

Д.М.Сергеев^{1,2}¹Военный институт Сил воздушной обороны, Актюбе;²Актюбинский региональный государственный университет им. К.Жубанова
(E-mail: serdau@rambler.ru)

Моделирование dI/dV -характеристик слабосвязанных сверхпроводников джозефсоновского типа в туннельном режиме

В работе с применением метода матрицы рассеяния моделированы вольтамперные, dI/dV -, d^2I/dV^2 -характеристики слабосвязанных сверхпроводников джозефсоновского типа в туннельном режиме. При расчете транспортных характеристик относительная прозрачность барьера перехода варьировался от 0,059 до 10^{-4} . Показано, что с уменьшением прозрачности барьера (с увеличением высоты барьера) переход основной вклад в ток вносят туннелирующие куперовские пары электронов (туннельный режим). Отмечено, что на вольтамперных и $dI(V)/dV$ -характеристиках сверхпроводящего перехода в туннельном режиме наблюдается резкий рост квазичастичного тока при щелевых напряжениях V_{g1} и V_{g2} , и этим значениям напряжения смещения соответствуют максимумы дифференциальной проводимости. Эти же изменения наблюдаются на d^2I/dV^2 -характеристиках; результаты моделирования удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Полученные результаты могут быть полезными для расчетов элементов сверхпроводниковой электроники.

Ключевые слова: джозефсоновский переход, эффект Джозефсона, вольтамперная характеристика, дифференциальная проводимость, туннельные спектры, туннельный режим.

Одной из актуальных задач современной физики конденсированного состояния является изучение квантовых эффектов в сверхпроводящих туннельных переходах и создание на их основе новых приборов и устройств. В последнее время на основе явления сверхпроводимости реализованы активные элементы сверхчувствительных приемных и передающих устройств — детекторов, смесителей, генераторов, параметрических усилителей, преобразователей частоты и т.д. [1–3], созданы переключатели и токоограничители [4–6], различные датчики и сенсоры магнитного поля, в том числе и для магнитокардиографии и магнитоэнцефалографии [7–9], эталон напряжения (стандарт вольта с точностью порядка 10^{-10}) [10], а также ядро квантового компьютера – кубиты (квантовые биты) [11–13]. Наиболее важной характеристикой джозефсоновских систем является их вольт-амперная характеристика (ВАХ), представляющая зависимость среднего напряжения на переходе от задаваемого через него тока. Исследование ВАХ слабосвязанных сверхпроводников джозефсоновского типа является мощным инструментом изучения физических процессов, определяющих токоперенос через такие контакты, так как ВАХ отражает внутреннюю динамику сверхпроводящих переходов. Также известно, что структуры с нелинейной ВАХ можно использовать для создания новых устройств, таких как мемристоры, переключатели и т.п. (рис. 1) [14]. Поэтому моделирование ВАХ слабосвязанных сверхпроводников джозефсоновского типа и ее производных, содержащих информацию об электрон-фононном взаимодействии, расширяет возможность применения таких контактов в перспективной сверхпроводниковой электронике.

ВАХ джозефсоновских контактов малой емкости, которой можно пренебречь, описывается выражением (1) и состоит из одной сверхпроводящей ($\bar{V} = 0$) и двух резистивных ($\bar{V} \neq 0$) ветвей [2]:

$$\frac{\bar{V}}{V_c} = \text{sign}(I) \left[\left(\frac{I}{I_c} \right)^2 - 1 \right]^{1/2}, \text{ при } |I| > I_c, \quad (1)$$

где \bar{V} — среднее напряжение на переходе; V_c , I_c — критические значения напряжения и тока. Однако подобные упрощенные модели не полностью описывают транспортные характеристики сверхпроводящих контактов из-за того, что не учтены квантовые эффекты (эффекты близости и андреевского отражения). Например, с уменьшением коэффициента прозрачности (с увеличением высоты барьера) вклад андреевского отражения уменьшается. В работе [15] нами произведен расчет ВАХ сверхпроводящего туннельного перехода на основе матрицы рассеяния при относительной высоте

барьера $h_b = 3$. В данной работе показаны результаты численного моделирования dI/dV-характеристик слабосвязанных сверхпроводников в туннельном режиме (с низкой прозрачностью барьера) с применением матрицы рассеяния.

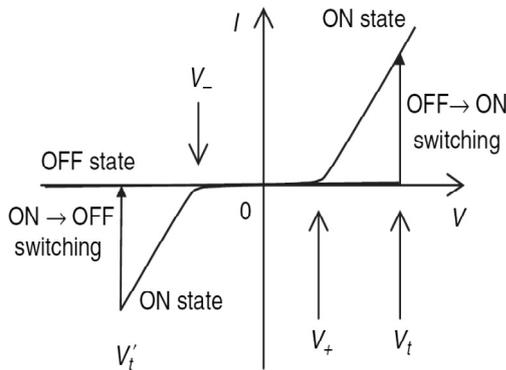


Рисунок 1. ВАХ по постоянному току двух-терминального переключающего устройства [14]

