



УДК 538.9

doi:10.21685/2587-7704-2022-7-2-8



Open  
Access

RESEARCH  
ARTICLE

## Экспериментальное подтверждение моделирования туннельных ВАХ в диэлектрических пленках с металлическими наночастицами в рамках теории 1D-диссипативного туннелирования

**Владимир Дмитриевич Кревчик**

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40  
physics@pnzgu.ru

**Михаил Борисович Семенов**

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40  
physics@pnzgu.ru

**Дмитрий Олегович Филатов**

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40  
physics@pnzgu.ru

**Александр Павлович Шкуринов**

Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН,  
Россия, г. Шатура, ул. Святоозерская, 1  
physics@pnzgu.ru

**Валентин Глебович Центомирский**

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40  
physics@pnzgu.ru

**Иван Михайлович Семенов**

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40  
physics@pnzgu.ru

**Илья Сергеевич Антонов**

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40  
physics@pnzgu.ru

**Диана Павловна Буланкина**

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40  
physics@pnzgu.ru

**Артемий Владимирович Богородицкий**

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40  
physics@pnzgu.ru

**Аннотация.** Экспериментально и теоретически исследованы особенности туннельных вольт-амперных характеристик (ВАХ) в случае одномерного диссипативного туннелирования в пределе слабой диссипации для различных синтезированных (и в процессе синтеза) металлических КТ (Zr, Au, Ni, Co, Fe) в комбинированной системе атомного силового и сканирующего туннельного микроскопа во внешнем электрическом поле. Показано, что для отдельных туннельных ВАХ наблюдается единичный пик при одной из полярностей. Теоретически предсказывается, что амплитуда такого пика слабо нелинейно растет с понижением температуры.

**Ключевые слова:** квантовые точки, диссипативное туннелирование, совмещенный АСМ/СТМ, нанокластеры

**Финансирование:** работа выполнена при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 0748-2020-0012.

**Благодарности:** авторы благодарят проф. Э. Дж. Леггета за полезные обсуждения, а также ИПЛИТ РАН, ЦКП МГУ им. М. В. Ломоносова и НОЦ «Физика твердотельных наноструктур»



ННГУ им. Н. И. Лобачевского за помощь при выполнении экспериментальной части данной работы.

**Для цитирования:** Кревчик В. Д., Семенов М. Б., Филатов Д. О., Шкуринов А. П., Центомирский В. Г., Семенов И. М., Антонов И. С., Буланкина Д. П., Богородицкий А. В. Экспериментальное подтверждение моделирования туннельных ВАХ в диэлектрических пленках с металлическими наночастицами в рамках теории 1D-диссипативного туннелирования // Инжиниринг и технологии. 2022. Т. 7(2). С. 1–7. doi:10.21685/2587-7704-2022-7-2-8

## **Experimental confirmation of the simulation of tunnel CVCs in dielectric films with metallic nanoparticles in terms of the 1D-dissipative tunneling theory**

**Vladimir D. Krevchik**

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia  
physics@pnzgu.ru

**Mikhail B. Semenov**

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia  
physics@pnzgu.ru

**Dmitriy O. Filatov**

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia  
physics@pnzgu.ru

**Aleksandr P. Shkurinov**

Institute of Laser and Information Technology Problems of the Russian Academy of Sciences,  
1 Svyatoozerskaya Street, Shatura, Russia  
physics@pnzgu.ru

**Valentin G. Tsentomirskiy**

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia  
physics@pnzgu.ru

**Ivan M. Semenov**

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia  
physics@pnzgu.ru

**Ilya S. Antonov**

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia  
physics@pnzgu.ru

**Diana P. Bulankina**

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia  
physics@pnzgu.ru

**Artemiy V. Bogoroditskiy**

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia  
physics@pnzgu.ru

**Abstract.** In this work, the peculiarities of tunneling current-voltage characteristics (CVCs) in the case of one-dimensional dissipative tunneling in the limit of weak dissipation for various synthesized (and in the course of synthesis) metal QDs (Zr, Au, Ni, Co, Fe) in a combined system of an atomic force and scanning tunneling microscope in an external electric field, have been investigated. It is shown that for individual tunneling I-V characteristics, a single peak is observed at one of the polarities. Theoretically, it is predicted that the amplitude of such a peak slightly nonlinearly increases with decreasing temperature.

