

Заключение диссертационного совета МГУ.01.12
по диссертации на соискание ученой степени доктора наук

Решение диссертационного совета от 13 сентября 2018 г., № 1

О присуждении Крупенину Владимиру Александровичу, гражданину РФ, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Одноэлектронные наноструктуры и устройства на их основе» по специальности 01.04.04 – «физическая электроника» принята к защите диссертационным советом 31 мая 2018 г., протокол № 1П.

Соискатель Крупенин Владимир Александрович, 1955 года рождения, диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук «Экспериментальное исследование зарядовых флуктуаций и взаимного влияния элементов в одноэлектронных структурах» защитил в 1998 году, в диссертационном совете на базе Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Соискатель работает ведущим научным сотрудником лаборатории «Криоэлектроника» кафедры полупроводников физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Диссертация выполнена в лаборатории «Криоэлектроника» кафедры полупроводников физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Официальные оппоненты:

Лукичев Владимир Федорович, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, директор Физико-технологического института РАН,

Суетин Николай Владиславович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела микроэлектроники НИИЯФ МГУ имени М.В. Ломоносова,

Илюшин Александр Сергеевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики твердого тела физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова дали положительные отзывы на диссертацию.

Соискатель имеет 78 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 36 работ, из них 30 статей, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ.

Основные публикации:

1. A.B. Zorin, F.-J. Ahlers, J. Niemeyer, T. Weimann, H. Wolf, S.V. Lotkhov, Krupenin V.A., Background charge noise in metallic single-electron tunneling devices. // Phys. Rev. B, 53, 13682 (1996).

2. Крупенин В.А., С. В. Лотхов, Д. Е. Преснов, Факторы нестабильности одноэлектронной памяти при низких температурах в структурах типа $\text{Al}/\text{AlO}_x/\text{Al}$. // ЖЭТФ 111 (1), 344 (1996).
V. A. Krupenin, S. V. Lotkhov, and D. E. Presnov. Instability of single-electron memory at low temperatures in $\text{Al}/\text{AlO}_x/\text{Al}$ structures. JETP, 84(1), 190 (1997).
3. T. Weimann, H. Wolf, H. Scherer, Krupenin V.A., J. Niemeyer, Metallic single electron devices fabricated using a multilayer technique. // Appl. Phys. Lett., 71, 713 (1997).
4. H. Wolf, F.-J. Ahlers, J. Niemeyer, H. Scherer, T. Weimann, A.B. Zorin, Krupenin V.A., S.V. Lotkhov, D.E. Presnov, Investigation of the offset charge noise in single electron tunneling devices. // IEEE Trans. on Instr. & Meas., 46 (2), 303 (1997).
5. Th. Weimann, H. Scherer, H. Wolf, V.A. Krupenin and J. Niemeyer, A New Technology for Metallic Multilayer Single Electron Tunneling Devices. // Microelectronic Engineering, 41(42), 559 (1998).
6. Крупенин В.А., С.В. Лотхов, Х. Шерер, Т. Вайманн, А.Б. Зорин, Ф.-Й. Алерс, Й. Нимайер, Х. Вольф, Зондирование динамических зарядовых состояний с помощью одноэлектронных туннельных транзисторов. // УФН 168 (2), 219 (1998).
V.A. Krupenin, S.V. Lotkhov, H. Scherer, A.B. Zorin, F.J. Ahlers, J. Niemeyer and H. Wolf, Sensing of Dynamic Charge States Using Single-Electron Tunneling Transistors. // Physics-Uspekhi (Russia) 41, 204 (1998).
7. A.B. Zorin, Yu.A. Pashkin, Krupenin V.A., H. Scherer, Coulomb Blockade Electrometer Based on Single Cooper Pair Tunneling. // Applied Superconductivity (Elsevier) 6 (7-9), 453 (1998).
8. Krupenin V.A., D.E. Presnov, M.N. Savvateev, H. Scherer, A.B. Zorin, J. Niemeyer, Noise in Al Single Electron Transistors of Stacked Design. // J. Appl. Phys. 84(6), 3212 (1998).
9. Krupenin V.A., S.V. Lotkhov, H. Scherer, Th. Weimann, A.B. Zorin, F.-J. Ahlers, J. Niemeyer, H. Wolf, Charging and Heating Effects in a System of Coupled Single-electron Devices. // Phys. Rev. B 59(16), 10778 (1999).
10. A.B. Zorin, S.V. Lotkhov, Yu.A. Pashkin, Krupenin V.A., H. Zangerle, Th. Weimann, H. Scherer, J. Niemeyer, Highly Sensitive Electrometers based on Single Cooper Pair Tunneling. // Journal of Superconductivity (Plenum) 12(6), 747 (1999).
11. Krupenin V.A., D.E. Presnov, A.B. Zorin, J. Niemeyer, Aluminum Single Electron Transistors with Islands Isolated from the Substrate. // J. Low Temp. Phys. 118(5-6), 287 (2000).
12. Krupenin V.A., D.E. Presnov, A.B. Zorin, J. Niemeyer, A Very Low Noise Single Electron Electrometer of Stacked-Junction Geometry. // Physica B, 284, 1800 (2000).
13. V.A. Krupenin, A.B. Zorin, M.N. Savvateev, D.E. Presnov, J. Niemeyer, Single-electron transistor with metallic microstrips instead of tunnel junctions. // J. Appl. Phys., 90 (5), 2411 (2001).