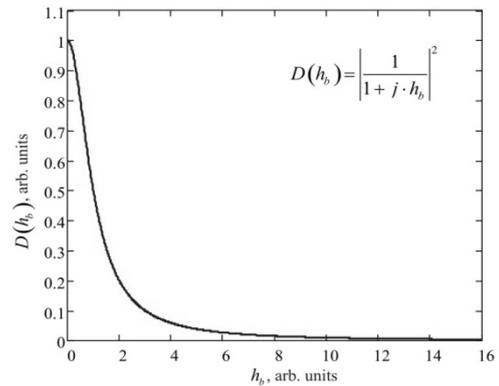


Рисунок 2. Зависимость прозрачности барьера от его высоты

Для определения относительной прозрачности барьера использовали следующее классическое выражение:

$$D(h_b) = |T|^2 = \left| \frac{1}{1 + j \cdot h_b} \right|^2, \quad (2)$$

где j — мнимая единица; h_b — высота барьера (рис. 2). Из рисунка 2 (и из выражения (2)) видно, что с увеличением высоты барьера h_b прозрачность уменьшается, а с уменьшением прозрачности единственным доминирующим механизмом перехода квазичастиц из одного сверхпроводящего берега в другой является туннельный механизм. Поэтому для анализа туннельных характеристик слабосвязанных сверхпроводников джозефсоновского типа (и при расчете ВАХ) значение относительной прозрачности барьера (2) варьировалось от 0,059 до 10^{-4} (высота барьера $h_b = 4 \div 100$, соответственно).

В работе [16] в рамках теории многократных андреевских отражений (MAR — multiple Andreev reflections) [17] была моделирована динамическая проводимость баллистических SNS-контактов (S — сверхпроводник, N — нормальный металл) на основе сверхпроводников со слабоосциллирующим параметром порядка в диапазоне энергии 60–100 meV в режиме высокой прозрачности. При этом для расчета ВАХ коэффициент прозрачности (2) варьировался от 90% до 98% (или высоты барьера — $0,33 \div 0,144$). Отмечаем, что в режиме низкой прозрачности происходит максимальная изоляция сверхпроводящих берегов и вероятность проявления эффекта MAR мала. При таком случае основной транспорт квазичастиц осуществляется туннелированием через барьер. При заданном режиме низкой прозрачности $0,059 \div 10^{-4}$ с помощью теории MAR в таком случае можно качественно моделировать транспортные характеристики сверхпроводящих туннельных SIS-контактов (I — диэлектрик). В теории MAR транспорт электроноподобных и дырочноподобных квазичастиц определяется матрицей рассеяния [17]:

$$S = \begin{pmatrix} r & t \\ t' & r' \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где $t' = t^T$, $r' = -(t^*)^{-1} r^\dagger t$, $tt^\dagger + rr^\dagger = 1$. Матрица рассеяния дырочноподобных квазичастиц есть комплексно-сопряженная величина матрицы рассеяния электроноподобных квазичастиц. Далее определяются волновые функции электроноподобных и дырочноподобных квазичастиц для правого и левого сверхпроводящего берега. Зависимость тока от напряжения определяется по следующей формуле:

$$I(t) = \sum_k I_k \exp(i2keVt/\hbar), \quad (4)$$

где $I_k = \frac{e}{\pi\hbar} \left[eV\delta_{k0} - \int d\varepsilon \tanh\left\{\frac{\varepsilon}{2T}\right\} \left(J(\varepsilon)(a_{2k}A_k^* + a_{-2k}A_{-k}) \right) + \sum_n (1 + a_{2k}a_{2(n+k)}^*) (A_n A_{n+k}^* - B_n B_{n+k}^*) \right]$; \hbar — приведенная постоянная Планка; e — заряд электрона; V — напряжение; ε — энергия квазичастицы; $J = \sqrt{1-|a|^2}$; a — коэффициент андреевского отражения; A — амплитуда вероятности андреевски отраженных квазичастиц; B — амплитуда вероятности нормально отраженных квазичастиц.

Программа для вычисления транспортных характеристик разработана в среде Wolfram Mathematica 9 на основе рассмотренных выше формул (2–4). Для определения туннельных характеристик в виде дифференциальной проводимости использовался математический пакет Mathcad 14. Дифференцирование осуществлялось путем импортирования данных численного расчета транспортных характеристик, произведенные в программе Mathematica, в программу Mathcad с использованием оператора READPRN. Результаты моделирования туннельных характеристик слабосвязанных сверхпроводников с низкой прозрачностью барьера (ВАХ, дифференциальная проводимость, вторая производная тока) приведены на рисунках 3, 4, 7, 10, 11.

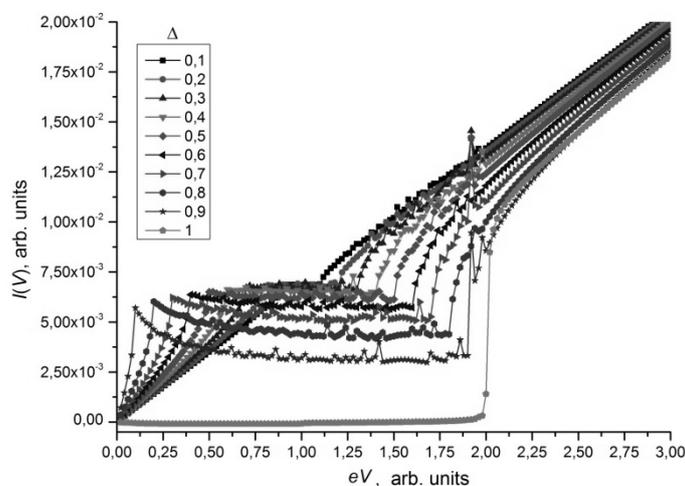


Рисунок 3. Эволюция ВАХ джозефсоновского перехода с прозрачностью барьера $D = 6.897 \cdot 10^{-3}$ при различных значениях параметра порядка ($\Delta = 0,1 \div 1$ усл. ед.)