**Keywords:** quantum dots, dissipative tunneling, combined AFM/STM, nanoclusters

**Acknowledgments:** The work was supported by the grant of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. 0748-2020-0012. The authors are grateful to Professor E. J. Leggett for helpful discussions. The authors also thank the Institute on Laser and Information Technologies of the Russian Academy of Sciences, Center for Collective Use at Lomonosov Moscow State University and Scientific and Research and Educational Center for Physics of Solid-State Nanostructures at Lobachevsky State University for help with the experimental part of this work.



**For citation:** Krevchik V.D., Semenov M.B., Filatov D.O., Shkurinov A.P., Tsentomirskiy V.G., Semenov I.M., Antonov I.S., Bulankina D.P., Bogoroditskiy A.V. Experimental confirmation of the simulation of tunnel CVCs in dielectric films with metallic nanoparticles in terms of the 1D-dissipative tunneling theory. *Inzhiniring i tekhnologii = Engineering and Technology*. 2022;7(2):1–7. (In Russ.). doi:10.21685/2587-7704-2022-7-2-8

Экспериментальное наблюдение теоретически предсказываемых макроскопических эффектов диссипативного туннелирования [1–40] является одной из важнейших задач современной физики наноструктур [1, 2, 7]. В последнее десятилетие авторами настоящей работы экспериментально наблюдались эффекты, обусловленные диссипативным туннелированием электронов в ряде искусственных наноразмерных систем. Достигнутые на сегодняшний день результаты обобщены в табл. 1. В данной работе рассмотрены особенности туннельных ВАХ при одномерном диссипативном туннелировании во внешнем электрическом поле в пределе слабой диссипации для различных металлических наночастиц (НЧ) или квантовых точек (КТ) Zr, Au, Ni, Co, Fe, как синтезированных, так и в процессе синтеза в толще диэлектрических пленок с помощью АСМ-зонда. Эти особенности были исследованы как теоретически в одноинстантонном квазиклассическом приближении с точностью до предэкспоненциального фактора в вероятности туннелирования в модельном двухъямном осцилляционном потенциале в рамках науки о квантовом туннелировании с диссипацией [1–40] в условиях внешнего электрического поля, так и экспериментально (методом токопроводящей АСМ). Экспериментальные результаты интерпретированы на основе одномерной диссипативной теории туннелирования в пределе слабой диссипации [1–4, 29], проводится качественное сравнение экспериментальных и теоретических результатов (отдельных туннельных ВАХ с полевой зависимостью вероятности 1D-диссипативного туннелирования).

Таблица 1

Экспериментально наблюдаемые эффекты диссипативного туннелирования

1D	1D	2D	2D
Предел слабой диссипации	Предел сильной диссипации	Предел слабой диссипации	Предел сильной диссипации
Максимум на туннельных ВАХ для наночастиц Au в пленках SiO <sub>2</sub> [2, 29]	Серия неэквидистантных пиков на туннельных ВАХ КТ InAs/GaAs(001) [2, 15]	2D-бифуркации на туннельных ВАХ массивов наночастиц Au в пленках SiO <sub>2</sub> [2]	2D-бифуркации на полевой зависимости ФЧ <i>p-i-n</i> структур с ДАКТ InAs/GaAs(001) (эксперимент планируется)

В туннельных ВАХ контакта АСМ зонда к поверхности диэлектрических пленок в местах расположения металлических наночастиц наблюдаются пики, связанные с диссипативным туннелированием электронов между АСМ зондом и проводящей подложкой. Теоретически предсказано, что амплитуда такого пика слабо нелинейно растет с уменьшением температуры. В процессе синтеза металлических НЧ при смене полярности вместо НЧ возможен синтез торообразных структур. Исследованные эффекты 1D-диссипативного туннелирования позволили разработать авторский метод контролируемого роста НЧ в контакте АСМ зонда к тонкой пленке оксида на металлической подложке. Получено качественное соответствие экспериментальных и теоретических результатов (см. рис. 1), что позволяет предположить возможность экспериментального наблюдения эффектов макроскопического диссипативного туннелирования [1, 2].

