

## РЕЛАКСАЦИЯ НЕРАВНОВЕСНЫХ ФОНОНОВ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МИКРОКОНТАКТАХ

И.К. Янсон, О.П. Балкашин, Ю.А. Пилипенко

Обнаружена частотная дисперсия интенсивности микроконтактного спектра электрон-фононного взаимодействия при смещениях на контакте  $eV > hv_{max}$ . Величина эффекта определяется соотношением между частотой неупругой релаксации неравновесных фононов и частотой падающего на контакт высокочастотного излучения.

Известно, что в токовом состоянии микроконтактов, размеры которых меньше средней длины свободного пробега электронов, реализуются существенно неравновесные распределения электронов по энергии и импульсам<sup>1</sup>. Значительно менее изучена функция распределения неравновесных фононов, генерируемых электронами. Предполагается, что неравновесные фононы ответственны, в частности, за фон, в большинстве случаев присутствующий на микроконтактных спектрах электрон-фононного взаимодействия (ЭФВ). Отсутствие прямых экспериментальных данных о поведении неравновесных фононов в микроконтакте препятствует созданию адекватной теории микроконтактного фона, который пока учитывается феноменологически<sup>1</sup>.

В работе<sup>2</sup> предсказана частотная дисперсия фоновой составляющей микроконтактного спектра ЭФВ в области сравнительно низких частот  $\nu_{\phi} \sim \lambda \frac{s}{v_F} \nu_{max} \sim 10^{10} \text{ с}^{-1}$ , где  $\nu_{\phi}$  — средняя частота релаксации фононов,  $\lambda$  — константа ЭФВ,  $s$  — скорость звука,  $v_F$  — скорость Ферми,  $\nu_{max}$  — максимальная частота фононов металла.

Целью настоящей работы являлось обнаружение частотной зависимости фона в области характерных частот релаксации неравновесных фононов в микроконтакте. Оказалось, что измеряя микроконтактные спектры ЭФВ на сверхвысоких частотах (СВЧ), можно существенно уменьшить величину фона. В ряде случаев это приводило к выявлению скрытых спектральных особенностей.

Исследовались вторые производные вольт-амперных характеристик медных микроконтактов, полученных по сдвиговой методике и в конфигурации "игла-плоскость"<sup>1</sup>. В качестве сигнала, пропорционального  $\frac{d^2 V}{dI^2} (eV)$ , на звуковой частоте (НЧ) служила вторая гармоника модулирующего напряжения. На СВЧ эту функцию выполняла небольшая добавка к постоянной составляющей напряжения — сигнал видеодетектирования. Для увеличения чувствительности измерительной схемы амплитуда СВЧ-колебаний модулировалась с частотой 2,5 кГц. Измерения проводились при температуре жидкого гелия на частотах  $\nu$ : 1 – 3 ГГц, 10 ГГц, 50 ГГц, 80 ГГц.

На рис. 1 показаны спектры ЭФВ одного и того же микроконтакта, измеренные на НЧ (кривая 1) и СВЧ (кривая 2). Масштаб по вертикальной оси подбирался так, чтобы интенсивность  $T$ -пика, отвечающего поперечным фононам, приблизительно совпадала. Видно, что спектр ЭФВ практически остался без изменений, однако фон на СВЧ-спектре при смещении  $eV = 40 \text{ мэВ}$  в 7 раз меньше, чем на НЧ-кривой. Эффект уменьшения фона на СВЧ наблюдался на всех контактах, однако его величина варьировалась в широких пределах в зависимости от частоты внешнего излучения, структурного совершенства и чистоты металла в области сужения, о которых косвенно можно судить по форме и интенсивности линий микроконтактного спектра<sup>1</sup>. Чем меньшую интенсивность и больший фон имеет спектр на НЧ, тем меньше эффект уменьшения фона на СВЧ и тем больше величина "остаточного" фона, который не исчезает при увеличении частоты излучения. Измерения выполнялись при минимально возможном уровне мощности внешнего излучения. С увеличением мощности более чем на порядок наблюдалось линейное возрастание сигнала детектирования при любых смещениях на контакте.

