_i/d$  [2]\*. На высокочастотных спектрах (кривые 2 на рис. 1) проявляются спектральные особенности, отмеченные стрелками на рисунке, отсутствующие в НЧ спектрах:  $L$ -пики меди

(29 мэВ) и никеля (36 мэВ), а также пик при энергиях  $\sim 40$  мэВ, связанный с локальной модой колебаний легких примесных атомов бериллия в матрице меди [9], кроме того, уровень фонового сигнала значительно ниже.

Как было показано в наших предыдущих работах [4,5], снижение уровня фона при измерениях МК спектров на высоких частотах, превосходящих частоту фонон-электронных столкновений ( $\omega > \omega_{ph-e} = \lambda \omega_D s / v_F$ , где  $\lambda$  — константа электрон-фононного взаимодействия;  $s$  — скорость звука;  $v_F$  — скорость Ферми;  $\omega_D$  — частота фононов с дебаевской энергией), обусловлено уменьшением вклада в измеряемый спектр процессов реабсорбции неравновесных фононов\*\*. Однако различные процессы неупругого рассеяния, происходящие в микроконтакте (спонтанное и стимулированное испускание фононов электронами проводимости с избыточной энергией  $eV$ , реабсорбция фононов), вносят аддитивный вклад в спектр [10] и уменьшение интенсивности одного из таких процессов не должно приводить к появлению новых спектральных особенностей. Следовательно, при ВЧ измерениях происходит изменение спектрального режима пролета электронов контактной области.

Нагрев микроконтакта транспортным током может служить одной из причин ухудшения его спектроскопических возможностей по мере роста напряжения постоянного смещения. В этом случае измерения на ВЧ при частотах  $\omega > \omega_T$  ( $\omega_T \sim \sim sl_i/d^2 \sim 1$  ГГц [1] — частота релаксации температуры контакта) должны существенным образом уменьшить влияние тепловых эффектов и тем самым улучшить спектральное разрешение. Для проверки данного предположения были выполнены расчеты вольт-амперных характеристик (ВАХ) и их вторых производных (МК спектров) в условиях перегрева контакта током смещения. Расчеты проведены для контакта из меди с сопротивлением  $R_0 = 5$  Ом при температуре гелиевой ванны  $T_0 = 1,5$  К с использованием табличных значений микроконтактной функции электрон-фононного взаимодействия  $g_{pc}(\epsilon)$  [1]. Для ВАХ использовано выражение [11,12]

\* Оценка величины отношения  $l_i/d$  по интенсивности МК спектра [8] для данного контакта дает значение  $\sim 0,01$ .

\*\* Характерная частота фонон-электронного рассеяния равна 5 ГГц для меди [4] и, по оценке,  $\sim 6$  ГГц для никеля.

$$I(V) = \frac{V}{R_0} - C \int_0^\infty \left[ \frac{\varepsilon - eV}{e^{\beta(\varepsilon - eV)} - 1} - \frac{\varepsilon + eV}{e^{\beta(\varepsilon + eV)} - 1} + 2eVN(\varepsilon) \right] g_{pc}(\varepsilon) d\varepsilon$$

где  $C = 8d/3e\hbar v_F R_0$ ;  $\beta = 1/kT$ ;  $R_0$  — сопротивление контакта при нулевом смещении;  $T$  — температура. Функция распределения неравновесных фононов  $N(\varepsilon)$  для случая полной реабсорбции фононов взята в виде

$$N(\varepsilon) = \frac{1}{4\varepsilon} \left[ \frac{2\varepsilon}{e^{\beta\varepsilon} - 1} + \frac{\varepsilon - eV}{e^{\beta(\varepsilon - eV)} - 1} + \frac{\varepsilon + eV}{e^{\beta(\varepsilon + eV)} - 1} \right]. \quad (2)$$

Температура контакта задавалась в виде  $T = T_0 + \Delta T$ ,  $\Delta T = eV/k\gamma$ . На рис. 2 представлен исходный МК спектр в отсутствие перегрева (кривая 1) и различные модификации спектра при некоторых значениях коэффициента  $\gamma$ : от  $\gamma = 4$ , характерного для теплового режима, до  $\gamma = 40$ . Здесь же (кривая 4) показан спектр контакта в случае, когда нагревается только подсистема неравновесных фононов при  $\gamma = 4$ , возбужденных электронами, т.е. считается, что в системе фононов устанавливается равновесное распределение с температурой, задаваемой напряжением постоянного смещения. При этом учитывалось, что общее число фононов совпадало с их числом в отсутствие равновесного нагрева всего контакта:

$$\int_0^\infty N(\varepsilon, T) g_{pc}(\varepsilon) d\varepsilon = \int_0^\infty N(\varepsilon, T_0) g_{pc}(\varepsilon) d\varepsilon.$$

