

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES

ISSN 1991-346X

Volume 2, Number 300 (2015), 116 – 123

**MODELING OF THE DYNAMIC CONDUCTIVITY
OF SUPERCONDUCTOR-BASED BALLISTIC CONTACT
WITH WEAK OSCILLATED ORDER PARAMETER
IN THE ENERGY RANGE 60-100 meV IN HIGH TRANSPARENCY MODE**

D. M. Sergeyev¹, S. A. Kuzmichev², Z. K. Aimagambetova³, K. Sh. Shunkeyev⁴

¹Military Institute of Air Defence Forces, Aktobe, Kazakhstan,

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia,

³Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan,

⁴Zhubanov Aktobe Regional State University, Aktobe, Kazakhstan.

E-mail: serdau@rambler.ru

Key words: superconductivity, multiple Andreev reflection, dynamic conductivity, current-voltage characteristic, ballistic contact, transparency of the barrier.

Abstract. In the frame of the Averin-Bardas model current-voltage characteristics and the dynamic conductivities of the ballistic contacts superconductor - normal metal - superconductor (SNS) for the case of high transparency (0,9-0,98) are calculated, where the energy gap of superconducting materials, which are the components of the contact, has oscillation character in energy range 60-100 meV due to the strong electron-phonon interaction. The features of the Andreev spectra at voltages $V_4 = 2\Delta/4e$, $V_5 = 2\Delta/5e$ were determined as transforming to maxima minima at the increase in the transmission coefficient of the SNS-contact from 90% to 98% (or at the decrease in the barrier height from 0,33 to 0,144). The obtained results are correlated satisfactorily with the experimental data.

УДК 538.945; 621.315.55

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ
БАЛЛИСТИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ НА ОСНОВЕ
СВЕРХПРОВОДНИКОВ СО СЛАБОУОСЦИЛЛИРУЮЩИМ
ПАРАМЕТРОМ ПОРЯДКА В ДИАПАЗОНЕ ЭНЕРГИИ 60-100 meV
В РЕЖИМЕ ВЫСОКОЙ ПРОЗРАЧНОСТИ**

Д. М. Сергеев¹, С. А. Кузьмичев², З. К. Аймаганбетова³, К. Ш. Шункеев⁴

¹Военный институт Сил воздушной обороны, Актобе, Казахстан,

²Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия,

³Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан,

⁴Актюбинский региональный государственный университет им. К. Жубанова, Актобе, Казахстан

Ключевые слова: сверхпроводимость, многократное андреевское отражение, динамическая проводимость, вольтамперная характеристика, баллистический контакт, прозрачность барьера.

Аннотация. В рамках модели Аверина-Бардаса рассчитаны вольтамперные характеристики и динамические проводимости баллистических контактов сверхпроводник - нормальный металл - сверхпроводник (SNS) для случая высокой прозрачности (0,9-0,98), где энергетическая щель сверхпроводящих материалов, составляющие контакт, носит осциллирующий характер в диапазоне энергии 60-100 meV из-за сильного

электрон-фононного взаимодействия. Выявлены особенности андреевских спектров при напряжениях $V_4 = 2\Delta/4e$, $V_5 = 2\Delta/5e$ в виде трансформирующихся минимумов в максимумы при увеличении коэффициента прозрачности от 90% до 98% (или уменьшении высоты барьера от 0,33 до 0,144) SNS-контакта. Полученные результаты удовлетворительно коррелируются с экспериментальными данными.

Известно, что купратные и железные высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) представляют собой квазидвумерные сильноанизотропные слоистые структуры, состоящие из стопок сверхпроводящих слоев оксида меди CuO [1-3] и арсенида железа FeAs [4-6], чередующихся в *c*-направлении со спейсерами (несверхпроводящие слои). В подобных слоистых ВТСП за счет образования джозефсоновской среды с участием сверхпроводящих и несверхпроводящих (диэлектрик, нормальный металл) блоков наблюдается так называемый внутренний эффект Джозефсона [7, 8]. Поэтому исследование характеристик джозефсоновских слабых связей ВТСП дает возможность определить некоторые энергетические параметры ВТСП, например, значение параметра порядка (энергетической щели) сверхпроводника [9].

Обычно для описания основных электрических характеристик сверхпроводящих структур, состоящих из комбинации сверхпроводников (S) с нормальными металлами (N), экспериментаторы часто используют резистивно-шунтированную модель (RSJ-model) [10-12], либо ее различные модификации [13, 14] из-за простоты математического аппарата, так как существующие микроскопические теории для рассматриваемых сверхпроводящих структур редко используются в связи с их сложностью [15]. В RSJ-модели для описания характеристик SIS-контакта (S – сверхпроводник, I – диэлектрик) учитывается емкостной канал, а для SNS-контакта (N – нормальный металл) емкостной канал не учитывается. Однако RSJ-модель всего лишь представляет эквивалентный электрический контур с джозефсоновским элементом и не объясняет многих физических (особенно, квантовых) свойств джозефсоновских переходов с непосредственной проводимостью – SNS-контактов, например, появление субгармонической щелевой структуры (СГС) на динамической проводимости (см. напр. [16]).