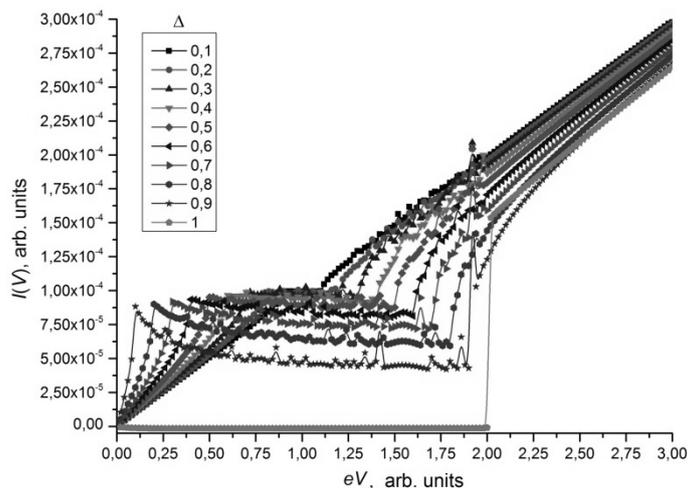


Рисунок 4. Эволюция ВАХ джозефсоновского перехода с прозрачностью барьера $D = 10^{-4}$ при различных значениях параметра порядка ($\Delta = 0,1 \div 1$ усл. ед.)

На ВАХ идеальных сверхпроводящих туннельных переходов SIS-типа при достижении значения приложенного напряжения щелевому значению $V = V_g = \frac{2\Delta}{e}$ наблюдается «обнуление тока», т.е.

$I(V_g) = 0$. В нашем случае при прозрачности барьера $D = 6,9 \cdot 10^{-3}$ ($h_b = 12$) значение щелевого напряжения составляет $eV_g = 2$ усл. ед., $I(eV_g) = 0,4 \cdot 10^{-3}$ усл. ед. (рис. 3), а при $D = 10^{-4}$ ($h_b = 100$) наблюдаем ВАХ идеальных сверхпроводящих туннельных переходов, т.е. нулевую зависимость тока от щелевого напряжения $I(V_g) = 0$ (рис. 4). При уменьшении величины сверхпроводящего параметра порядка Δ от 0,9 до 0,1 обнуления тока в диапазоне $0 < eV < 2$ не наблюдается, и форма ВАХ перехода с уменьшением параметра порядка приближается к линейной омической зависимости $I(V) = V/R$, а при $\Delta = 0$ величина тока определяется по закону Ома. Это связано с понижением концентрации сверхпроводящих электронов (куперовских пар) в рассматриваемой системе. Согласно двухжидкостной модели Гортера-Казимира электронная жидкость в сверхпроводящем состоянии представляется в виде суммы нормального и сверхпроводящего компонентов:

$$n = n_s + n_n, \quad (5)$$

где n_s , n_n — концентрация сверхпроводящих и нормальных электронов. Плотность нормальных квазичастиц n_n в сверхпроводнике повышается из-за избыточных квазичастиц, которые рождаются при разрушении куперовских пар, например, с повышением температуры или интенсивности магнитного поля и т.д., приводящие к уменьшению энергетической щели Δ .

Результаты численного моделирования ВАХ хорошо согласуются с результатами экспериментальной работы [3], где измерена ВАХ слоистой сверхпроводящей структуры Nb/AlO_x/Nb с щелевым напряжением $V_g \approx 2,6$ мВ, где ниобиевые сверхпроводящие берега разделены диэлектрическим слоем AlO_x (рис. 5). В [18] экспериментально определены ВАХ туннельного перехода (SIS) на основе Sn при температуре 1,5 К, а также показано влияние сверхвысокочастотного (СВЧ) сигнала на форму ВАХ (рис. 6). Как видно, с увеличением мощности СВЧ излучения наблюдается выпрямление ВАХ из-за уменьшения величины сверхпроводящей щели Δ , также на ВАХ появляются резонансные ступеньки, связанные с нестационарным эффектом Джозефсона. Результаты сопоставления показывают, что ВАХ сверхпроводящих туннельных структур удовлетворительно описываются в рамках рассматриваемой модели.

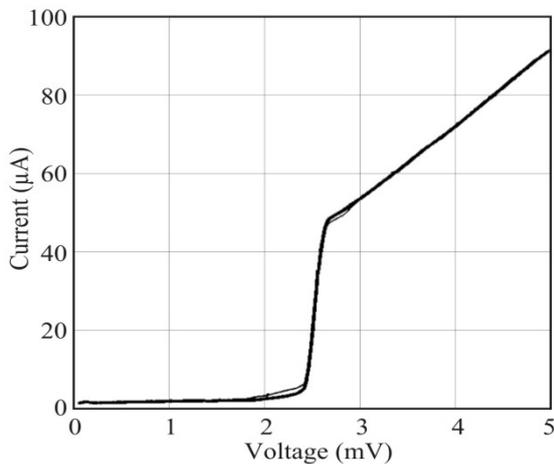


Рисунок 5. ВАХ перехода на основе слоистой структуры Nb/AlO_x/Nb [3]