14. T. Weimann, H. Scherer, V.A. Krupenin et al., Four-angle evaporation method for the preparation of single electron tunneling devices. // *Microelectronic Engineering*, 57(8), 915 (2001).
15. V.A. Krupenin, A.B. Zorin, D.E. Presnov, M.N. Savvateev, J. Niemeyer, Metallic single-electron transistor without traditional tunnel barriers. // *Physics-Uspekhi (Russia)* 44, Supplement 171(10), 113 (2001).
16. Klaffs T., Krupenin V.A., Weis J, et al, Eddy currents in the integer quantum Hall regime spatially resolved by multiple single-electron transistor electrometers. // *Physica E* 22 (1-3), 737 (2004).
17. V.A. Krupenin, D.E. Presnov, V.O. Zalunin, S.A. Vasenko, A.B. Zorin, Strongly asymmetric single-electron transistor operating as zero-biased electrometer. // *Письма в ЖЭТФ*, 82(2), 77 (2005).
- V.A. Krupenin, D.E. Presnov, V.O. Zalunin, S.A. Vasenko, A.B. Zorin, Strongly asymmetric single-electron transistor operating as zero-biased electrometer. // *JETP Letters*, 82(2), 82 (2005).
18. Krupenin V.A., Zalunin V.O., Zorin A.B. The peculiarities of single-electron transport in granular Cr films. // *Microelectronic Engineering* 81 (2-4), 217 (2005).
19. В.О. Залунин, В.А. Крупенин, С.А. Васенко, and А.Б. Зорин. Моделирование одноэлектронных транспортных процессов в тонких гранулированных хромовых пленках. // *Письма в ЖЭТФ*, 91(8) 436 (2010).
- V.O. Zalunin, V.A. Krupenin, S.A. Vasenko, and A.B. Zorin. Simulation of single-electron transport processes in thin granulated chromium films. // *JETP Letters*, 91(8) 402 (2010).
20. S. A. Dagesyan, V. V. Shorokhov, D. E. Presnov, E. S. Soldatov, A. S. Trifonov, and V. A. Krupenin. Sequential reduction of the silicon single-electron transistor structure to atomic scale. // *Nanotechnology*, 28, 225304 (2017).
21. V. V. Shorokhov, D. E. Presnov, S. V. Amitonov, Yu A. Pashkin, and V. A. Krupenin. Single-electron tunneling through an individual arsenic dopant in silicon. // *Nanoscale*, 9, 613 (2017).