Основным микроскопическим механизмом, определяющим транспортные характеристики SNS-контактов, является андреевское отражение [17]: на SN-границе электроноподобная квазичастица N-слоя, энергия которой меньше параметра порядка S-области, отражается в виде дырочноподобной квазичастицы, при этом в S-область переходит куперовская пара. При андреевском отражении квазимпульс электроноподобной квазичастицы практически не меняется, а групповая скорость меняет знак на обратный [17]. В SNS-контактах перенос куперовских пар через потенциальный барьер между двумя сверхпроводниками происходит благодаря когерентному процессу многократных андреевских отражений (MAR – multiple Andreev reflections) [18]. Эффект многократных андреевских отражений хорошо объясняет проявление СГС, составляющей для баллистических контактов высокой прозрачности серию минимумов на $\frac{dI(V)}{dV}$ -спектрах при

напряжениях $V_n = \frac{2\Delta}{en}$ в интервале температур от 0 до критической T_c (здесь Δ – энергетическая щель (параметр порядка сверхпроводника), e – заряд электрона, n – натуральное число) [18]. Реализующийся в таких баллистических контактах эффект многократных андреевских отражений также служит основой методики андреевской спектроскопии, позволяющей надежно определять поведение сверхпроводящего параметра порядка в зависимости от температуры. Следует отметить, что существующие теоретические модели не всегда удовлетворительно описывают экспериментальные данные. В экспериментальных работах [19-21] наблюдается существенный отклик тока при напряжении V_1 ($n = 1$), когда в некоторых теоретических моделях отклик тока при V_1 вообще не наблюдается.

В некоторых ВТСП энергетическая щель носит осциллирующий характер в диапазоне энергии 60-100 meV из-за активного электрон-фононного взаимодействия. (Осцилляция энергетических параметров в рассматриваемом интервале энергии наблюдается и в Элиашберговских спектрах). Одна из моделей слабоосциллирующей энергетической щели в диапазоне энергий 60-100 meV приведена на рисунке 1.

Вероятность андреевского отражения для границы нормальный металл – сверхпроводник со слабоосциллирующим параметром порядка в диапазоне энергии 60-100 meV оценивается по классической формуле [22, 23]:

$$a(\varepsilon) = \frac{1}{\Delta(\varepsilon)} \times \begin{cases} \varepsilon - \text{sign}(\varepsilon) \left(\varepsilon^2 - \Delta(\varepsilon)^2 \right)^{1/2}, & |\varepsilon| > \Delta(\varepsilon), \\ \varepsilon - i \left(\Delta(\varepsilon)^2 - \varepsilon^2 \right)^{1/2}, & |\varepsilon| < \Delta(\varepsilon), \end{cases} \quad (1)$$

где ε – энергия, i – мнимая единица.

Из графика зависимости коэффициента андреевского отражения от энергии (рисунок 1) видно, что отклонение от классической формы наблюдается при положительных значениях энергии в диапазоне от 65-95 meV.

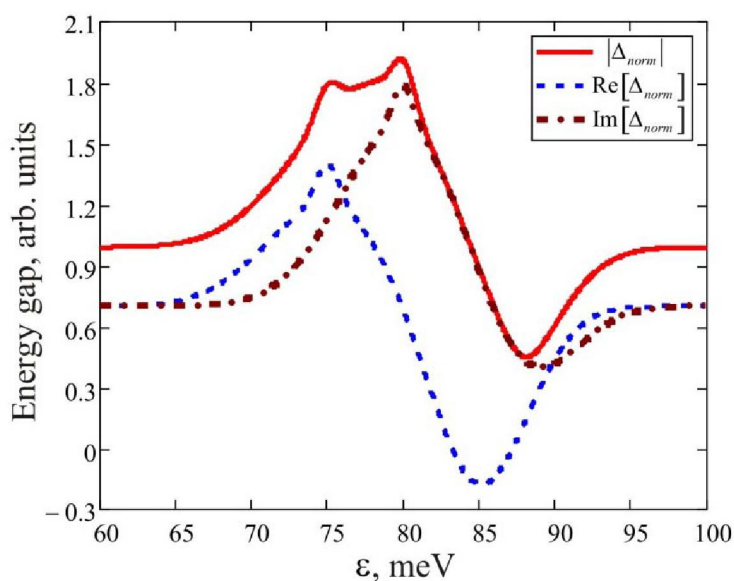


Рисунок 1 – Зависимость энергетической щели от энергии в диапазоне 60-100 meV: сплошная кривая – модуль, пунктирная – вещественная часть, штрихпунктирная – мнимая часть