В данной работе экспериментально и теоретически исследованы особенности туннельных ВАХ в случае одномерного диссипативного туннелирования в пределе слабой диссипации для различных синтезированных (и в процессе синтеза) металлических КТ (Zr, Au, Ni, Co, Fe) в комбинированной системе атомного силового и сканирующего туннельного микроскопа во внешнем электрическом поле. Показано, что для отдельных туннельных ВАХ наблюдается единственный пик при одной из полярностей. Теоретически предсказывается, что амплитуда такого пика слабо нелинейно растет с понижением температуры. В процессе синтеза металлических квантовых точек с изменением полярности вместо нанокластеров можно синтезировать тороидальные структуры (показано на примере «выращивания» Au – QD и Fe – QD). Исследованные эффекты одномерного диссипативного туннелирования позволили разработать авторский метод управляемого роста квантовых точек в комбинированной системе АСМ / СТМ. Получено качественное согласие экспериментальных и теоретических результатов, что позволяет предположить возможность экспериментального наблюдения макроскопических диссипативных туннельных эффектов и тем самым подтвердить гипотезу, высказанную в «пионерских» работах Э. Дж. Леггета, А. И. Ларкина, Ю. Н. Овчинникова и других авторов [1, 2].

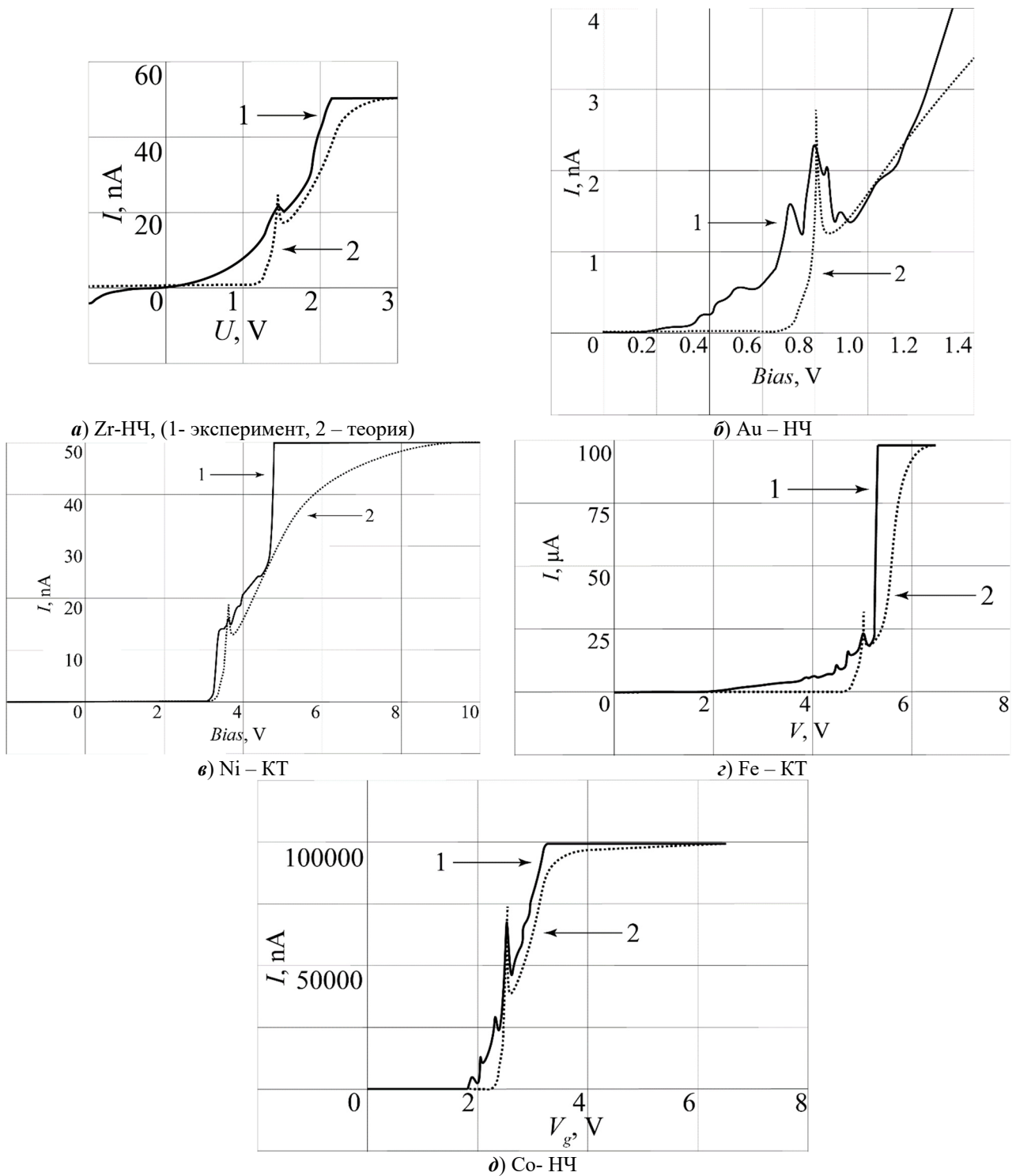


Рис. 1. Сравнение экспериментальных ВАХ для НЧ: (а) Zr, (б) Au, (в) Ni, (г) Fe, (д) Co, с теоретической полевой зависимостью вероятности 1D-диссипативного туннелирования  $\Gamma = B \exp(-S)$

