

НИЗКОЧАСТОТНЫЙ СПЕКТР ШУМОВ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПЕРЕХОДОВ С АМОРФНОЙ ПРОСЛОЙКОЙ

Г. Э. Баблян, Г. А. Овсянников

В ряде работ (см., например, [1] и ссылки в ней) было обнаружено, что в туннельных переходах малых размеров (площадью $S=1-10$ мкм²) при высоких напряжениях ($V \gg kT/e$, Δ/e , Δ — сверхпроводящая щель в спектре возбуждений) наблюдается низкочастотный шум в виде импульсов переменной длительности со спектром, отличным от обычной формы типа $1/f$. Такой «телеграфный» шум объяснялся случайным изменением сопротивления перехода в результате вариации высоты туннельного барьера за счет захвата электронов ловушками [1]. С другой стороны, в работе [2] сообщалось об особенностях НЧ спектров шумов точечных контактов металлов с непосредственной (не туннельной) проводимостью, где явления, обусловленные захватом электронов ловушками должны быть малы.

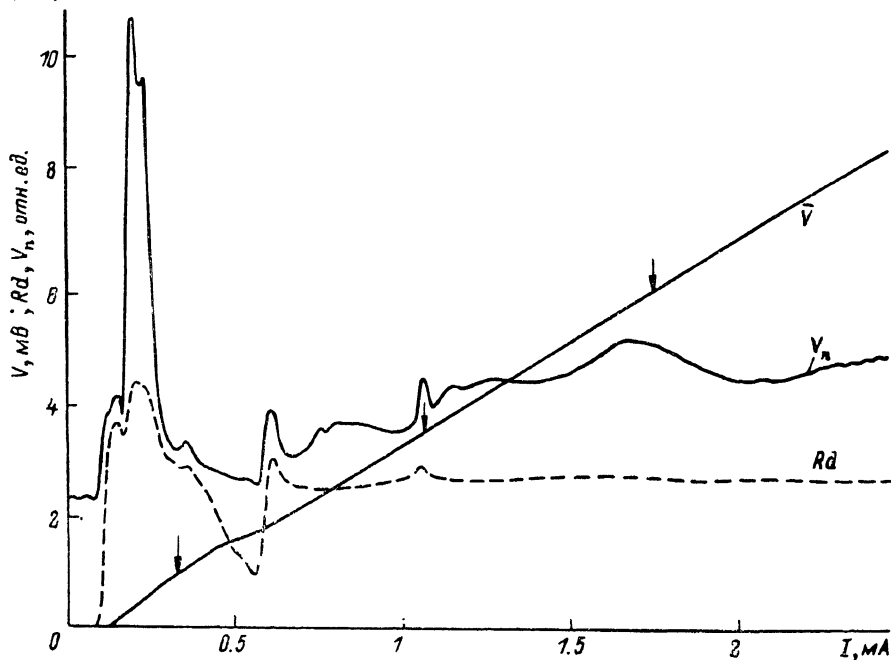


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика $V(I)$ и зависимости от тока дифференциального сопротивления R_d и шумового напряжения V_n перехода А1—010 при температуре $T=4.2$ К.

Стрелками на ВАХ обозначены значения напряжения смещения, при которых сняты спектры шумов.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального обнаружения квазигармонических составляющих НЧ шумов при высоких напряжениях смещения в тонкопленочных переходах с аморфной прослойкой [3], которые обладают свойствами, присущими структурам с непосредственной проводимостью. В предыдущей работе [4] исследования НЧ шумов проводились в области низких напряжений ($V \ll \Delta/e$), где явления, изученные в данной работе, отсутствуют.

Исследовались тонкопленочные переходы из ниобия с прослойкой из кремния толщиной $d=3-5$ нм, легированного ниобием до получения металлической проводимости [3]. Площади переходов составляли значения $S=1-0.2$ мкм². Измерялись вольт-амперные характеристики (ВАХ) переходов, зависимости от тока дифференциального сопротивления R_d и шумового напряжения V_n , а также спектр НЧ шумов при различных напряжениях смещения в диапазоне температур 2.1—20 К и магнитных полей 0—1 кэ. Для измерения зависимости $V_n(I)$ использовался охлаждаемый трансформатор (1 : 10) на аморфном пермаллое, малозумящий

широкополосный усилитель с входной полосой 0.5 Гц—100 кГц и RC -фильтр с постоянной времени 1 с на выходе [5]. Трансформатор помещался в сверхпроводящий экран и подключался к переходу через сопротивление, равное его нормальному сопротивлению R_N для задания постоянного смещения на переходе. Величина шума, приведенная к входу трансформатора для резистора 10 Ом, составляла $4 \cdot 10^{-10}$ В/Гц.