Сравнивая экспериментальные и расчетные спектры, можно сделать вывод, что кривые 1 на рис. 1 и кривая 3 на рис. 2 подобны. В расчетном спектре, так же как и в экспериментальных, отсутствует  $L$ -пик и наблюдается большой уровень фона. Затем по мере уменьшения величины перегрева качество расчетных спектров улучшается. Аналогичное улучшение спектров происходит и при повышении частоты модуляции напряжения до 78 ГГц (кривые 2 на рис. 1). Конечно, расчеты для статической ВАХ не могут быть непосредственно отнесены к результатам измерений в динамическом режиме на ВЧ, однако подобие наблюдаемых эффектов очевидно. Более того, в «грязных» контактах, изученных в

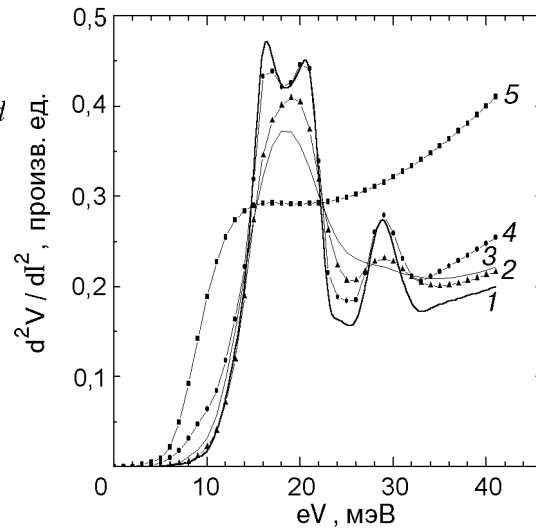


Рис. 2. Эволюция МК спектров контакта Cu-Cu при различных величинах перегрева  $\Delta T = eV/k\gamma$  для  $\gamma = \infty$  (1), 40 (2), 20 (3), 4 (5); кривая 4 — перегрев только фононной подсистемы ( $\gamma = 4$ ).

эксперименте, влияние нагрева должно проявляться в еще большей степени, чем в расчетах, выполненных для баллистического режима.

Таким образом, улучшение разрешающей способности МК спектроскопии при высокочастотных измерениях ( $\omega > \omega_T$ ,  $\omega_{ph-e}$ ) можно связать с уменьшением влияния как процессов реабсорбции неравновесных фононов, так и нагрева контакта. Такие измерения не оказывают влияния на процессы спонтанного испускания фононов неравновесными электронами в силу выполнения неравенства  $\omega \ll \omega_{e-ph} \sim 10^4$  ГГц. Следует заметить, что в экспериментах с низкочастотным прерыванием ВЧ излучения  $\omega_M \tau_i \ll 1$  (квазистатический режим) в измеряемый сигнал вносит вклад болометрический эффект, обусловленный присутствием в контакте неравновесных фононов, вызванных ВЧ током. С ростом напряжения на контакте амплитуда болометрического сигнала увеличивается, что приводит к появлению остаточного фона на ВЧ спектрах. Поэтому более предпочтительными являются динамические измерения по смешению двух ВЧ сигналов или регистрации амплитуды второй гармоники на высокой частоте [4].

Автор признателен О. И. Шкляревскому и А. Г. Шкорбатову за полезные обсуждения результатов данной работы.

- 
1. И. К. Янсон, А. В. Хоткевич, *Атлас микроконтактных спектров электрон-фоонного взаимодействия в металлах*, Наукова думка, Киев (1986).
  2. И. К. Янсон, О. И. Шкляревский, *ФНТ* **12**, 899 (1986).
  3. И. О. Кулик, М. В. Москалец, *ФНТ* **15**, 405 (1989).
  4. О. П. Балкашин, И. К. Янсон, Ю. А. Пилипенко, *ФНТ* **13**, 389 (1987).
  5. О. П. Балкашин, И. К. Янсон, Ю. А. Пилипенко, *ФНТ* **17**, 221 (1991).
  6. О. П. Балкашин, И. И. Кулик, *ФНТ* **21**, 45 (1995).
  7. О. Р. Balkashin, *Physica* **B218**, 54 (1996).
  8. О. П. Балкашин, Ю. А. Пилипенко, *ФТТ* **33**, 2584 (1991).
  9. Ю. Г. Найдюк, Н. А. Черноплеков, Ю. А. Шитиков, О. И. Шкляревский, И. К. Янсон, *ЖЭТФ* **83**, 1177 (1982).
  10. О. П. Балкашин, И. К. Янсон, В. С. Соловьев, А. Ю. Красногоров, *ЖТФ* **52**, 811 (1982).
  11. И. О. Кулик, *ФНТ* **11**, 937 (1985).
  12. О. П. Балкашин, И. И. Кулик, *ФНТ* **18**, 1357 (1992).

## Mechanisms of increasing PC spectroscopy resolution at high frequencies

O. P. Balkashin

It is shown that the improvement of high frequency PC spectroscopy resolution is caused by a decrease in the contribution of thermal effects and nonequilibrium phonon reabsorption processes to the signal to be measured.