Продемонстрирована термоуправляемость параметров систем с квантовыми точками с учетом диссипации в моделях 1D-систем туннельно-связанных КТ (КМ), моделируемых двухъямным осцилляторным потенциалом, взаимодействующим с термостатом, во внешнем электрическом поле. Выявлен характерный термоуправляемый «пик» на зависимости вероятности туннелирования от параметра асимметрии модельного потенциала (пропорционального величине приложенного электрического поля), обусловленный характерным поведением предэкспоненциального фактора. Найдено аналитическое решение для одноинстантонного (квазиклассического) действия и предэкспоненциального фактора в константе скорости туннельного распада с учетом взаимодействия с выделенной локальной модой осцилляторной среды.



Продемонстрировано качественное соответствие расчетных кривых для вероятности туннелирования с некоторыми экспериментальными ВАХ в схемах исследования управляемых характеристик проводимости металлических квантовых точек в системах с совмещенными СТМ / АСМ. Найдено условие применимости теории, гарантирующее квазистационарное протекание кинетического процесса (экспоненциальное затухание во времени вероятности туннелирования).

Результаты настоящей работы показывают, что развитие нанотехнологии сделали возможным экспериментальное наблюдение эффектов диссипативного туннелирования электронов в искусственных размерно-квантованных наноструктурах.