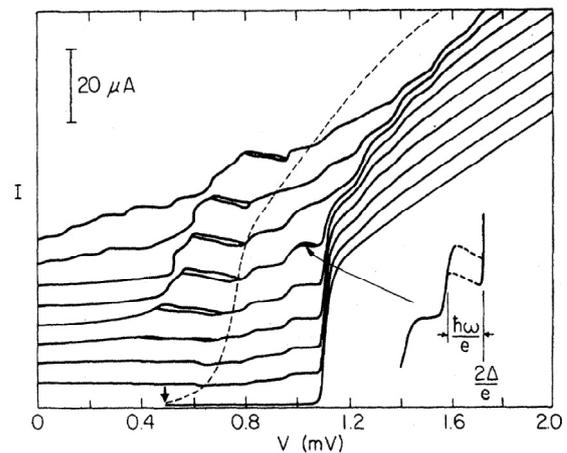


Рисунок 6. ВАХ SIS перехода на основе Sn при температуре 1,5 К [18]

На рисунке 7 приведены результаты расчета туннельных спектров (dI/dV -спектров) слабосвязанных сверхпроводников при $\Delta = 1$ усл. ед. и различных значениях прозрачности барьера. Как видно, с увеличением D (уменьшением h_b) увеличивается амплитуда пиков дифференциальной проводимости при щелевом смещении $V_g = \frac{2\Delta}{e}$. Спектры наблюдаются при значениях щелевого напряжения -1 и 1 , что соответствует значению энергетической щели, а интервал между значениями напряжения

с высокой точностью определяет величину параметра порядка. С уменьшением прозрачности на туннельных спектрах близи $V=1$ и $V=-1$ появляются осцилляции дифференциальной проводимости (рис. 7 а, б). При прозрачности барьера $D = 0,027$ и $D = 0,059$ при нулевом напряжении наблюдается дополнительный пик (рис. 7 в, г). В экспериментальной работе [19] на туннельных спектрах переходов низкотемпературных сверхпроводников Nb_3Sn , полученных методом break junction, отчетливо наблюдаются такие дополнительные пики при нулевом напряжении (рис. 8).

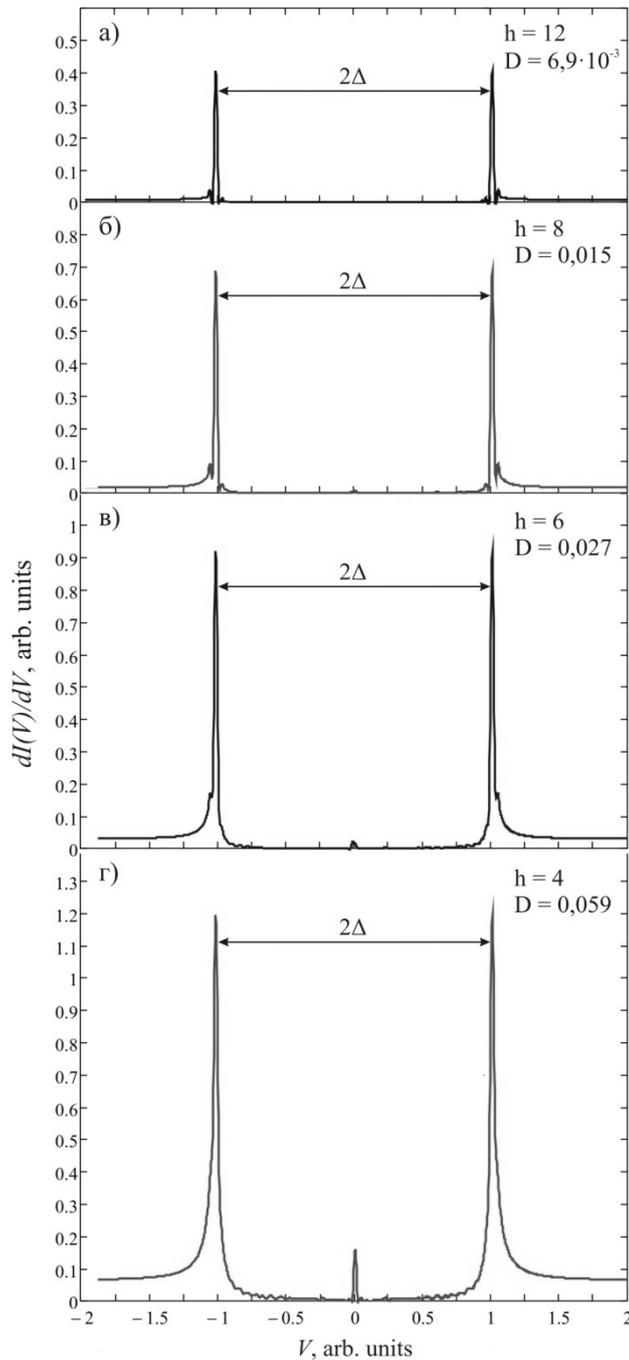
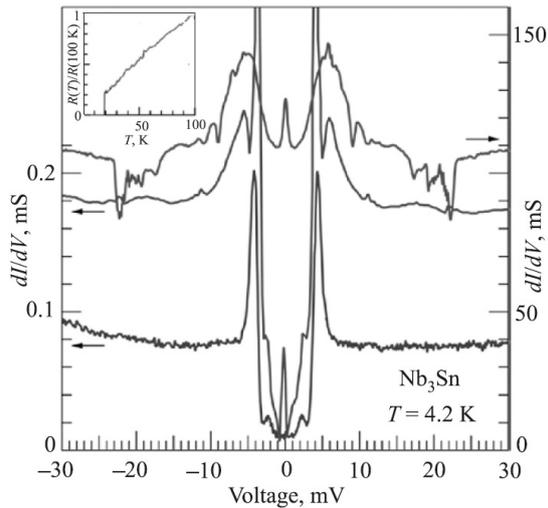
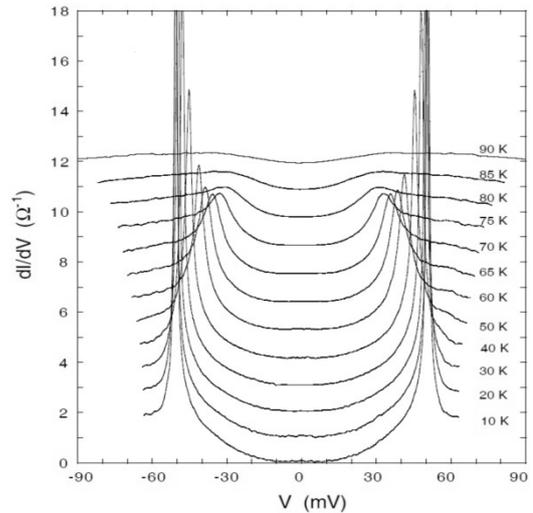