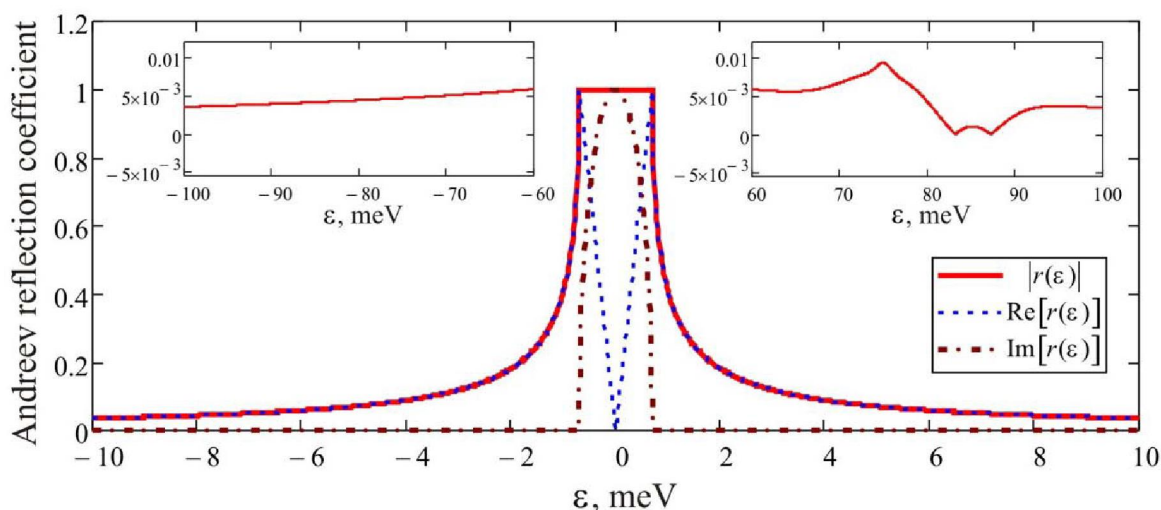


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента андреевского отражения от энергии: сплошная кривая – модуль, пунктирная – модуль вещественной части, штрихпунктирная – модуль мнимой части (на вставке – изменение значения коэффициента андреевского отражения при $\varepsilon = -(100 \div 60)$ meV (слева), $\varepsilon = 60 \div 100$ meV (справа))

Расчет вольтамперной характеристики (ВАХ) и динамической проводимости баллистического SNS-контакта производился с помощью матрицы рассеяния, которая переводит состояние свободных квазичастиц, налетающих на область взаимодействия друг с другом (или с препятствием), в состояние разлетающихся после взаимодействия частиц [24]. В рамках известной модели Аверина–Бардаса процесс рассеяния электронов в баллистическом SNS-контакте характеризуется матрицей рассеяния следующего типа:

$$S_{el} = \begin{pmatrix} r & t \\ t & -r^* t/t^* \end{pmatrix} \quad (2)$$

где $|t|^2 = D$ – прозрачность барьера, $|r|^2 = R$ – вероятность отражения. Матрица рассеяния для дырок является комплексно-сопряженной аналогией выражения (2): $S_h = S_{el}^*$. В рассматриваемой модели энергия электрона увеличивается на eV каждый раз, когда он проходит с левого сверхпроводящего берега на правый, в тоже время дырка увеличивает свою энергию, проходя через тонкий слой нормального металла N в противоположном направлении. Таким образом, волновые функции электроноподобной и дырочноподобных квазичастиц сдвинуты на $2eV$. Далее с учетом этих сдвинутых на $2eV$ волновых функций электроноподобной и дырочноподобных квазичастиц преобразуется матрица рассеяния (2). Учитывая следующие равенства комплексно-сопряженных функций, определяющих амплитуды вероятностей андреевских и нормальных отражений квазичастиц, $A(-\varepsilon, -V) = -A^*(\varepsilon, V)$ и $B(-\varepsilon, -V) = -B^*(\varepsilon, V)$, а также коэффициент андреевского отражения (1) получается окончательное уравнение для определения вольтамперной характеристики баллистического SNS-контакта:

$$I_k = \frac{e}{\pi \hbar} \left[eV \delta_{k0} - \int d\varepsilon \tanh \left\{ \frac{\varepsilon}{2T} \right\} \left(J(\varepsilon) (a_{2k} A_k^* + a_{-2k} A_{-k}) \right) + \right. \\ \left. + \sum_n \left(1 + a_{2k} a_{2(n+k)}^* \right) (A_n A_{n+k}^* - B_n B_{n+k}^*) \right] \quad (3)$$

(Здесь $\hbar$ – приведенная постоянная Планка, V – напряжение, ε – энергия, $T = (1 + i \cdot h)^{-1}$ – величина, определяющая прозрачность системы (h – высота барьера), $J(\varepsilon) = \sqrt{1 - |a(\varepsilon)|^2}$, $a(\varepsilon)$ – коэффициент андреевского отражения, A , B – амплитуды вероятностей андреевски и нормально отраженных квазичастиц).

Результаты численного моделирования ВАХ и $\frac{dI(V)}{dV}$ -спектров баллистического SNS-контакта по уравнению (3) с учетом коэффициента андреевского отражения (1) приведены при прозрачности барьера 0,98 (высота барьера 0,144) на рисунке 3, при прозрачности барьера 0,95 (высота барьера 0,229) на рисунке 4, при прозрачности барьера 0,9 (высота барьера 0,33) на рисунке 5.