### Список литературы

1. Caldeira A. O., Leggett A. J. Quantum tunnelling in a dissipative system // *Ann. of Phys.* 1983. Vol. 149, № 2. P. 374–456.
2. Bendersky V. A., Leggett A. J., Ovchinnikov Yu. N. [et al.]. Controlled dissipative tunneling. Tunnel transport in low-dimensional systems : monograph dedicated to the memory of prof. A. I. Larkin ; ed. by A. J. Leggett. M. : Fizmatlit, 2011–2012. 496 p.
3. Larkin A. I., Ovchinnikov Yu. N. Decay of the supercurrent in tunnel junctions // *Physical Review B.* 1983. Vol. 28, № 11. P. 6281–6285.
4. Ivlev B. I., Ovchinnikov Yu. N. Decay of metastable states in a situation with close-lying tunneling trajectories // *Journal of Experimental and Theoretical Physics (JETP).* 1987. Vol. 66, № 2. P. 378–383.
5. Aringazin A. K., Dahnovsky Yu. I., Krevchik V. D. [et al.]. Two-Dimensional Tunnel Correlations With Dissipation // *Physical Review B.* 2003. Vol. 68 (5). doi:10.1103/PhysRevB.68.155426
6. Ovchinnikov Yu. N. Conductivity of granulated metallic films // *JETP.* 2007. Vol. 131, № 2. P. 286–290.
7. Benderskii V. A., Vetoshkin E. V., Trommsdorff H. P., Kats E. I. Competing tunneling trajectories in a two-dimensional potential with variable topology as a model for quantum bifurcations // *Physical Review E.* 2003. Vol. 67. № 2 (2). P. 026102.
8. Dahnovsky Yu, Krevchik V. D., Krivnov V. Ya. [et al.]. Transfer processes in low-dimensional systems. Tokyo : UT Research Institute Press, 2005. 690 p.
9. Zhukovsky V. Ch., Dahnovsky Yu. I., Gorshkov O. N. [et al.]. Observed Two-Dimensional Tunnel Bifurcations in an External Electric Field // *Moscow University Bulletin (Ser. 3, Physics and Astronomy).* 2009. Iss. 5. P. 3–8.
10. Zhukovsky V. Ch., Gorshkov O. N., Krevchik V. D. [et al.]. Controllable dissipative tunneling in an external electric field // *Moscow University Bulletin (Ser. 3, Physics and Astronomy).* 2009. Iss. 1. P. 27–32.
11. Filatov D., Guseinov D., Antonov I. [et al.]. Imaging and spectroscopy of Au nanoclusters in yttria-stabilized zirconia films using ballistic electron/hole emission microscopy // *RSC (Royal Society of Chemistry) Adv.(Advances).* 2014. Vol. 4. P. 57337–57342.
12. Леденцов Н. Н., Устинов В. М., Шукин В. А. [и др.]. Гетероструктуры с квантовыми точками: получение, свойства, лазеры (обзор) // *Физика и техника полупроводников.* 1998. Т. 32, № 4. С. 385–410.
13. Stier O., Grundmann M., Bimberg D. Electronic and optical properties of strained quantum dots modeled by 8-band k-p theory // *Physical Review B.* 1999. Vol. 59, № 8. P. 5688–5703.
14. Karpovich I. A., Zvonkov B. N., Baidus' N. V. [et al.]. Trends in Nanotechnology Research / ed. E. V. Dirote. New York : Nova Science Publishers, 2004. P. 173–208.
15. Kusmartsev F. V., Krevchik V. D., Semenov M. B. [et al.]. Phonon assisted resonant tunnelling and its phonons control // *JETP Letters.* 2016. Vol. 104. P. 392.
16. Антонов Д. А., Новиков А. С., Филатов Д. О. [и др.]. Формирование наноразмерных ферромагнитных филаментов Ni в пленках ZrO<sub>2</sub>(Y) // *Письма в журнал технической физики.* 2021. Т. 47, № 11. С. 30–32.
17. Yanagi H., Ohno T. Nanofabrication of Gold Particles in Glass Films by AFM-Assisted Local Reduction // *Langmuir.* 1999. Vol. 15, № 21. P. 4773–4776.
18. Zoski C. G. Handbook of Electrochemistry. Amsterdam : Elsevier, 2006. 934 p.
19. Bergna H. E., Roberts W. O. Colloidal Silica: Fundamentals and Applications. Boca Raton : CRC Press, 2005. 944 p.
20. Khataee A., Mansoori G. A. Nanostructured Titanium Dioxide Materials: Properties, Preparation, and Applications. Singapore : World Scientific, 2011. 204 p.
21. Yanagi H., Mashiko S., Nagahara L. A. [et al.]. Photoresponsive Formation of Gold Particles in Silica/Titania Sol-Gel Films // *Chem. Mater.* 1998. Vol. 10, № 5. P. 1258–1264.
22. Bard A. J., Faulkner L. R. Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications. Hoboken : Wiley, 2000. 864 p.
23. Quinn M., Mills G. Surface-Mediated Formation of Gold Particles in Basic Methanol // *The Journal of Chemical Physics.* 1994. Vol. 98, № 39. P. 9840–9844.
24. Louis A. A., Sethna J. P. Atomic tunneling from a Scanning-Tunneling or Atomic-Force Microscope tip: Dissipative quantum effects from phonons // *Physical Review Letters.* 1995. Vol. 74, № 8. P. 1363–1366.
25. Fendrich M., Kunstmann T., Paulkowski D., Möller R. Molecular resolution in dynamic force microscopy: topography and dissipation for weakly interacting systems // *Nanotechnology.* 2007. Vol. 18, № 8. P. 084004-1–084004-5. URL: <http://stacks.iop.org/Nano/18/084004>





