

ISSN 1991-346X

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ  
ҰЛТТЫҚ ҒЫЛЫМ АКАДЕМИЯСЫНЫҢ

# Х А Б А Р Л А Р Ы

---

---

## ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

## NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES  
OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА  
СЕРИЯСЫ**



**СЕРИЯ**

**ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ**



**PHYSICO-MATHEMATICAL  
SERIES**

**2 (300)**

**НАУРЫЗ – СӘУІР 2015 ж.**

**МАРТ – АПРЕЛЬ 2015 г.**

**MARCH – APRIL 2015**

1963 ЖЫЛДЫҢ ҚАҢТАР АЙЫНАН ШЫҒА БАСТАҒАН  
ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1963 ГОДА  
PUBLISHED SINCE JANUARY 1963

ЖЫЛЫНА 6 РЕТ ШЫҒАДЫ  
ВЫХОДИТ 6 РАЗ В ГОД  
PUBLISHED 6 TIMES A YEAR

АЛМАТЫ, ҚР ҰҒА  
АЛМАТЫ, НАН РК  
ALMATY, NAS RK

Б а с р е д а к т о р

ҚР ҰҒА академигі,

**Мұтанов Г. М.**

Р е д а к ц и я а л қ а с ы:

физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Әшімов А.А.**; техн. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Байғұнчечков Ж.Ж.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Жұмаділдаев А.С.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Қалменов Т.Ш.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Мұқашев Б.Н.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Өтелбаев М.О.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Тәкібаев Н.Ж.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Харин С.Н.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Әбішев М.Е.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Жантаев Ж.Ш.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Қалимолдаев М.Н.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Косов В.Н.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Мұсабаев Т.А.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Ойнаров Р.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Рамазанов Т.С.** (бас редактордың орынбасары); физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Темірбеков Н.М.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Өмірбаев У.У.**

Р е д а к ц и я к ең е с і:

Украинаның ҰҒА академигі **И.Н. Вишневский** (Украина); Украинаның ҰҒА академигі **А.М. Ковалев** (Украина); Беларусь Республикасының ҰҒА академигі **А.А. Михалевич** (Беларусь); Әзірбайжан ҰҒА академигі **А. Пашаев** (Әзірбайжан); Молдова Республикасының ҰҒА академигі **И. Тигиняну** (Молдова); мед. ғ. докторы, проф. **Иозеф Банас** (Польша)

Главный редактор

академик НАН РК

**Г. М. Мутанов**

Редакционная коллегия:

доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **А.А. Ашимов**; доктор техн. наук, проф., академик НАН РК **Ж.Ж. Байгунчеков**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **А.С. Джумадильдаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **Т.Ш. Кальменов**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **Б.Н. Мукашев**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **М.О. Отелбаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **Н.Ж. Такибаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **С.Н. Харин**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **М.Е. Абишев**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Ж.Ш. Жантаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **М.Н. Калимолдаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **В.Н. Косов**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Т.А. Мусабаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Р. Ойнаров**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Т.С. Рамазанов** (заместитель главного редактора); доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Н.М. Темирбеков**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **У.У. Умирбаев**

Редакционный совет:

академик НАН Украины **И.Н. Вишневский** (Украина); академик НАН Украины **А.М. Ковалев** (Украина); академик НАН Республики Беларусь **А.А. Михалевич** (Беларусь); академик НАН Азербайджанской Республики **А. Пашаев** (Азербайджан); академик НАН Республики Молдова **И. Тигиняну** (Молдова); д. мед. н., проф. **Иозеф Банас** (Польша)

«Известия НАН РК. Серия физико-математическая». ISSN 1991-346X

Собственник: РОО «Национальная академия наук Республики Казахстан» (г. Алматы)

Свидетельство о постановке на учет периодического печатного издания в Комитете информации и архивов Министерства культуры и информации Республики Казахстан №5543-Ж, выданное 01.06.2006 г.

Периодичность: 6 раз в год.

Тираж: 300 экземпляров.

Адрес редакции: 050010, г. Алматы, ул. Шевченко, 28, ком. 219, 220, тел.: 272-13-19, 272-13-18,

[www.nauka-nanrk.kz](http://www.nauka-nanrk.kz) / [physics-mathematics.kz](http://physics-mathematics.kz)

---

© Национальная академия наук Республики Казахстан, 2015

Адрес типографии: ИП «Аруна», г. Алматы, ул. Муратбаева, 75.