В режиме прозрачности 98% выражено наблюдаются андреевские особенности динамической проводимости при $n = 1 \div 9$. В районе $n = 1$ появились существенные изменения в виде провала, отсутствующие на классических зависимостях для случая высокой прозрачности, но наблюдающиеся во многих экспериментальных работах (см. напр. [19]). По расчету амплитуда $\frac{dI(V)}{dV}$ -спектра при $n = 1$ составляет ≈ 1 усл. ед., после достижения этого значения спектр плавно уменьшается до $\approx 0,4$ усл. ед. (рисунок 3). Далее при различных значениях n от 1 до 9 отчетливо наблюдаем эффект многократных андреевских отражений: при $n = 2$ амплитуда спектра $\approx 1,9$ усл. ед., минимум $\approx 1,2$ усл. ед.; при $n = 3$ амплитуда спектра $\approx 2,25$ усл. ед., минимум $\approx 1,5$ усл. ед.; при $n = 4$ амплитуда спектра $\approx 2,8$ усл. ед., минимум $\approx 2,75$ усл. ед. и т.д. (рисунок 3).

С увеличением высоты барьера SNS-контакта от 0,144 до 0,33 (прозрачность – 90%) глубина провалов, проявляющихся около андреевских пиков при различных значениях n , и амплитуды

$\frac{dI(V)}{dV}$ -спектра уменьшаются (рисунки 3-5). Следует отметить, что при падении прозрачности до 90% СГС наблюдается в 8 значениях n (рисунки 4, 5).

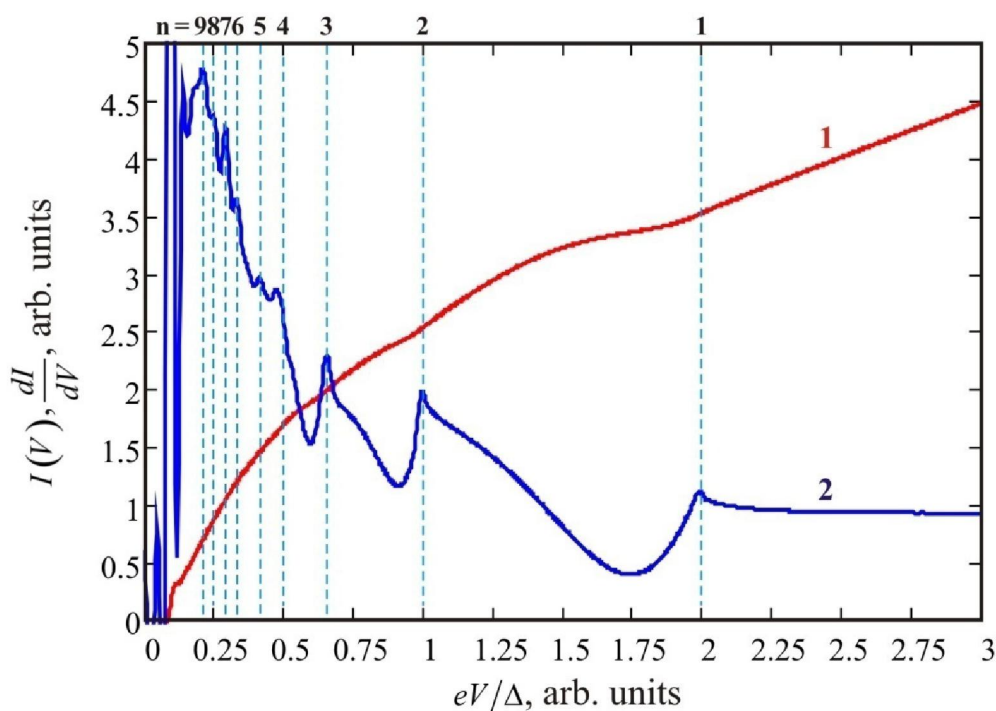


Рисунок 3 – Вольт-амперная характеристика (1) и динамическая проводимость (2) SNS-контакта при прозрачности барьера 0,98 (высота барьера 0,144)