26. Treveltham T., Kantorovich L., Polesel-Maris J., Gauthier S. Is atomic-scale dissipation in NC-AFM real? Investigation using virtual atomic force microscopy // *Nanotechnology*. 2007. Vol. 18, № 8. P. 084017-1–084017-7. URL: <http://stacks.iop.org/Nano/18/084004>
27. Bychkov A. M., Stace T. M. 0.4 and 0.7 conductance anomalies in quantum point contacts // *Nanotechnology*. 2007. Vol. 18. P. 185403-1–185403-5.
28. Овчинников А. А., Дахновский Ю. И., Кревчик В. Д. [и др.]. Принципы управляемой модуляции низкоразмерных структур : монография. М. : Изд-во УНЦ ДО, 2003. 510 с.
29. Дахновский Ю. И., Овчинников А. А., Семенов М. Б. Низкотемпературные химические реакции как туннельные системы с диссипацией // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 1987. Т. 92, № 3. С. 955–967.
30. Caldeira A. O., Leggett A. J. Influence of dissipation on quantum tunneling in macroscopic systems // *Physical Review Letters*. 1981. Vol. 46, № 4. P. 211–214.
31. Ларкин А. И., Овчинников Ю. Н. Квантовое туннелирование с диссипацией // *Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики*. 1983. Т. 37, № 7. С. 322–325.
32. Тернов И. М., Жуковский В. Ч., Борисов А. В. Квантовая механика и макроскопические эффекты. М. : Изд-во МГУ, 1993. 198 с.
33. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Квантовая механика (нерелятивистская теория). М. : Наука, 1989.
34. Имри Й. Введение в мезоскопическую физику. М. : Физматлит, 2002. 304 с.
35. Dakhnovskii Yu. I., Horia M. Absolute negative resistance in double-barrier heterostructures in a strong laser field // *Physical Review B*. 1995. Vol. 51, № 7. P. 4193–4199.
36. Benderskii V. A., Vetoshkin E. V., Kats E. I., Trommsdorff H. P. Competing tunneling trajectories in a 2D potential with variable topology as a model for quantum bifurcations // *Physical Review E*. 2003. Vol. 67. URL: <http://www.arxiv.org/cond-mat/0209030>
37. Kiselev M. N., Kikoin K., Molenkamp L. W. Resonance Kondo tunneling through a double quantum dot at finite bias // *Physical Review B*. 2003. Vol. 68. URL: <http://arXiv.org/abs/cond-mat/0308619>
38. Benderskii V. A., Makarov D. E., Wight C. A. *Chemical Dynamics at Low Temperatures*. New York : Wiley-Interscience, 1994. 385 p.
39. Арынгазин А. К., Дахновский Ю. И., Жуковский В. Ч. [и др.]. Введение в современную мезоскопию. Пенза : Изд-во ПГУ, 2003. 570 с.
40. Dahnovsky Yu., Krevchik V. D., Semenov M. B. [et al.]. Dissipative tunneling in structures with quantum dots and quantum molecules. URL: <http://arXiv.org/abs/cond-mat/0509119>