Editor in chief

**G. M. Mutanov**,  
academician of NAS RK

Editorial board:

**A.A. Ashimov**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **Zh.Zh. Baigunchekov**, dr. eng. sc., prof., academician of NAS RK; **A.S. Dzhumadildayev**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **T.S. Kalmenov**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **B.N. Mukhashev**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **M.O. Otelbayev**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **N.Zh. Takibayev**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **S.N. Kharin**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **M.Ye. Abishev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **Zh.Sh. Zhantayev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **M.N. Kalimoldayev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **V.N. Kosov**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **T.A. Mussabayev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **R. Oinarov**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **T.S. Ramazanov**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK (deputy editor); **N.M. Temirbekov**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **U.U. Umirbayev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK

Editorial staff:

**I.N. Vishnievski**, NAS Ukraine academician (Ukraine); **A.M. Kovalev**, NAS Ukraine academician (Ukraine); **A.A. Mikhalevich**, NAS Belarus academician (Belarus); **A. Pashayev**, NAS Azerbaijan academician (Azerbaijan); **I. Tighineanu**, NAS Moldova academician (Moldova); **Joseph Banas**, prof. (Poland).

**News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Physical-mathematical series.**  
**ISSN 1991-346X**

Owner: RPA "National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan" (Almaty)

The certificate of registration of a periodic printed publication in the Committee of information and archives of the Ministry of culture and information of the Republic of Kazakhstan N 5543-Ж, issued 01.06.2006

Periodicity: 6 times a year

Circulation: 300 copies

Editorial address: 28, Shevchenko str., of. 219, 220, Almaty, 050010, tel. 272-13-19, 272-13-18,

[www.nauka-nanrk.kz](http://www.nauka-nanrk.kz) / [physics-mathematics.kz](http://physics-mathematics.kz)

---

© National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, 2015

Address of printing house: ST "Aruna", 75, Muratbayev str, Almaty

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. Sergeyev<sup>1</sup>, S. A. Kuzmichev<sup>2</sup>, Z. K. Aimaganbetova<sup>3</sup>, K. Sh. Shunkeyev<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Military Institute of Air Defence Forces, Aktobe, Kazakhstan,

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia,

<sup>3</sup>Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan,

<sup>4</sup>Zhubanov 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 СЛАБОУСЦИЛЛИРУЮЩИМ  
ПАРАМЕТРОМ ПОРЯДКА В ДИАПАЗОНЕ ЭНЕРГИИ 60-100 meV  
В РЕЖИМЕ ВЫСОКОЙ ПРОЗРАЧНОСТИ**

**Д. М. Сергеев<sup>1</sup>, С. А. Кузьмичев<sup>2</sup>, З. К. Аймаганбетова<sup>3</sup>, К. Ш. Шункеев<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Военный институт Сил воздушной обороны, Актобе, Казахстан,

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия,

<sup>3</sup>Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан,

<sup>4</sup>Актюбинский 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 электроподобная 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 квазиимпульс электроподобной 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  $\Delta$  – 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]:

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

где  $\varepsilon$  – 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.

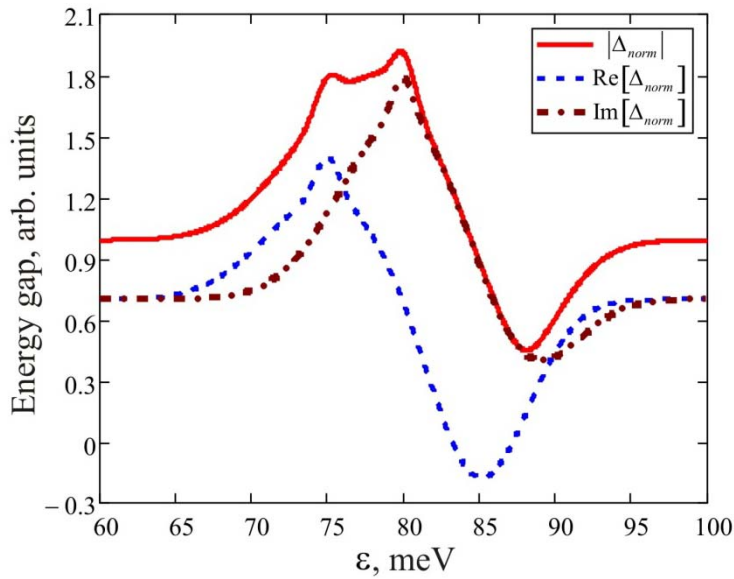


Рисунок 1 – Зависимость энергетической щели от энергии в диапазоне 60-100 meV: сплошная кривая – модуль, пунктирная – вещественная часть, штрихпунктирная – мнимая часть