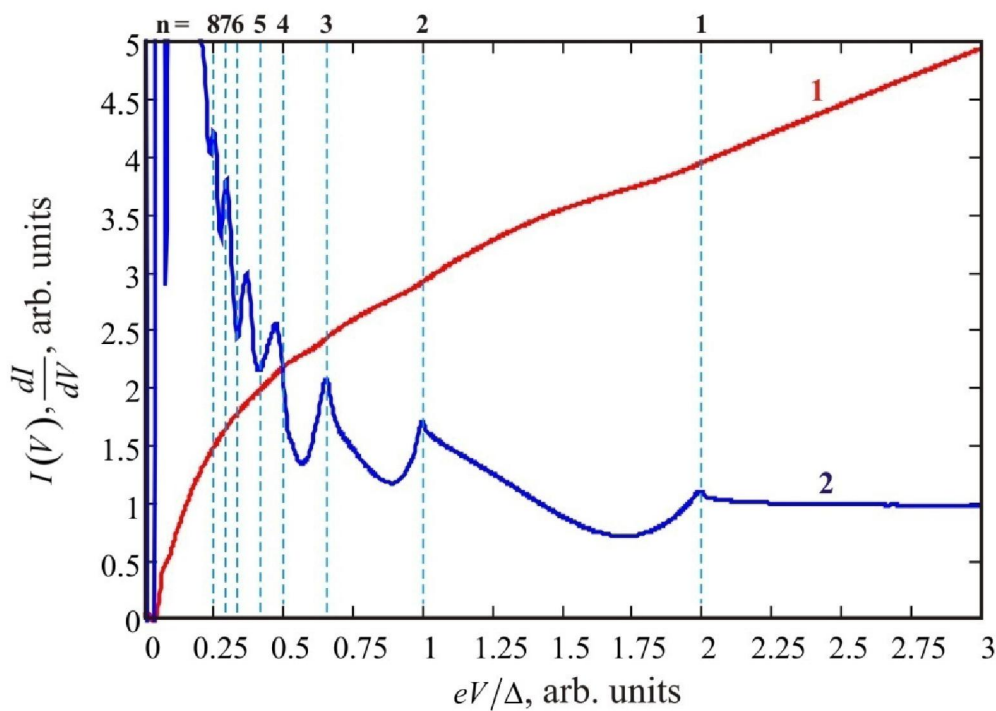


Рисунок 4 – Вольт-амперная характеристика (1) и динамическая проводимость (2) SNS-контакта при прозрачности барьера 0,95 (высота барьера 0,229)

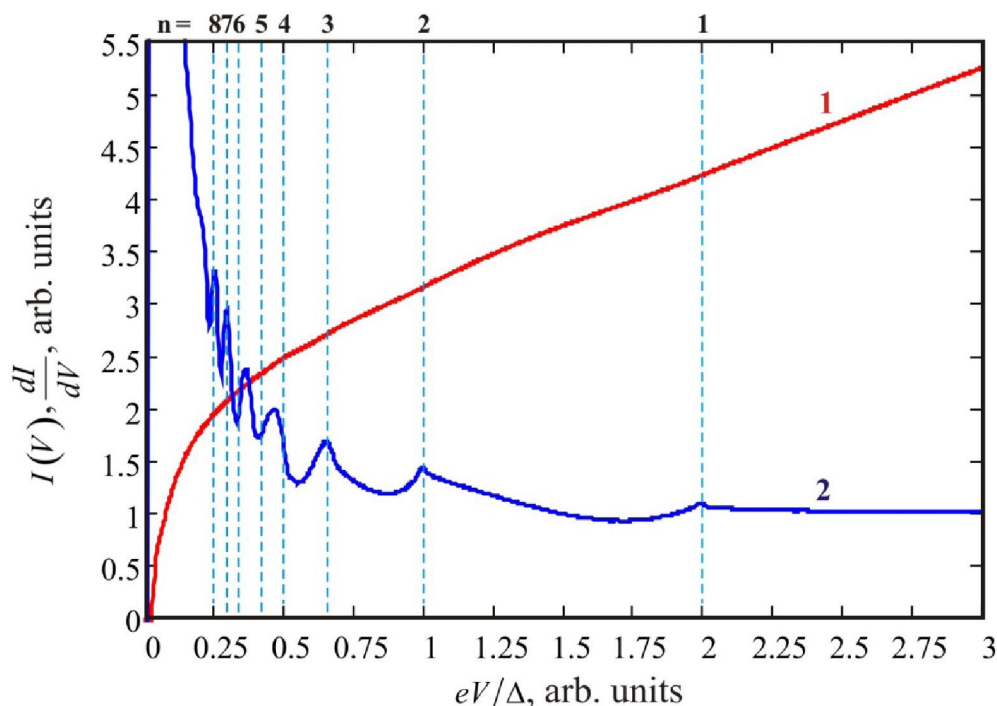


Рисунок 5 – Вольт-амперная характеристика (1) и динамическая проводимость (2) SNS-контакта при прозрачности барьера 0,9 (высота барьера 0,33)

В рассчитанных $\frac{dI(V)}{dV}$ -спектрах появились более существенные изменения, на наш взгляд, связанные с осцилляцией энергетической щели в диапазоне энергии 60-100 meV. Четвертая андреевская особенность ($n = 4$) SNS-контакта при прозрачности 90% является минимумом, при 95% принимает промежуточное положение, а при 98% и выше становится максимумом. А пятая андреевская особенность ($n = 5$) является минимумом при относительно низких коэффициентах прозрачности, при 98% и выше из минимума становится выраженным максимумом.

Таким образом, в данной работе проведено модельное исследование динамической проводимости баллистических контактов в режиме высокой прозрачности (0,9-0,98) на основе сверхпроводников со слабоосциллирующим параметром порядка в диапазоне энергии 60-100 meV; определены особенности субгармонической щелевой структуры SNS-контактов при значениях n от 1 до 8 для случая $D = 0,9; 0,95; 0,98$; выявлено, что в подобных объектах наблюдаются существенные изменения андреевских спектров, а именно, трансформация минимумов в максимумы четвертой и пятой андреевских особенностей ($n = 4; 5$) при увеличении коэффициента прозрачности.