## References

1. Caldeira A.O., Leggett A.J. Quantum tunnelling in a dissipative system. *Ann. of Phys.* 1983;149(2):374–456.
2. Bendersky V.A., Leggett A.J., Ovchinnikov Yu.N. et al. *Controlled dissipative tunneling. Tunnel transport in low-dimensional systems: monograph dedicated to the memory of prof. A. I. Larkin; ed. by A. J. Leggett*. Moscow: Fizmatlit, 2011–2012:496.
3. Larkin A.I., Ovchinnikov Yu.N. Decay of the supercurrent in tunnel junctions. *Physical Review B*. 1983;28(11):6281–6285.
4. Ivlev B.I., Ovchinnikov Yu.N. Decay of metastable states in a situation with close-lying tunneling trajectories. *Journal of Experimental and Theoretical Physics (JETP)*. 1987;66(2):378–383.
5. Aringazin A.K., Dahnovsky Yu.I., Krevchik V.D. et al. Two-Dimensional Tunnel Correlations With Dissipation. *Physical Review B*. 2003;68(5). doi:10.1103/PhysRevB.68.155426
6. Ovchinnikov Yu.N. Conductivity of granulated metallic films. *JETP*. 2007;131(2):286–290.
7. Benderskii V.A., Vetoshkin E.V., Trommsdorff H.P., Kats E.I. Competing tunneling trajectories in a two-dimensional potential with variable topology as a model for quantum bifurcations. *Physical Review E*. 2003;67(2):026102.
8. Dahnovsky Yu, Krevchik V.D., Krivnov V.Ya. et al. *Transfer processes in low-dimensional systems*. Tokyo: UT Research Institute Press, 2005:690.
9. Zhukovsky V.Ch., Dahnovsky Yu.I., Gorshkov O.N. et al. Observed Two-Dimensional Tunnel Bifurcations in an External Electric Field. *Moscow University Bulletin (Ser. 3, Physics and Astronomy)*. 2009;(5):3–8.
10. Zhukovsky V.Ch., Gorshkov O.N., Krevchik V.D. et al. Controllable dissipative tunneling in an external electric field. *Moscow University Bulletin (Ser. 3, Physics and Astronomy)*. 2009;(1):27–32.
11. Filatov D., Guseinov D., Antonov I. et al. Imaging and spectroscopy of Au nanoclusters in yttria-stabilized zirconia films using ballistic electron/hole emission microscopy. *RSC (Royal Society of Chemistry) Adv.(Advances)*. 2014;4:57337–57342.
12. Ledentsov N.N., Ustinov V.M., Shchukin V.A. et al. Quantum dot heterostructures: Fabrication, properties, lasers (A review). *Fizika i tekhnika poluprovodnikov = Semiconductor Physics and Technology*. 1998;32(4):385–410. (In Russ.)
13. Stier O., Grundmann M., Bimberg D. Electronic and optical properties of strained quantum dots modeled by 8-band k·p theory. *Physical Review B*. 1999;59(8):5688–5703.