На рис. 1 приведены ВАХ и зависимости $R_d(I)$ и $V_n(I)$ для образца А1—010 при $T=4.2$ К. Видно, что ВАХ перехода при малых напряжениях ($V < 1$ мВ) имеет участок гиперболического роста тока в соответствии с резистивной моделью джозефсоновского перехода, ярко выраженную щелевую особенность при $V=V_g=2 \cdot \Delta/e=1.92$ мВ, по форме совпадающую с особенностями у туннельных переходов, и участок избыточного тока при $V > V_g$, характерный для сверхпроводящих структур с непосредственной проводимостью. На зависимости $R_d(I)$

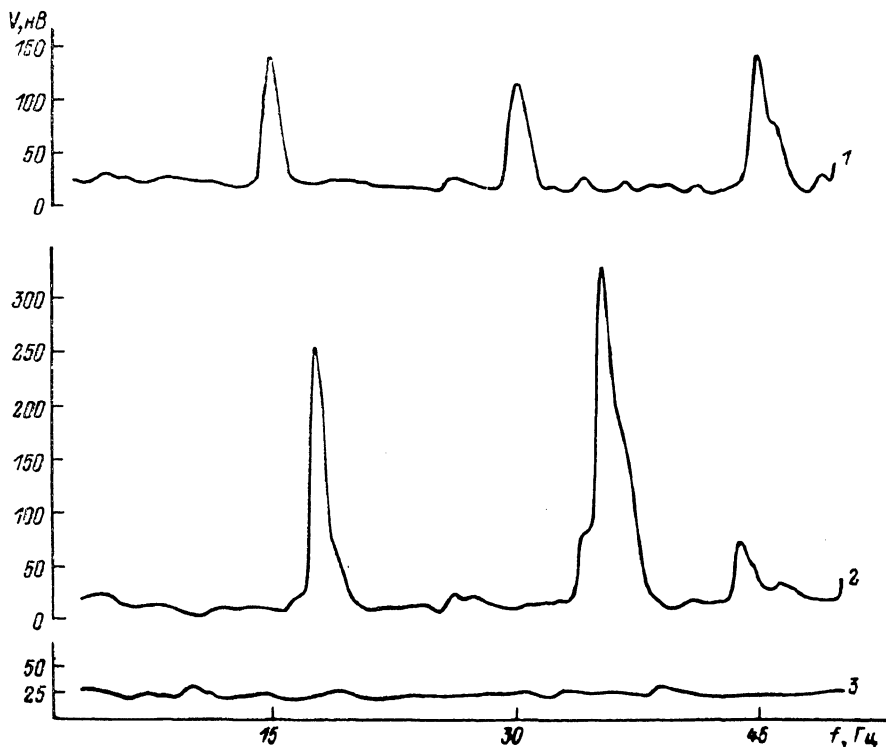


Рис. 2. Спектры низкочастотных шумов перехода А1—010 для различных значений напряжения смещения при $T=4.2$ К.

V , мВ: 1 — 6, 2 — 3.6, 3 — 1.

кроме перечисленных наблюдается особенность при $V=3.6$ мВ $> V_g$. Такая особенность не описывается в рамках известных моделей сверхпроводящих переходов, так же как и немонотонная (не связанная с изменением R_d) зависимость $V_n(I)$ в области еще больших напряжений. Отметим, что в области низких напряжений ($V < V_g$) V_n пропорционален R_d , что характерно для сверхпроводниковых переходов [4].

На рис. 2 показан спектр НЧ шумов в диапазоне 0.2—50 Гц для различных значений напряжения на переходе. Видно, что спектр шумов в этом частотном диапазоне содержит ряд квазигармонических составляющих при больших $V > V_g$. Временная зависимость $V_n(T)$ при $V=3.6$ мВ имеет вид регулярных импульсов с частотой следования 17 Гц. В отличие от результатов [1] частота повторения в нашем случае имеет регулярный характер, практически не зависит от температуры (при $T < 4.2$ К) и магнитного поля. Из рис. 2 видно, что частота также слабо зависит от напряжения при $V > V_g$.¹ Максимальное значение спектральной

¹ Измерения шумов переходов при напряжениях выше 10 мВ не проводились, поскольку при $V > 10$ мВ в переходах происходят необратимые изменения, вероятно, связанные с процессами электропереноса материала при высоких ($>10^5$ В/м) напряженностях поля. Такие «пробитые» переходы имели малое значение R_N .

плотности НЧ шума для перехода $A1-010$ составляет значение $0.36 \text{ мкВ}^2/\text{Гц}$ на частоте 17 Гц при $V=3.6 \text{ мВ}$. В области джоузефсоновских колебательных процессов ($V < V_g$) эти импульсы отсутствуют (рис. 2), хотя общий уровень V_n сравним, а для ряда переходов превышает V_n при высоких напряжениях (рис. 1).