Работа поддержана грантами МОН РК (проект №1332/ГФ-14-ОТ) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект №14-32-50485).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Müller K.A., Bednorz J.G. The Discovery of a Class of High-Temperature Superconductors // Science. – 1987. – Vol. 237. – P. 1133-1139.
- [2] Jinhwan Lee, Fujita K., Schmidt A.R., Chung Koo Kim, Eisaki H., Uchida S., Davis J. C. Spectroscopic Fingerprint of Phase-Incoherent Superconductivity in the Underdoped $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$ // Science. – 2009. – Vol. 325. – P. 1099-1103.
- [3] Горьков Л.П., Копнин Н.Б. Высокотемпературные сверхпроводники с точки зрения эксперимента // УФН. – 1988, вып.1. – Т. 156. – С. 117-135. [Gor'kov L.P., Kopnin N.B. High- T_c superconductors from the experimental point of view // Sov. Phys. Usp. – 1988. – Vol. 31. – P. 850-860.]
- [4] Садовский М.В. Высокотемпературная сверхпроводимость в слоистых соединениях на основе железа // УФН. – 2008. – Т. 178. – С. 1243-1271. [Sadovskii M.V. High-temperature superconductivity in iron-based layered compounds // Phys. Usp. – 2008. – Vol. 51. – P. 1201-1227.]

- [5] Ивановский А.Л. Новые высокотемпературные сверхпроводники на основе оксиарсенидов редкоземельных и переходных металлов и родственных фаз: синтез, свойства и моделирование // УФН. – 2008. – Т. 178. – С. 1273-1306. [Ivanovskii A.L. New high-temperature superconductors based on rare-earth and transition metal oxyarsenides and related phases: synthesis, properties, and simulations // Phys. Usp. – 2008. – Vol. 51. – P. 1229-1260.]
- [6] Ерёмин И.М. Антиферромагнетизм в железосодержащих сверхпроводниках: магнитный порядок в модели с коллективизированными электронами // УФН. – 2014. – Т. 184. – С. 875-882. [Eremin I.M. Antiferromagnetism in iron-based superconductors: magnetic order in the model of delocalized electrons // Phys. Usp. – 2014. – Vol. 57 – P. 807-813.]
- [7] Kleiner R., Müller P. Intrinsic Josephson effects in high- T_c superconductors // Phys. Rev. B. – 1994. – Vol. 49. – P. 1327.
- [8] Schlenga K., Kleiner R., Hechtischer G., Mößle M., Schmitt S., Müller P., Helm Ch., Preis Ch., Forsthofer F., Keller J., Johnson H. L., Veith M., Steinbeiß E. Tunneling spectroscopy with intrinsic Josephson junctions in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ and $\text{Ti}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$ // Phys. Rev. B. – 1998. – Vol. 57. – P. 14518.
- [9] Ponomarev Ya.G., Kuzmichev S.A., Mikheev M.G., Sudakova M.V., Tchesnokov S.N., Timergaleev N.Z., Yargin A.V., Maksimov E.G., Krasnosvobodtsev S.I., Varlashkin A.V., Hein M.A., Mueller G., Piel H., Sevastyanova L.G., Kravchenko O.V., Burdina K.P., Bulychov B.M. Evidence for a two-band behavior of MgB_2 from point-contact and tunneling spectroscopy // Solid State Commun. – 2004. – Vol. 129. – P. 85-89.
- [10] McCumber D.E. Effect of ac Impedance on dc Voltage-Current Characteristics of Superconductor Weak-Link Junctions // J. Appl. Phys. – 1968. – Vol. 39. – P. 3113-3118.
- [11] Лихарев К.К. Введение в динамику джозефсоновских переходов. – М.: Наука, 1985. – 320 с. [Likharev K. K. Dynamics of Josephson junctions and circuits. – Gordon and Breach Science Publishers, 1986. – 614 p.]
- [12] Barone A., Paterno G. Physics and Applications of the Josephson Effect. – New York: Wiley & Sons, 1982. – 639 p.