На диссертацию и автореферат поступило 3 отзыва, все положительные.

Выбор официальных оппонентов обосновывался тем, что они являются специалистами в области физической электроники и имеют публикации по указанной тематике.

Диссертационный совет отмечает, что представленная диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук является научно-квалификационной работой, в которой решена важная научная проблема разработки наноэлектронных устройств широкого спектра применения, работающих на новых физических принципах.

Диссертация представляет собой самостоятельное законченное исследование, обладающее внутренним единством. Положения, выносимые на защиту, содержат новые научные результаты и свидетельствуют о личном вкладе автора в науку:

1. Низкочастотные зарядовые шумы одноэлектронных транзисторов, острова которых расположены друг от друга на расстоянии порядка 150-200 нм, имеют коэффициент корреляции $\sim 15\div 20\%$. Разработанная теоретическая модель показывает, что зарядовый уровень шума исследуемых образцов транзисторов - $(2.5\div 5.5)\times 10^{-4} e/\text{Гц}^{1/2}$ - при наблюдаемом и расчетном ($13\div 22\%$) коэффициентах корреляции определяется в основном источниками шума в подложках (SiO_2 , Al_2O_3).
2. Эффекты взаимного влияния в системе близкорасположенных одноэлектронных транзисторов, острова которых расположены друг от друга на расстояниях порядка $150\div 200$ нм, определяются флуктуационным и тепловым механизмами их взаимодействия. Данные эксперимента и разработанная теоретическая модель позволяют определить электронную и фононную температуры острова транзистора-электрометра в результате теплового ($0.03\div 1.2$ пВт) и флуктуационного воздействий транзисторов, удаленных от него на $150\div 200$ нм, а также константу электрон-фононного взаимодействия Σ_{Al} для Al ($\Sigma_{Al} = 0.23$ нВт/град⁵/мкм³).
3. Уменьшение площади контакта острова одноэлектронного транзистора с диэлектрической подложкой приводит к уменьшению низкочастотного ($f < 100$ Гц) зарядового $1/f$ шума устройства. Впервые предложенная стековая геометрия одноэлектронного транзистора уменьшает на порядок уровень зарядового шума за счет ослабления влияния источников шума, расположенных в подложке, и позволяет достичь крайне низкого значения — $2.5\times 10^{-5} e/\text{Гц}^{1/2}$ на частоте 10 Гц.
4. Разработанная и впервые продемонстрированная конструкция одноэлектронного транзистора с островом, полностью изолированным от контакта с подложкой, исключает шумовое воздействие подложки и более чем на порядок уменьшает уровень низкочастотного зарядового шума транзистора до значения - $8\times 10^{-6} e/\text{Гц}^{1/2}$, близкого к теоретическому пределу устройства - $3\times 10^{-6} e/\text{Гц}^{1/2}$.
5. Одноатомные одноэлектронные транзисторы на основе единичных примесных атомов мышьяка и фосфора в кремнии, изготовленные на основе разработанного оригинального метода из неравномерно легированного кремния на изоляторе, обладают предельно малым размером острова (~ 3 нм), определяемым эффективным радиусом верхней по энергии электронной оболочки примесного атома. Измеренные диаграммы стабильности транзистора позволяют определить величину характерной зарядовой энергии ($E_C = 16$ мэВ), расстояния между одночастичными энергетическими уровнями (0.98 мэВ, 0.99 мэВ, 1.18 мэВ), собственную емкость зарядового центра ($C \approx 5\times 10^{-18}$ Ф).

На основании защиты диссертации и опубликованных работ по теме диссертации на заседании 13 сентября 2018 г. диссертационный совет принял решение присудить Крупенину В.А. ученую степень доктора физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 5 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 23 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за присуждение ученой степени – 17, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель
диссертационного совета,
профессор

Федянин А.А.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доцент

Карташов И.Н.