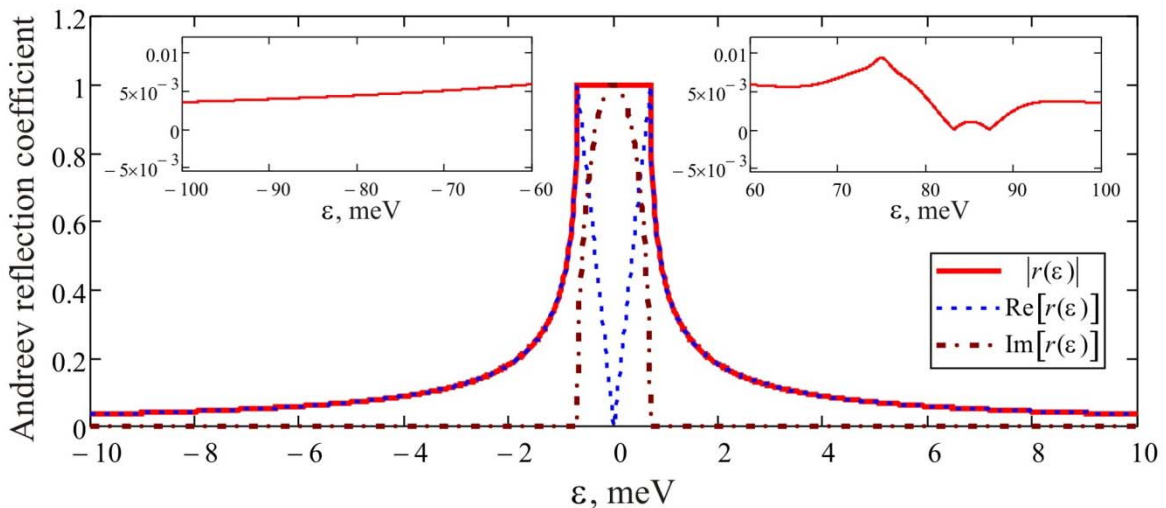


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента андреевского отражения от энергии: сплошная кривая – модуль, пунктирная – модуль вещественной части, штрихпунктирная – модуль мнимой части (на вставке – изменение значения коэффициента андреевского отражения при  $\varepsilon = -(100 \div 60)$  meV (слева),  $\varepsilon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

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

(Здесь  $\hbar$  – приведенная постоянная Планка,  $V$  – напряжение,  $\varepsilon$  – 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  $\approx 1$  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).