Рисунок 7. dI/dV -спектры слабосвязанных сверхпроводников джозефсоновского типа при различных значениях прозрачности барьера ($\Delta = 1$): а) $D = 6,9 \cdot 10^{-3}$; б) $D = 0,015$; в) $D = 0,027$; г) $D = 0,059$

Следует отметить, что особенности dI/dV -спектров при нулевом напряжении не проявляются в туннельных спектрах передопированных высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) типа $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ (рис. 9) [20].


 Рисунок 8. Туннельные спектры Nb_3Sn [19]

 Рисунок 9. Туннельные спектры передопированного ВТСП $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ [20]

Результаты расчета dI/dV -характеристик сверхпроводящего перехода в туннельном режиме (с прозрачностью барьера $D = 10^{-4}$) при $\Delta = 0,6$ и $\Delta = 0,8$ приведены на рисунке 10 а, б. Как видно, в случае $\Delta = 0,6$ наблюдается резкий рост квазичастичного тока при $eV_{g1} \approx 0,4$ и $eV_{g2} \approx 1,6$, и этим значениям щелевого напряжения соответствуют максимумы дифференциальной проводимости (рис. 10 а). В случае $\Delta = 0,8$ также наблюдается характерный рост квазичастичного тока при напряжениях смещения $eV_{g1} \approx 0,2$ и $eV_{g2} \approx 1,8$ (рис. 10 б). Однако по сравнению с dI/dV -характеристиками для случая $\Delta = 1$ (рис. 7) при $\Delta < 1$ в интервале напряжении $eV_{g1} < eV < 2$ появляются осцилляции дифференциальной проводимости, а при $eV_{g2} < eV < 2$ усиливаются (рис. 10 а, б).

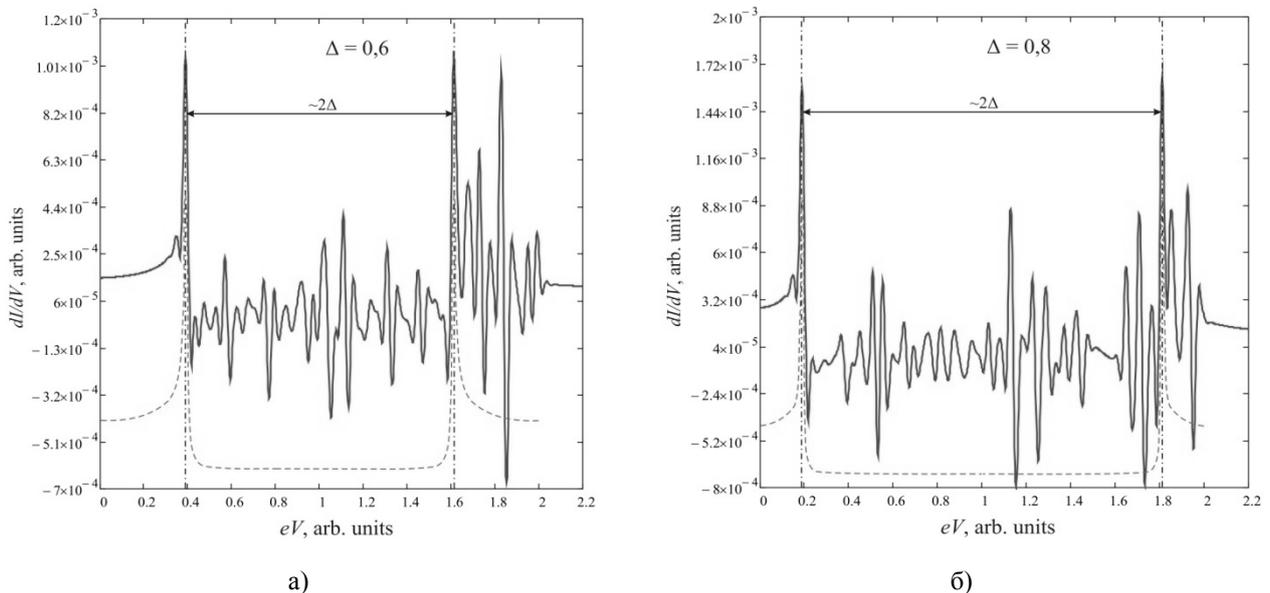


Рисунок 10. Дифференциальная проводимость джозефсоновского перехода с прозрачностью барьера $D = 10^{-4}$ при $\Delta = 0,6$ (а) и $\Delta = 0,8$ (б): сплошная кривая — результаты моделирования, пунктирная — dI/dV идеального перехода (для удобства сравнения идеальные спектры сдвинуты по оси дифференциальной проводимости)