14. Karpovich I.A., Zvonkov B.N., Baidus' N.V. et al. *Trends in Nanotechnology Research* / ed. E. V. Dirote. New York: Nova Science Publishers, 2004:173–208.
15. Kusmartsev F.V., Krevchik V.D., Semenov M.B. et al. Phonon assisted resonant tunnelling and its phonons control. *JETP Letters*. 2016;104:392.
16. Antonov D.A., Novikov A.S., Filatov D.O. et al. The Formation of Nanosized Ferromagnetic Ni Filaments in Films of  $ZrO_2(Y)$ . *Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoy fiziki = Technical Physics Letters*. 2021;47(11):30–32. (In Russ.)
17. Yanagi H., Ohno T. Nanofabrication of Gold Particles in Glass Films by AFM-Assisted Local Reduction. *Langmuir*. 1999;15(21):4773–4776.
18. Zoski C.G. *Handbook of Electrochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 2006:934.
19. Bergna H.E., Roberts W.O. *Colloidal Silica: Fundamentals and Applications*. Boca Raton: CRC Press, 2005:944.
20. Khataee A., Mansoori G.A. *Nanostructured Titanium Dioxide Materials: Properties, Preparation, and Applications*. Singapore: World Scientific, 2011:204.
21. Yanagi H., Mashiko S., Nagahara L.A. et al. Photoresponsive Formation of Gold Particles in Silica/Titania Sol-Gel Films. *Chem. Mater*. 1998;10(5):1258–1264.
22. Bard A.J., Faulkner L.R. *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications*. Hoboken: Wiley, 2000:864.
23. Quinn M., Mills G. Surface-Mediated Formation of Gold Particles in Basic Methanol. *The Journal of Chemical Physics*. 1994;98(39):9840–9844.
24. Louis A.A., Sethna J.P. Atomic tunneling from a Scanning-Tunneling or Atomic-Force Microscope tip: Dissipative quantum effects from phonons. *Physical Review Letters*. 1995;74(8):1363–1366.
25. Fendrich M., Kunstmann T., Paulkowski D., Möller R. Molecular resolution in dynamic force microscopy: topography and dissipation for weakly interacting systems. *Nanotechnology*. 2007;18(8):084004-1–084004-5. Available at: <http://stacks.iop.org/Nano/18/084004>
26. Trevelyan T., Kantorovich L., Polesel-Maris J., Gauthier S. Is atomic-scale dissipation in NC-AFM real? Investigation using virtual atomic force microscopy. *Nanotechnology*. 2007;18(8):084017-1–084017-7. Available at: <http://stacks.iop.org/Nano/18/084004>
27. Bychkov A.M., Stace T.M. 0.4 and 0.7 conductance anomalies in quantum point contacts. *Nanotechnology*. 2007;18:185403-1–185403-5.
28. Ovchinnikov A.A., Dakhnovskiy Yu.I., Krevchik V.D. et al. *Printsipy upravlyaemoy modulyatsii nizkorazmernykh struktur: monografiya = Principles of controlled modulation of low-dimensional structures: A monograph*. Moscow: Izd-vo UNTs DO, 2003:510. (In Russ.)
29. Dakhnovskiy Yu.I., Ovchinnikov A.A., Semenov M.B. Low-temperature chemical reactions considered as dissipative tunnel systems. *Zhurnal eksperimental'noy i teoreticheskoy fiziki = Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 1987;92(3):955–967. (In Russ.)
30. Caldeira A.O., Leggett A.J. Influence of dissipation on quantum tunneling in macroscopic systems. *Physical Review Letters*. 1981;46(4):211–214.
31. Larkin A.I., Ovchinnikov Yu.N. Quantum tunneling with dissipation. *Pis'ma v zhurnal eksperimental'noy i teoreticheskoy fiziki = Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*. 1983;37(7):322–325. (In Russ.)
32. Ternov I.M., Zhukovskiy V.Ch., Borisov A.V. *Kvantovaya mekhanika i makroskopicheskie efekty = Quantum mechanics and macroscopic effects*. Moscow: Izd-vo MGU, 1993:198. (In Russ.)
33. Landau L.D., Lifshits E.M. *Kvantovaya mekhanika (nerelyativistskaya teoriya) = Quantum mechanics (non-relativistic theory)*. Moscow: Nauka, 1989. (In Russ.)
34. Imry Y. *Vvedenie v mezoskopicheskuyu fiziku = Introduction to mesoscopic physics*. Moscow: Fizmatlit, 2002:304. (In Russ.)
35. Dakhnovskii Yu.I., Horia M. Absolute negative resistance in double-barrier heterostructures in a strong laser field. *Physical Review B*. 1995;51(7):4193–4199.
36. Benderskii V.A., Vetoshkin E.V., Kats E.I., Trommsdorff H.P. Competing tunneling trajectories in a 2D potential with variable topology as a model for quantum bifurcations. *Physical Review E*. 2003;67. Available at: <http://www.arxiv.org/cond-mat/0209030>
37. Kiselev M.N., Kikoin K., Molenkamp L.W. Resonance Kondo tunneling through a double quantum dot at finite bias. *Physical Review B*. 2003;68. Available at: <http://arXiv.org/abs/cond-mat/0308619>
38. Benderskii V.A., Makarov D.E., Wight C.A. *Chemical Dynamics at Low Temperatures*. New York: Wiley-Interscience, 1994:385.
39. Aryngazin A.K., Dakhnovskiy Yu.I., Zhukovskiy V.Ch. et al. *Vvedenie v sovremennuyu mezoskopiku = Introduction to modern mesoscopics*. Penza: Izd-vo PGU, 2003:570. (In Russ.)
40. Dakhnovskiy Yu., Krevchik V.D., Semenov M.B. et al. *Dissipative tunneling in structures with quantum dots and quantum molecules*. Available at: <http://arXiv.org/abs/cond-mat/0509119>

Поступила в редакцию / Received 10.03.2022

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 17.04.2022

Принята к публикации / Accepted 05.05.2022