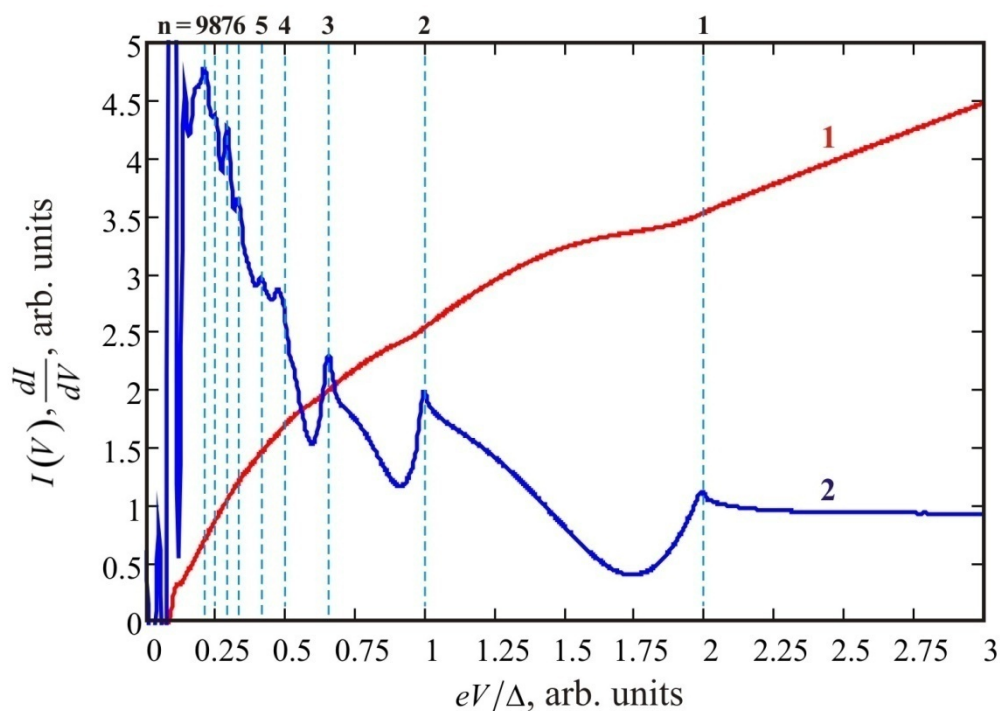


Рисунок 3 – Вольт-амперная характеристика (1) и динамическая проводимость (2) SNS-контакта при прозрачности барьера 0,98 (высота барьера 0,144)

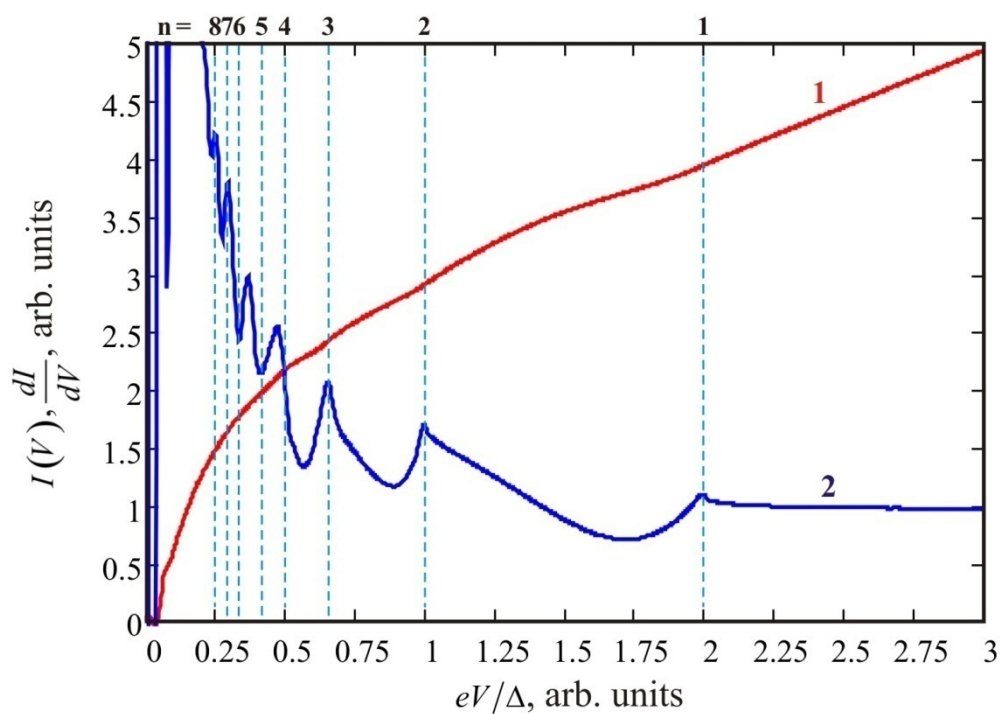


Рисунок 4 – Вольт-амперная характеристика (1) и динамическая проводимость (2) SNS-контакта при прозрачности барьера 0,95 (высота барьера 0,229)