Отметим, что осцилляции, возникающие при $\Delta < 1$, в интервале напряжении $eV_{g1} < eV < eV_{g2}$ при усреднении сглаживаются. Усиление осцилляции дифференциальной проводимости хорошо вы-

ражается на dI^2/dV^2 -характеристиках (рис. 11 а, б). Как видно, с помощью dI^2/dV^2 -характеристик также можно оценить значение сверхпроводящей щели.

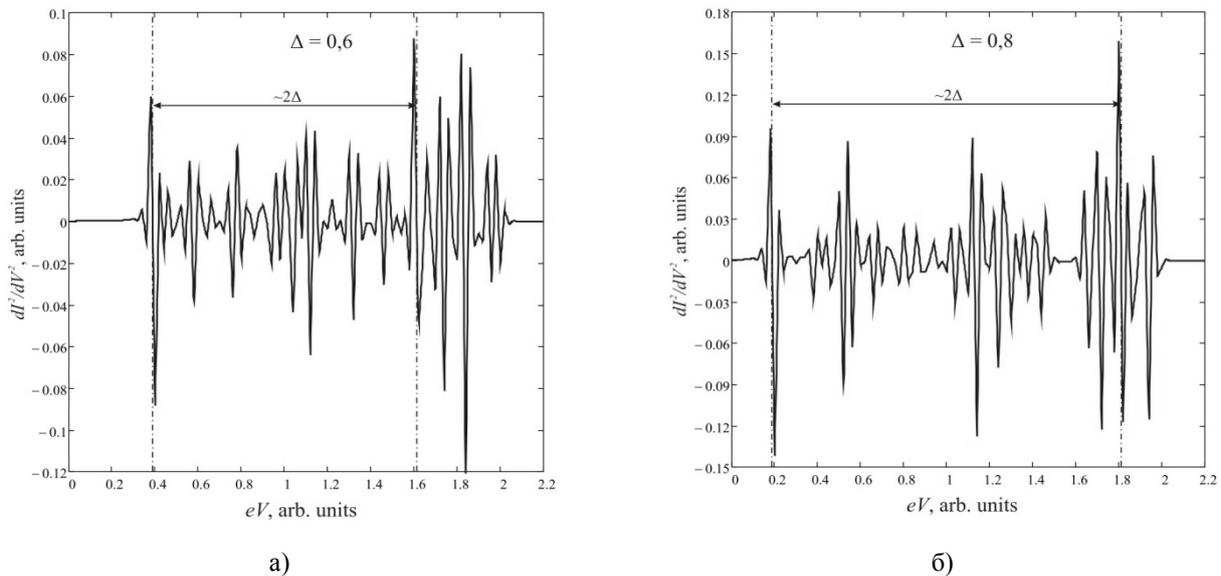


Рисунок 11. Вторая производная тока d^2I/dV^2 джозефсоновского перехода с прозрачностью барьера $D = 10^{-4}$ при $\Delta = 0,6$ (а) и $\Delta = 0,8$ (б)

Таким образом, в данной работе модельно исследованы вольтамперные, dI/dV - и d^2I/dV^2 - характеристики слабосвязанных сверхпроводников джозефсоновского типа в туннельном режиме (с низкой прозрачностью барьера от 0,059 до 10^{-4}). Показано, что с уменьшением прозрачности барьера перехода основной вклад в ток вносит туннелирующие куперовские пары электронов, т.е. переход «работает» в туннельном режиме. Рассчитаны ВАХ джозефсоновского перехода с низкой прозрачностью барьера при различных значениях параметра порядка $\Delta = 0,1 \div 1$ усл. ед. Приведены dI/dV - и d^2I/dV^2 - характеристики слабосвязанных сверхпроводников джозефсоновского типа в туннельном режиме при различных значениях сверхпроводящей щели. Результаты моделирования сопоставлены с экспериментальными данными и удовлетворительно согласуются. Полученные результаты могут быть полезными для расчетов элементов и устройств сверхпроводниковой электроники.