На вставке к рис. 1 показаны экспериментальные значения коэффициента подавления фона<sup>1)</sup>  $\eta = (\gamma_{\text{свч}} / \gamma_{\text{нч}})$  на разных частотах для одного из контактов при двух смещениях: 40 и 60 мэВ. Кривые построены по формуле<sup>2)</sup>  $\frac{\gamma(\nu) - \gamma(\infty)}{\gamma(0) - \gamma(\infty)} = [1 + (\frac{\nu}{\nu_{\text{ф}}})^2]^{-1}$ . Выбирая разумные значения  $\eta(\infty) \cong \eta(80 \text{ ГГц})$ , которые показаны горизонтальными прямыми, получим  $\nu_{\text{ф}} = 12 \text{ ГГц}$  и  $10 \text{ ГГц}$  для двух указанных смещений соответственно.

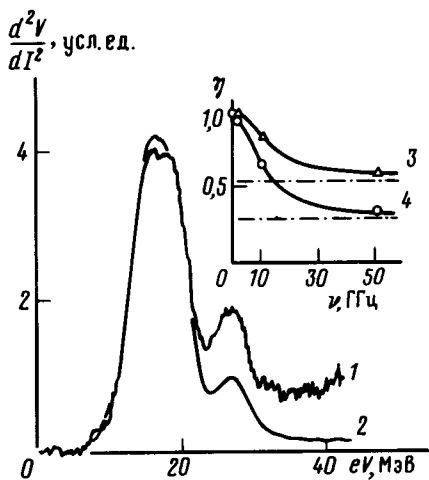


Рис. 1

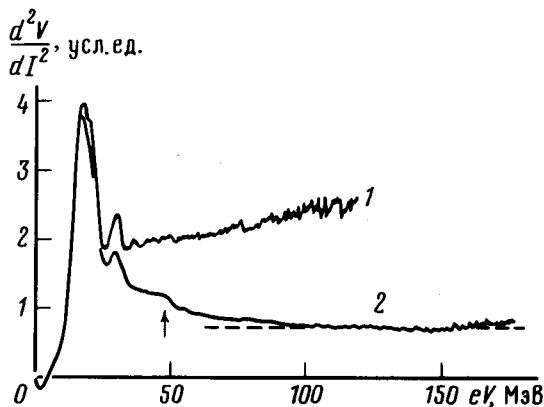


Рис. 2

Рис. 1. Микроконтактные спектры ЭФВ в меди, полученные на звуковой частоте (кривая 1) и на частоте 80 ГГц (кривая 2),  $R = 6,3 \text{ Ом}$ . На вставке – частотные зависимости коэффициента подавления фона для другого контакта ( $R = 3,6 \text{ Ома}$ ) при двух смещениях: 3 – 40 мэВ, 4 – 60 мэВ

Рис. 2. Микроконтактные спектры ЭФВ в меди в области больших смещений. Частота измерений: 1 –  $10^3 \text{ Гц}$ , 2 –  $8 \cdot 10^{10} \text{ Гц}$ ,  $R = 2,97 \text{ Ом}$

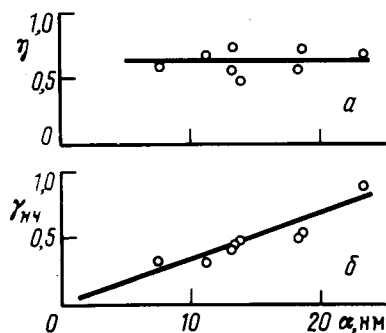


Рис. 3. Зависимости коэффициента подавления фона на СВЧ – а и относительного уровня фона на НЧ – б от диаметра контакта