В ряде теоретических работ [6-8] появление НЧ шумов в структурах с непосредственной проводимостью связывается с рассеивателями, имеющими дискретный энергетический спектр. Таким низкочастотным рассеивателем может быть, например, специальный класс дефектов, характерных для сильнонеупорядоченных систем, — двухуровневые системы (ДУС), которые существуют и в аморфных металлах. ДУС характеризуется энергией асимметрии двухямого потенциала E и энергией туннелирования ϵ , которая возникает из-за перекрытия волновых функций двух ям. Сечения рассеяния электрона для двух состояний ДУС различны, поэтому флуктуации чисел заполнения ДУС приводят к флуктуациям тока через переход и особенностям на ВАХ при неупругом рассеянии [7]. Возможно, что именно такого сорта особенности мы наблюдаем в эксперименте на зависимости $R_{il}(I)$ при $V=3.6 \text{ мВ}$ (рис. 1). Поскольку времена релаксации населенностей ДУС весьма ($\epsilon \ll E$) велики, то наблюдаемые флуктуации при неупругом рассеянии должны соответствовать области низких частот. В переходах малых размеров необходимо дополнительно учитывать квантовые интерференционные явления при выполнении следующих условий [7]:

$$p_f l \gg \hbar, \quad \hbar \cdot r_0 / l (p_f \cdot l) \gg 1, \quad (1)$$

где l — длина свободного пробега, $r_0 \sim d$ — характерный размер перехода.

В нашем случае для $l=2 \text{ нм}$, $v_f=10^7 \text{ см/с}$ условия (1) выполняются по порядку величины $p_f l / \hbar = 0.86$, $\hbar d / l (p_f l) = 2.9$. С увеличением напряжения выше $V > V_i = \hbar / t_f e$, (t_f — время пролета электронов через переход, $t_f = d^2 / D$, D — коэффициент диффузии) квантовые интерференционные явления возрастают [9]. Физически это связано с увеличением числа интервалов энергии (каждая eV_i) в V/V_i раз, где осуществляется эффективная интерференция волновых функций электронов. Для наших переходов $V_i=1.6 \text{ мВ}$ и, действительно, квазигармонические пики в спектре нч шумов превышают шум усилителя при $V > V_i$.

Отсутствие особенностей, характерных для мезоскопических образцов [9] на ВАХ перехода, представленного на рис. 1, вероятно, связано с наличием высоких потенциальных барьеров малой прозрачности $\bar{D}=10^{-1}$ на границе кремний—ниобий из-за различия фермиевских скоростей материалов. При уменьшении R_y , следовательно, и \bar{D}^{-1} из-за размытия границы раздела, например, при воздействии импульсов электромагнитного поля на зависимости $R_d(I)$ появляются осцилляции, характерные для мезоскопических явлений [9]. На шумовые характеристики наличие высоких потенциальных барьеров сказывается слабее, поэтому мы наблюдаем данные явления даже при $\bar{D} \ll 1$.

Существенной особенностью изученных явлений является их тесная связь с акустическими модами жидкого гелия, окружающего образец. При проведении эксперимента в парах гелия амплитуды квазигармонических пиков значительно уменьшаются.

Авторы благодарны А. Л. Гудкову, В. Н. Лаптеву, В. И. Махову за предоставленные образцы и М. Е. Гершензону, А. В. Зайцеву, К. Э. Нагаеву, Ш. М. Когану, В. И. Козубу за полезные обсуждения.

Список литературы

- [1] Rogers C. T., Buhrman R. A. // Phys. Rev. Lett. 1985. Vol. 55, N 8. P. 859—862.
- [2] Акименко А. И., Гудименко В. А., Янсон И. К., Веркин А. Б. // ФНТ. 1988. Т. 14. № 1. С. 107—110.
- [3] Гудков А. Л., Курпьянов М. Ю., Лихарев К. К. // ЖЭТФ. 1988. Т. 94. Вып. 7. С. 319—332.
- [4] Гудков А. Л., Куликов В. А., Лаптев В. Н. и др. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. Вып. 14. С. 1286—1290.
- [5] Овсянников Г. А., Проклов С. В. // ПТЭ. 1988. № 3. С. 127—129.
- [6] Афонин В. В., Гальперин Ю. М. // ЖЭТФ. 1987. Т. 92. Вып. 5. С. 1875—1885.
- [7] Козуб В. И. // ФТТ. 1984. Т. 26. Вып. 7. С. 1955—1963.
- [8] Коган Ш. М., Нагаев К. Э. // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10. Вып. 5. С. 313—316.
- [9] Ларкин А. И., Хмельницкий Д. Е. // ЖЭТФ. 1986. Т. 91. Вып. 5. С. 1815—1819.