Список литературы

- 1 Tucker J.R., Feldman M.J. Quantum detection at millimeter wavelengths // Rev. Mod. Phys. — 1985. — Vol. 57. — No. 4. — P. 1055–1113 (на англ.).
- 2 Лухарев К.К. Введение в динамику джозефсоновских переходов. — М.: Наука, 1985. — 320 с.
- 3 Karpov A., Blondel J., Dmitriev P., Koshelets V. A Broad Band Low Noise SIS Radiometer // IEEE Trans. on Appl. Supercond. — 1999. — Vol. 9. — No 2. — P. 4225–4228.
- 4 Овчинников С.Г., Курко В.И., Мамалис А.Г., Петров М.И., Иванов В.В., Балаев Д.А., Гохфельд Д.М., Харламова С.А., Милицын С.В., Шайхутдинов К.А. Новая концепция переключателя тока на основе высокотемпературного сверхпроводника // Журнал техн. физики. — 2001. — Т. 71. — Вып. 10. — С. 95–98.
- 5 Martini L., Arcos I., Bocchi M., Brambilla R., Dalessandro R., Frigerio A., Rossi V. Resistive Fault Current Limiter Prototypes: Mechanical and Electrical Analyses // J. of Phys.: Conf. Ser. — 2006. — Vol. 43. — P. 925.
- 6 Dalessandro R.B., Bocchi, M., Rossi, V., Martini L.F. Test Results on 500 kVA-Class MgB₂-Based Fault Current Limiter Prototypes // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. — 2007. — Vol. 17. — P. 1776.
- 7 Faley M.I., Poppe U., Dunin Borkowski R.E., Schiek M., Boers F., Chocholacs H., Dammers J., Eich E., Shah N.J., Ermakov A.B., Slobodchikov V.Yu., Maslennikov Yu.V., Koshelets V.P. Magnetoencephalography using a Multilayer hightc DC SQUID Magnetometer // Physics Procedia. — 2012. — Vol. 36. — P. 66–71 (на англ.).
- 8 Volkov I., Chukharkin M., Snigirev O., Volkov A., Moskvina M., Gudoshnikov S., Kerimov A. HTS SQUID Microscopy for Measuring the Magnetization Relaxation of Magnetic Nanoparticles // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. — 2005. — Vol. 15. — No. 3. — P. 3874–3878.
- 9 Volkov I., Gudoshnikov S., Usov N., Volkov A., Moskvina M., Maresov A., Snigirev O., Tanaka S. SQUID-Measurements of Relaxation Time of Fe₃O₄ Superparamagnetic Nanoparticle Ensembles // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. — 2006. — Vol. 300. — P. e294–e297.

- 10 Barone A., Paterno G. Physics and Applications of the Josephson Effect. — New York: Wiley & Sons, 1982. — 639 p.
- 11 Macha P., Oelsner G., Reiner J.M., Marthaler M., Andre S., Schon G., Hubner U., Meyer H.G., Il'ichev E., Ustinov A.V. Implementation of a quantum metamaterial using superconducting qubits // Nature Communications. — 2014. — Vol. 5. — P. 5146 (на англ.).
- 12 Fedorov K.G., Shcherbakova A.V., Schafer R., Ustinov A.V. Josephson vortex coupled to a flux qubit // Appl. Phys. Lett. — 2013. — Vol. 102. — P. 132602.
- 13 Shevchenko S.N., Omelyanchouk A.N., Il'ichev E. Multiphoton transitions in Josephson-junction qubits // Low Temperature Physics/Fizika Nizkikh Temperatur. — 2012. — Vol. 38. — No. 4. — P. 360–381.
- 14 Likharev K.K. Hybrid CMOS/Nanoelectronic Circuits: Opportunities and Challenges // Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics. — 2008. — Vol. 3. — P. 203–230.
- 15 Сергеев Д.М., Балмухан И.Н. О расчете вольтамперной характеристики сверхпроводящего туннельного перехода на основе матрицы рассеяния при относительной высоте барьера $h_b = 3$ // Вестн. Караганд. ун-та. Сер. Физика. — 2015. — No. 4 (80). — С. 12–18.
- 16 Сергеев Д.М., Кузьмичев С.А., Аймаганбетова З.К., Шункеев К.Ш. Моделирование динамической проводимости баллистических контактов на основе сверхпроводников со слабоосциллирующим параметром порядка в диапазоне энергии 60–100 meV в режиме высокой прозрачности // Известия НАН РК. Серия физ.-мат. — 2015. — Vol. 2. — No. 300. — С. 116–123.
- 17 Averin D., Bardas A. ac Josephson Effect in Single Quantum Channel // Phys. Rev. Lett. — 1995. — Vol. 75. — P. 1831–1834.
- 18 McGrath W.R., Richards P.L., Smith A.D., van Kempen H., Batchelor R.A., Prober D.E., Santhanam P. Large gain, negative resistance, and oscillations in superconducting quasiparticle heterodyne mixers // Appl. Phys. Lett. — 1981. — Vol. 39. — P. 655–658.
- 19 Ekino T., Sugimoto A., Yuta S., Gabovich A.M., Akimitsu J. Tunneling spectra of break junctions involving Nb_3Sn // Low Temperature Physics/Fizika Nizkikh Temperatur. — 2014. — Vol. 40. — No. 10. — P. 1182–1186.
- 20 Suzuki M., Watanabe T., Matsuda A. Interlayer Tunneling Spectroscopy for Slightly Overdoped $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ // Phys. Rev. Lett. — 1999. — Vol. 82. — No 26. — P. 5361–5364.

