Письма в ЖЭТФ, том 41, вып. 7, стр. 302 – 303 *10 апреля 1985 г.*

ЧАСТОТНАЯ ДИСПЕРСИЯ ПРОВОДИМОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МИКРОКОНТАКТОВ, ОБУСЛОВЛЕННАЯ РЕЛАКСАЦИЕЙ НЕРАВНОВЕСНЫХ ФОНОНОВ

И.О.Кулик

Предсказана существенная частотная дисперсия нелинейной составляющей вольт-амперной характеристики точечного контакта между нормальными металлами в области "фона" (т.е. смещений $eV > \hbar\omega_D$), обусловленная релаксацией неравновесного фононного газа. Наблюдение такого эффекта позволит непосредственно определить частоты релаксации дебаевских фононов металла.

Точечный контакт диаметра d, малого в сравнении с длиной свободного пробега электронов l, представляет уникальный объект, позволяющий реализовать неравновесные электронные состояния с функцией распределения [1]

$$f_{\mathbf{p}} = f_0\left(\epsilon_{\mathbf{p}} + \frac{eV}{2}\,\mathrm{sign}\, v_z\right), \tag{1}$$

где $f_0(\epsilon)$ – равновесная фермиевская функция. Электрон-фононное взаимодействие приводит к нелинейной зависимости тока от напряжения такой, что вторая производная d^2I/dV^2 пропорциональна функции ЭФВ Элиашберга $g(\omega) = \alpha^2(\omega)F(\omega)$ при $\omega = eV$ с K-фактором, учитывающим геометрию рассеяния электронов в области микроконтакта (микроконтактная спектроскопия [2]). Фононный газ в микроконтакте также может стать неравновесным, если существует механизм захвата (реабсорбции) генерируемых электронным потоком фононов в области концентрации тока. Таким механизмом, указанным в [3], является отражение фононов областью неоднородности, всегда присутствующей вблизи соприкосновения металлических электродов.

Будем считать, что этот эффект можно учесть введением эффективной импульсной длины свободного пробега фонона l_r порядка (или меньше) его диаметра d, малой в сравнении с энергетической (фонон-электронной) длиной пробега фонона $l_{ph} \sim (M/m)^{1/2}\lambda_{ph} \sim 10^{-5}$ см (λ_{ph} – длина волны дебаевского фонона). Характерные значения диаметра микроконтакта обычно $d \sim 30 - 100$ Å [2], т.е. $d < l_{ph}$. При этом условии основным механизмом релаксации является электрон-фононное взаимодействие, а распределение фононов при $l_r < d$ изотропно в импульсном пространстве, т.е. функция распределения зависит от энергии и равна [4]

$$N_\omega(\mathbf{r}) = q(\mathbf{r})\,\frac{eV-\omega}{2\omega}\,\theta(eV-\omega), \tag{2}$$

где величина $q = 1/2$ в плоскости контакта и быстро убывает при удалении от области концентрации тока (электронной неравновесности, описываемой формулой (1)). В отличие от равновесного (планковского) распределения, функция (2) имеет резкий край при $\omega = eV$. Качественно (2) соответствует разогреву фононов до эффективной температуры (в центре контакта) [1)]

$$\theta_{ph} \sim eV/4. \tag{3}$$

Поскольку θ_{ph} линейно растет с напряжением, нелинейная составляющая тока будет пропорциональна V^2 при смещениях $eV > \omega$, что объясняет так называемый фон на микроконтактных спектрах [2] – постоянное значение d^2I/dV^2 за границей фононного спектра металла.

[1)] Аналогичное выражение для температуры фононов имеет место в тепловом пределе [5,6].