- [13] Saitoh K., Ishimaru Y., Fuke H., Enomoto Y. A Model Analysis for Current-Voltage Characteristics of Superconducting Weak Links // Jpn. J. Appl. Phys. – 1997. – Vol. 36, 3A. – P. L272-L275.
- [14] Seed R.G., Vittoria C., Widom A. Excess current in shunted Josephson weak links // J. Appl. Phys. – 1994. – Vol. 75. – P. 8195-8197.
- [15] Kümmel R., Günsenheimer U., Nicolsky R. Andreev scattering of quasiparticle wave packets and current-voltage characteristics of superconducting metallic weak links // Phys. Rev. B. – 1990. – Vol. 42. – P. 3992.
- [16] Octavio M., Tinkham M., Blonder G.E., Klapwijk T.M. Subharmonic energy-gap structure in superconducting constrictions // Phys. Rev. B. – 1983. – Vol. 27. – P. 6739.
- [17] Андреев А.Ф. Теплопроводность промежуточного состояния сверхпроводников // ЖЭТФ. – 1964. – Т. 46. – С. 1823. [Andreev A.F. Thermal conductivity of the intermediate state of superconductors // Sov. Phys. JETP. – 1964. – Vol. 19. – P. 1228-1231.]
- [18] Blonder G.E., Tinkham M., Klapwijk T.M. Transition from metallic to tunneling regimes in superconducting microconstrictions: Excess current, charge imbalance, and supercurrent conversion // Phys. Rev. B. – 1982. – Vol. 25. – P. 4515-4532.
- [19] Kuzmicheva T.E., Kuzmichev S.A., Mikheev M.G., Ponomarev Ya.G., Tchesnokov S.N., Eltsev Yu.F., Pudalov V.M., Pervakov K.S., Sadakov A.V., Usoltsev A.S., Khlybov E.P., Kulikova L.F. Experimental study of the intrinsic multiple Andreev reflections effect in $\text{GdO}(\text{F})\text{FeAs}$ superconductor array junctions // EPL. – 2013. – Vol. 102. – P. 67006.
- [20] Кузьмичев С.А., Кузьмичева Т.Е., Болталин А.И., Морозов И.В. Спектроскопия многократных андреевских отражений сверхпроводящего LiFeAs : анизотропия параметров порядка и их температурное поведение // Письма в ЖЭТФ. – 2013. – Vol. 98. – P. 816-825. [Kuzmichev S.A., Kuzmicheva T.E., Boltalin A.I., Morozov I.V. Multiple andreev reflections spectroscopy of superconducting LiFeAs single crystals: Anisotropy and temperature behavior of the order parameters // JETP Letters. – 2014. – Vol. 98. – P. 722-730.]
- [21] Кузьмичева Т.Е., Кузьмичев С.А., Михеев М.Г., Пономарёв Я.Г., Чесноков С.Н., Пудалов В.М., Хлыбов Е.П., Жигadlo Н.Д. Андреевская спектроскопия железосодержащих сверхпроводников: температурная зависимость параметров порядка и их скейлинг с T_c // УФН. – 2014. – Vol. 184. – P. 888-897. [Kuzmicheva T.E., Kuzmichev S.A., Mikheev M.G., Ponomarev Ya.G., Tchesnokov S.N., Pudalov V.M., Khlybov E.P., Zhigadlo N.D. Andreev spectroscopy of iron-based superconductors: temperature dependence of the order parameters and scaling of $\Delta_{L,S}$ with T_c // Phys. Usp. – 2014. – Vol. 57. – P. 819-827.]
- [22] Averin D., Bardas A. ac Josephson Effect in Single Quantum Channel // Phys. Rev. Lett. – 1995. – Vol. 75. – P. 1831-1834.
- [23] Tanaka Y., Kashiwaya S. Theory of the Josephson effect in d-wave superconductors // Phys. Rev. B. – 1996. – Vol. 53. – P. R11957.
- [24] Лесовик Г.Б., Садовский И.А. Описание квантового электронного транспорта с помощью матрицы рассеяния // УФН. – 2011. – Т. 181. – С. 1041. [Lesovik G.B., Sadovskyy I.A. Scattering matrix approach to the description of quantum electron transport // Phys. Usp. – 2011. – Vol. 54. – P. 1007-1059.]