Д.М.Сергеев

Туннельдік режимде джозефсон типті әлсіз байланысқан асқын өткізгіштердің dI/dV -сипаттамасын модельдеу

Мақалада шашырау матрицасы әдісін қолдану арқылы туннельдік режимде Джозефсон типті әлсіз байланысқан асқын өткізгіштердің вольтамперлік, dI/dV -, d^2I/dV^2 -сипаттамалары модельденген. Транспорттық сипаттамаларды есептеуде ауысым барьерінің салыстырмалы мөлдірлігі 0,059-дан 10-4-не дейінгі мәндерді қабылдады. Ауысым барьері мөлдірлігінің мәні азаюымен (барьер биіктігінің мәні өсуімен) токтың негізгі үлесін туннельденген купер электрондарының жұптары құрайтындығы (туннельдік режим) көрсетілген. Туннельдік режимде асқын өткізгіштік ауысымның вольтамперлік және $dI(V)/dV$ -сипаттамаларында саңылаулық кернеу V_{g1} және V_{g2} болғанда квазибөлшектік токтың күрт өсетіндігі байқалады, бұл кернеу мәндеріне дифференциалдық өткізгіштіктің максимумдары сәйкес келеді. Мұндай өзгерістер d^2I/dV^2 -сипаттамаларында көрініс табады. Модельдеу нәтижелері эксперименталды мәліметтермен қанағаттанарлық үйлеседі. Алынған нәтижелер асқын өткізгіштік электроникасының элементтерін есептеуге пайдалы болуы мүмкін.

D.M.Sergeyev

Modeling of dI/dV -characteristics of weakly coupled superconductors of Josephson type in tunnel regime

With the scattering matrix method in the work were modeled current-voltage, dI/dV -, d^2I/dV^2 -characteristics of weakly coupled superconductors of Josephson type in tunnel regime. At the calculation of the transport characteristics the relative transparency of the transition barrier ranged from 0,059 to 10-4. It is shown that with a decrease in the transparency of the barrier (with increasing of barrier height) the main contribution to the current brings tunneling Cooper pairs of electrons (tunnel regime). On the current-voltage and $dI(V)/dV$ -characteristics of the superconducting junction in tunnel regime there is a sharp increase in the quasiparticle current at gap voltages V_{g1} , V_{g2} , and the values of the bias voltage maxima correspond to the differential conductivity. These changes are observed on the d^2I/dV^2 -characteristics. The modeling results are in good agreement with the experimental data. The results may be useful for calculating the elements of superconducting electronics.

References

- 1 Tucker J.R., Feldman M.J. *Rev. Mod. Phys.*, 1985, 57, 4, p. 1055–1113.
- 2 Likharev K.K. *Dynamics of Josephson Junctions and Circuits*, Moscow: Nauka, 1985, 320 p.
- 3 Karpov A., Blondel J., Dmitriev P., Koshelets V. *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, 1999, 9, 2, p. 4225–4228.
- 4 Ovchinnikov S.G., Kirko V.I., Mamalis A.G., Petrov M.I., Ivanov V.V., Balaev D.A., Gohfel'd D.M., Kharlamova S.A., Militysin S.V., Shayhutdinov K.A. *Journal of technical physics*, 2001, 71, 10, p. 95–98.
- 5 Martini L., Arcos I., Bocchi M., Brambilla R., Dalessandro R., Frigerio A., Rossi V. *J. of Phys.: Conf. Ser.*, 2006, 43, p. 925.
- 6 Dalessandro R.B., Bocchi, M., Rossi, V., Martini L.F. *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, 2007, 17, p. 1776.
- 7 Faley M.I., Poppe U., Dunin Borkowski R.E., Schiek M., Boers F., Chocholacs H., Dammers J., Eich E., Shah N.J., Ermakov A.B., Slobodchikov V.Yu., Maslennikov Yu.V., Koshelets V.P. *Physics Procedia*, 2012, 36, p. 66–71.
- 8 Volkov I., Chukharkin M., Snigirev O., Volkov A., Moskvina M., Gudoshnikov S., Kerimov A. *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, 2005, 15, 3, p. 3874–3878.
- 9 Volkov I., Gudoshnikov S., Usov N., Volkov A., Moskvina M., Maresov A., Snigirev O., Tanaka S. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2006, 300, p. e294–e297.
- 10 Barone A., Paterno G. *Physics and Applications of the Josephson Effect*, New York: Wiley & Sons, 1982, 639 p.
- 11 Macha P., Oelsner G., Reiner J.M., Marthaler M., Andre S., Schon G., Hubner U., Meyer H.G., Il'ichev E., Ustinov A.V. *Nature Communications*, 2014, 5, p. 5146.
- 12 Fedorov K.G., Shcherbakova A.V., Schafer R., Ustinov A.V. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, 102, p. 132602.
- 13 Shevchenko S.N., Omelyanchouk A.N., Il'ichev E. *Low Temperature Physics/Fizika Nizkikh Temperatur*, 2012, 38, 4, p. 360–381.
- 14 Likharev K.K. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, 2008, 3, p. 203–230.
- 15 Sergeyev D.M., Balmukhan I.N. *Vestnik KarGU. Seriya Fizika*, 2015, 4 (80), p. 12–18.
- 16 Sergeyev D.M., Kuzmichev S.A., Aimaganbetova Z.K., Shunkeyev K.Sh. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Physico-Mathematical Series*, 2015, 2, 300, p. 116-123.
- 17 Averin D., Bardas A. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, 75, p. 1831–1834.
- 18 McGrath W.R., Richards P.L., Smith A.D., van Kempen H., Batchelor R.A., Prober D.E., Santhanam P. *Appl. Phys. Lett.*, 1981, 39, p. 655–658.
- 19 Ekino T., Sugimoto A., Yuta S., Gabovich A.M., Akimitsu J. *Low Temperature Physics/Fizika Nizkikh Temperatur*, 2014, 40, 10, p. 1182–1186.
- 20 Suzuki M., Watanabe T., Matsuda A. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, 82, 26, p. 5361–5364.