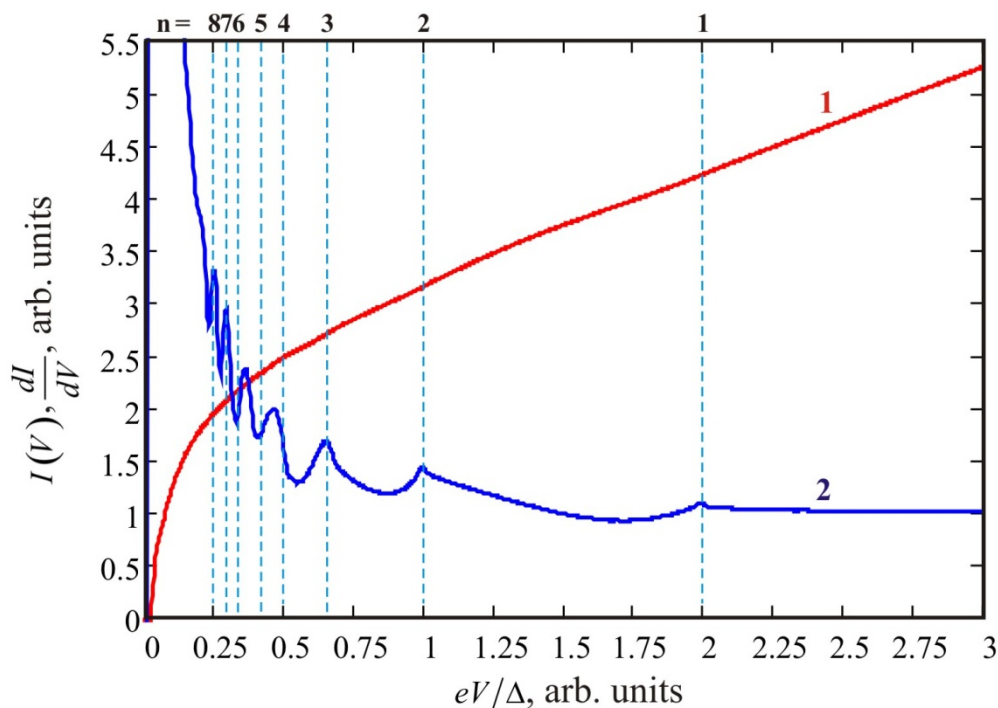


Рисунок 5 – Вольт-амперная характеристика (1) и динамическая проводимость (2) SNS-контакта при прозрачности барьера 0,9 (высота барьера 0,33)

В рассчитанных  $\frac{dI(V)}{dV}$ -спектрах появились более существенные изменения, на наш взгляд, связанные с осцилляциями 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] Jhinwan 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., Hechtfisher 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  $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$  // 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., 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., Bulychiev B.M. Evidence for a two-band behavior of  $\text{MgB}_2$  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., Gunsenheimer 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  $\text{LiFeAs}$ : 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  $\text{LiFeAs}$  single crystals: Anisotropy and temperature behavior of the order parameters // JETP Letters. – 2014. – Vol. 98. – P. 722-730.]
- [21] Кузьмичёва Т.Е., Кузьмичёв 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  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$ . *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., Gunsenheimer 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.*

**Publication Ethics and Publication Malpractice  
in the journals of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan**

For information on Ethics in publishing and Ethical guidelines for journal publication see <http://www.elsevier.com/publishingethics> and <http://www.elsevier.com/journal-authors/ethics>.

Submission of an article to the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan implies that the described work has not been published previously (except in the form of an abstract or as part of a published lecture or academic thesis or as an electronic preprint, see <http://www.elsevier.com/postingpolicy>), that it is not under consideration for publication elsewhere, that its publication is approved by all authors and tacitly or explicitly by the responsible authorities where the work was carried out, and that, if accepted, it will not be published elsewhere in the same form, in English or in any other language, including electronically without the written consent of the copyright-holder. In particular, translations into English of papers already published in another language are not accepted.

No other forms of scientific misconduct are allowed, such as plagiarism, falsification, fraudulent data, incorrect interpretation of other works, incorrect citations, etc. The National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan follows the Code of Conduct of the Committee on Publication Ethics (COPE), and follows the COPE Flowcharts for Resolving Cases of Suspected Misconduct ([http://publicationethics.org/files/u2/New\\_Code.pdf](http://publicationethics.org/files/u2/New_Code.pdf)). To verify originality, your article may be checked by the Cross Check originality detection service <http://www.elsevier.com/editors/plagdetect>.

The authors are obliged to participate in peer review process and be ready to provide corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. All authors of a paper should have significantly contributed to the research.

The reviewers should provide objective judgments and should point out relevant published works which are not yet cited. Reviewed articles should be treated confidentially. The reviewers will be chosen in such a way that there is no conflict of interests with respect to the research, the authors and/or the research funders.

The editors have complete responsibility and authority to reject or accept a paper, and they will only accept a paper when reasonably certain. They will preserve anonymity of reviewers and promote publication of corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. The acceptance of a paper automatically implies the copyright transfer to the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan.

The Editorial Board of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan will monitor and safeguard publishing ethics.

Правила оформления статьи для публикации в журнале смотреть на сайте:

[www.nauka-nanrk.kz](http://www.nauka-nanrk.kz)

[physics-mathematics.kz](http://physics-mathematics.kz)

Редактор *М. С. Ахметова*  
Верстка на компьютере *Д. Н. Калкабековой*

Подписано в печать 20.03.2015.  
Формат 60x881/8. Бумага офсетная. Печать – ризограф.  
10,5 п.л. Тираж 300. Заказ 2.