REFERENCES

- [1] Müller K.A., Bednorz J.G. The Discovery of a Class of High-Temperature Superconductors. *Science*, **1987**, 237, 1133-1139 (in Eng.).
- [2] Jhinwhan Lee, Fujita K., Schmidt A.R., Chung Koo Kim, Eisaki H., Uchida S., Davis J. C. Spectroscopic Fingerprint of Phase-Incoherent Superconductivity in the Underdoped $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$. *Science*, **2009**, 325, 1099-1103 (in Eng.).
- [3] Gor'kov L.P., Kopnin N.B. High-temperature superconductors in terms of the experiment. *Sov. Phys. Usp.*, **1988**, 31, 850-860 (in Eng.).

- [4] Sadovskii M.V. High-temperature superconductivity in iron-based layered compounds. *Phys. Usp.*, **2008**, 51, 1201-1227 (in Eng.).
- [5] Ivanovskii A.L. *Phys. Usp.*, **2008**, 51, 1229-1260 (in Eng.).
- [6] Eremin I.M. *Phys. Usp.*, **2014**, 57, 807-813 (in Eng.).
- [7] Kleiner R., Müller P. *Phys. Rev. B.*, **1994**, 49, 1327 (in Eng.).
- [8] Schlenga K., Kleiner R., Hechtfischer G., Möhle M., Schmitt S., Müller P., Helm Ch., Preis Ch., Forsthofer F., Keller J., Johnson H. L., Veith M., Steinbeiß E. *Phys. Rev. B.*, **1998**, 57, 14518 (in Eng.).
- [9] Ponomarev Ya.G., Kuzmichev S.A., Mikheev M.G., Sudakova M.V., Tchesnokov S.N., Timergaleev N.Z., Yarigin A.V., Maksimov E.G., Krasnosvobodtsev S.I., Varlashkin A.V., Hein M.A., Mueller G., Piel H., Sevastyanova L.G., Kravchenko O.V., Burdina K.P., Bulychev B.M. *Solid State Commun.*, **2004**, 129, 85-89 (in Eng.).
- [10] McCumber D.E. *J. Appl. Phys.*, **1968**, 39, 3113-3118 (in Eng.).
- [11] Likharev K. K. *Dynamics of Josephson junctions and circuits*. Gordon and Breach Science Publishers, 1986. 614 p (in Eng.).
- [12] Barone A., Paterno G. *Physics and Applications of the Josephson Effect*. New York: Wiley & Sons, 1982. 639 p (in Eng.).
- [13] Saitoh K., Ishimaru Y., Fuke H., Enomoto Y. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **1997**, 36, 3A, L272-L275 (in Eng.).
- [14] Seed R.G., Vittoria C., Widom A. *J. Appl. Phys.*, **1994**, 75, 8195-8197 (in Eng.).
- [15] Kümmel R., Günsenheimer U., Nicolsky R. *Phys. Rev. B.*, **1990**, 42, 3992 (in Eng.).
- [16] Octavio M., Tinkham M., Blonder G.E., Klapwijk T.M. *Phys. Rev. B.*, **1983**, 27, 6739 (in Eng.).
- [17] Andreev A.F. *Sov. Phys. JETP*, **1964**, 19, 1228-1231 (in Eng.).
- [18] Blonder G.E., Tinkham M., Klapwijk T.M. *Phys. Rev. B.*, **1982**, 25, 4515-4532 (in Eng.).
- [19] Kuzmicheva T.E., Kuzmichev S.A., Mikheev M.G., Ponomarev Ya.G., Tchesnokov S.N., Eltsev Yu.F., Pudalov V.M., Pervakov K.S., Sadakov A.V., Usoltsev A.S., Khlybov E.P., Kulikova L.F. *EPL*, **2013**, 102, 67006 (in Eng.).
- [20] Kuzmichev S.A., Kuzmicheva T.E., Boltalin A.I., Morozov I.V. *JETP Letters*, **2014**, 98, 722-730 (in Eng.).
- [21] Kuzmicheva T.E., Kuzmichev S.A., Mikheev M.G., Ponomarev Ya.G., Tchesnokov S.N., Pudalov V.M., Khlybov E.P., Zhigadlo N.D. *Phys. Usp.*, **2014**, 57, 819-827 (in Eng.).
- [22] Averin D., Bardas A. *Phys. Rev. Lett.*, **1995**, 75, 1831-1834 (in Eng.).
- [23] Tanaka Y., Kashiwaya S. *Phys. Rev. B.*, **1996**, 53, R11957 (in Eng.).
- [24] Lesovik G.B., Sadovskyy I.A. *Phys. Usp.*, **2011**, 54, 1007-1059 (in Eng.).

ЖОҒАРЫ МӨЛДІРЛІК РЕЖИМІНДЕ 60-100 meV ЭНЕРГИЯ ДИАПАЗОНЫНДА ӘЛСІЗ АУЫТҚЫҒАН РЕТТЕЛУ ПАРАМЕТРЛІ АСҚЫН ӨТКІЗГІШТЕР НЕГІЗІНДЕГІ БАЛЛИСТИКАЛЫҚ КОНТАКТІЛЕР ДИНАМИКАЛЫҚ ӨТКІЗГІШТІГІН МОДЕЛЬДЕУ

Д. М. Сергеев, С. А. Кузьмичев, З. К. Аймаганбетова, К. Ш. Шункеев

Тірек сөздер: асқын өкізгіштік, бірнеше реттік Андреев шағылуы, динамикалық өткізгіштік, вольтамперлік сипаттама, баллистикалық контакт, барьер мөлдірлігі.

Аннотация. Мақалада Аверин–Бардас моделі аясында жоғары мөлдірлік жағдайы үшін асқын өткізгіш – қалыпты металл – асқын өткізгіш (SNS) баллистикалық контактілерінің вольтамперлік сипаттамалары мен динамикалық өткізгіштіктері есептелді, мұнда контакт құраушы асқын өткізгіш материалдардың энергетикалық саңылауы күшті электрон-фонондық әсерлесуінен 60-100 meV энергия диапазонында әлсіз ауытқушылыққа ие. $V_4 = 2\Delta/4e$, $V_5 = 2\Delta/5e$ кернеу мәндерінде SNS-контактісінің мөлдірлік коэффициентін 90%-дан 98%-ға өсіргенде (немесе барьер биіктігін 0,33-тен 0,144-ке азайтқанда) Андреев спектрлерінің минимумдары максимумдарға түрленетіндігі анықталды. Алынған нәтижелер эксперименталдық мәліметтермен сәйкес келеді.

Поступила 17.03.2015 г.