Если приложенное к контакту напряжение имеет не только постоянную, но и переменную составляющую с частотой ω_0:

$$V(t) = V + v \cos \omega_0 t, \tag{4}$$

то изменение числа неравновесных фононов в такт с изменением $V(t)$ сможет происходить только тогда, когда частота ω_0 меньше частоты однородной релаксации фонона

$$\nu_{ph} \sim \lambda \frac{s}{v_F} \omega , \tag{5}$$

где λ – безразмерная константа ЭФВ ($\lambda \sim 0{,}1 - 1$). Для дебаевского фонона эта частота порядка $10^{10} - 10^{11}$ с$^{-1}$, т.е. попадает в область СВЧ диапазона. Поэтому микроконтактные измерения в этой области частот могут явиться удобным инструментом исследования (недоступной другим известным экспериментальным методам) релаксации предельно коротковолновых фононов в металлах.

Кинетическое уравнение для фононов в пределе малых l_r ($l_r l_{ph} \ll d^2$) сводится к

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \nu_{ph}\right) N_\omega = q \nu_{ph} \frac{eV - \omega}{2\omega} \theta (eV - \omega) , \tag{6}$$

где

$$\nu_{ph}(\omega) = 2\pi N(\epsilon_F) \alpha^2 (\omega) \omega \tag{7}$$

($N(\epsilon_F)$ – плотность электронных состояний на уровне Ферми). При смещениях на контакте $eV > \hbar \omega_{max}$ частотная зависимость средней по времени добавки к току $\delta \bar{I}$ и обусловленной нелинейностью ВАХ амплитуды второй гармоники модулирующего сигнала I_2 даются соотношениями [4]

$$\delta \bar{I}(\omega_0) = -\frac{4ev^2 d}{\hbar v_F R_0} \langle q \rangle \int_0^\infty g(\omega) \frac{\nu_{ph}^2(\omega)}{\nu_{ph}^2(\omega) + \omega_0^2} \frac{d\omega}{\omega} ,$$

$$I_2(\omega_0) = \frac{4ev^2 d}{\hbar v_F R_0} \langle q \rangle \left| \int_0^\infty g(\omega) \frac{\nu_{ph}(\omega)}{\nu_{ph}(\omega) + i\omega_0} \frac{d\omega}{\omega} \right| , \tag{8}$$

в которых среднее значение $\langle q \rangle = 0{,}29$ для модели микроконтакта в форме круглого отверстия. R_0 – сопротивление микроконтакта в баллистическом пределе.

Определение по известным зависимостям $\delta \bar{I}(\omega_0)$, $I_2(\omega_0)$ функции $\nu_{ph}(\omega)$ относится к категории "некорректных" задач математической физики и поэтому может быть осуществлено с ограниченной точностью, однако среднее значение ν_{ph} определяется однозначно.

В последнее время были проведены измерения частотной зависимости "фона" на МК спектрах контактов Cu, подтвердившие предсказанный эффект и позволившие оценить частоту релаксации неравновесных фононов в Cu [7].

В заключение пользуюсь случаем поблагодарить И.К.Янсона за полезные обсуждения.

Литература

1. *Кулик И.О., Омельянчук А.Н., Шехтер Р.И.* ФНТ, 1977, 3, 1543.
2. *Yanson I.K., Kulik I.O.* Journ. de Phys., 1978, 39, suppl. 8, 1564; *Янсон И.К.* ФНТ, 1983, 9, 676.
3. *Кулик И.О., Омельянчук А.Н., Янсон И.К.* ФНТ, 1981, 7, 263.
4. *Кулик И.О.* ФНТ, 1985 (в печати).
5. *Verkin B.I., Yanson I.K., Kulik I.O., Shklyarevski O.I., Lysykh A.A., Naydyuk Yu.G.* Sol. State Comm., 1979, 30, 215.
6. *Sauer H., Keck K.* Proc. LT-17, part II – Contributed papers, p. 1081. North-Holland, 1984.
7. *Янсон И.К., Балкашин О.П., Пилипенко Ю.А.* Письма в ЖЭТФ, данный номер, стр.

Физико-технический институт низких температур
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию
20 февраля 1985 г.