Оценка частоты однородной релаксации фононов на электронах в меди дает  $\nu_{\text{ф}} \sim 2,9 \text{ ГГц}$  (для  $\lambda = 0,14$ ;  $s = 5 \cdot 10^5 \text{ см/с}$ ,  $v_F = 1,6 \cdot 10^8 \text{ см/с}$ ,  $h\nu_{\text{max}}/k \approx 315 \text{ К}$ ), что в несколько раз меньше наблюдаемых значений. Кроме того, согласно теории<sup>2)</sup> частота прямой фонон-электронной релаксации не должна зависеть от  $eV$  при  $eV \gg h\nu_{\text{max}}$ . На опыте всегда наблюдается уменьшение сигнала детектирования в этом энергетическом интервале, которое насыщается лишь при  $eV \sim 100 \text{ мэВ}$  (рис. 2).

Объяснить такое поведение можно, предположив, что более быстрая релаксация фононов происходит через промежуточную стадию термализации фононного газа за счет фонон-фононных столкновений, вероятность которых при дебаевских энергиях на порядок выше вероят-

1) Параметр  $\gamma$  определен как отношение сигнала при  $eV \gg h\nu_{\text{max}}$  к интенсивности  $T$ -пика.

ности фонон-электронных столкновений<sup>3</sup>. Согласно<sup>4</sup>, температура фононов при  $eV > hv_{max}$  равна  $\theta = eV/4k$  (несмотря на это, электронный газ остается холодным, так как его время релаксации очень мало  $\tau_e \sim d/v_F \sim 10^{-14}$  с,  $d$  — диаметр контакта). Скорость изменения числа неравновесных фононов определяется скоростью изменения их температуры, которая в свою очередь ограничивается фононной теплоемкостью. Последняя возрастает при увеличении  $\theta$ , приводя к возрастанию времени термализации, и стремится к постоянной величине при  $eV > 4k\theta_D \sim 100$  мэВ ( $\theta_D$  — дебаевская температура).

Обратим внимание на более резкое убывание фона на СВЧ вблизи  $eV$ , отвечающего комбинационной энергии фононов  $hw_T + hw_L$  и показанного стрелкой на рис. 2, а также на возрастание фона при  $eV > 100$  мэВ, обусловленное прогрессирующим укорочением длины пробега фононов с ростом температуры.

При изменении сопротивления контактов  $R$  более чем на порядок регулярного изменения коэффициента подавления фона  $\eta$  на СВЧ не наблюдалось (рис. 3, а), хотя можно заметить хорошо известное<sup>1</sup> возрастание НЧ-фона, пропорциональное диаметру контакта  $d = \left[ \frac{16}{3\pi} \cdot \rho l \right]^{1/2}$  ( $\rho l = 0,66 \cdot 10^{-11}$  Ом · см<sup>2</sup>) рис. 3, б. Вероятно размеры контактов слишком велики, чтобы была существенна неоднородная релаксация фононов.

Таким образом, в исследованных микроконтактах происходит практически полная реабсорбция неравновесных фононов электронами. За время  $\sim 10^{-11}$  с фонон-фононные столкновения приводят к термализации фононного газа, который затем релаксирует на электронах за время  $\sim 10^{-10}$  с.

Предварительные эксперименты по смешению двух СВЧ колебаний с близкими частотами показали, что фон может быть еще более уменьшен, причем коэффициент подавления фона в этом случае равен квадрату  $\eta$  при видеодетектировании.

Авторы благодарны И.О.Кулику за плодотворные дискуссии.

#### Литература

1. Янсон И.К. ФНТ, 1983, 9, 676.
2. Кулик И.О. Письма в ЖЭТФ, данный номер, стр. 302; ФНТ, 1985, 11 (в печати).
3. Берман Р. "Теплопроводность твердых тел", М.: Мир, 1979, с. 216.
4. Кулик И.О., Омельяничук А.Н., Янсон И.К. ФНТ, 1981, 7, 263.