

Заключение диссертационного совета МГУ.01.05
по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук

Решение диссертационного совета от «28» октября 2020 г. № 7.

О присуждении Щеголеву Андрею Евгеньевичу, гражданину РФ, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Разработка элементной базы для сверхпроводниковых искусственных нейронных сетей на основе макроскопических квантовых эффектов» по специальности 01.04.15 – «Физика и технология наноструктур, атомная и молекулярная физика» принята к защите диссертационным советом 09 сентября 2020 года, протокол № 3.

Соискатель – Щеголев Андрей Евгеньевич, 1993 года рождения, в 2017 году соискатель окончил ФГБОУ ВО Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова по направлению «Физика». С 2017 г. по настоящее время соискатель учится в аспирантуре физического факультета Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Соискатель работает в Научно-исследовательском институте ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова в отделе микроэлектроники в должности младшего научного сотрудника.

Диссертация выполнена на кафедре атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники Физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент Кленов Николай Викторович, доцент кафедры атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники Физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

Официальные оппоненты:

1) Васенко Андрей Сергеевич – доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский институт электроники и математики им. А.Н. Тихонова Национального исследовательского университета «Высшая

школа экономики», Научно-учебная лаборатория квантовой наноэлектроники, профессор, заместитель заведующего кафедрой;

2) Корнеев Александр Александрович – доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский педагогический государственный университет», профессор кафедры общей и экспериментальной физики Института физики, технологии и информационных систем;

3) Мухин Сергей Иванович – доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС", профессор, заведующий кафедрой теоретической физики и квантовых технологий
– дали положительные отзывы на диссертацию.

Соискатель имеет 16 опубликованных работ, в том числе, по теме диссертации 15 работ, из них 11 статей, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 01.04.15 – «Физика и технология наноструктур, атомная и молекулярная физика». Основные работы по теме диссертации:

1. I. I. Soloviev, N. V. Klenov, A. E. Schegolev, S. V. Bakurskiy, and M. Y. Kupriyanov, "Analytical derivation of DC SQUID response," Superconductor Science and Technology, vol. 29, no. 9, p. 094005, 2016. DOI: 10.1088/0953-2048/29/9/094005. Impact Factor: 2.878 Q2
2. A. E. Schegolev, N. V. Klenov, I. I. Soloviev, and M. V. Tereshonok, "Adiabatic superconducting cells for ultra-low-power artificial neural networks," Beilstein journal of nanotechnology, vol. 7, pp. 1397–1403, 2016. DOI: 10.3762/bjnano.7.130. Impact Factor: 3.127 Q1
3. N. V. Klenov, A. E. Schegolev, I. I. Soloviev, S. V. Bakurskiy, and M. V. Tereshonok, "Energy efficient superconducting neural networks for high-speed intellectual data processing systems," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 28, no. 7, pp. 1301006–1–1301006–6, 2018. DOI: 10.1109/TASC.2018.2836903. Impact factor: 1.750 Q3

4. I. I. Soloviev, A. E. Schegolev, N. V. Klenov, S. V. Bakurskiy, M. Y. Kupriyanov, M. V. Tereshonok, A. V. Shadrin, V. S. Stolyarov, and A. A. Golubov, "Adiabatic superconducting artificial neural network: Basic cells," *Journal of Applied Physics*, vol. 124, p. 152113, 2018. DOI: 10.1063/1.5042147. Impact factor: 2.367 Q2
5. A. V. Bogatskaya, A. Schegolev, N. Klenov, and A. Popov, "Generation of coherent and spatially squeezed states of an electromagnetic beam in a planar inhomogeneous dielectric waveguide," *Photonics*, 2019, vol. 6, no. 3, p. 84. DOI: 10.3390/photonics6030084. Impact factor: 2.140 Q2
6. A. E. Shchegolev, A. M. Popov, A. V. Bogatskaya, P. M. Nikiforova, M. V. Tereshonok, and N. V. Klenov, "Detection of terahertz, mid- and near infrared radiation by a multilayer metal–insulator heterostructure," *JETP Letters*, vol. 111, no. 7, pp. 371–375, 2020. DOI: 10.1134/S0021364020070103. Impact factor: 1.413 Q3
7. S. Bakurskiy, M. Kupriyanov, N. Klenov, I. Soloviev, A. Schegolev, R. Morari, Y. Khaydukov, and A. Sidorenko, "Controlling the proximity in a Co/Nb multilayer: the properties of electronic transport," *Beilstein journal of nanotechnology*, vol. 11, no. 1, p. 1336-1345, 2020. DOI: 10.3762/bjnano.11.118. Impact Factor: 2.442 Q2

На автореферат и диссертацию поступило 3 дополнительных отзыва, все положительные.

Выбор официальных оппонентов обосновывался их высокой квалификацией и наличием публикаций за последние 5 лет в области физики и технологии наноструктур, атомной и молекулярной физики.

Диссертационный совет отмечает, что представленная диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований содержится решение задач, связанных с разработкой энергоэффективной элементной базы сверхпроводниковых искусственных нейронных сетей. Для разработки использовались макроскопические квантовые эффекты, присущие сверхпроводниковой джозефсоновской микроэлектронике. Впервые разработана и изучена сверхпроводниковая

ячейка, позволяющая реализовывать аналог производной сигмоидной функции активации. Впервые проведено моделирование работы нейронных сетей, основанных на разработанных сверхпроводниковых нейронах и ячейке обучения, дана оценка их быстродействия и энергоэффективности. Полученные результаты вносят значительный вклад в развитие исследований по физике и технологии наноструктур в России.

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. Нейрон для сверхпроводниковой ИНС (искусственной нейронной сети) типа персептрон с сигмоидальной активационной функцией может быть создан на основе шунтированного индуктивностью сверхпроводящего квантового интерферометра, содержащего джозефсоновский контакт. Вычисление активационной функции производится за один такт. При длительности одной операции порядка 3-4 мкс можно добиться выделения энергии, не превышающего 3-4 зДж.

2. Нейрон для сверхпроводниковой ИНС типа РБФ-сеть (сеть на радиально-базисных функциях) может быть создан на основе шунтированного индуктивностью сверхпроводящего квантового интерферометра, содержащего два джозефсоновских контакта. Вычисление активационной функции производится за один такт.

3. Синапс для сверхпроводниковой ИНС может быть создан на основе сверхпроводящего квантового интерферометра, содержащего два магнитных джозефсоновских контакта, и шунтированного индуктивностью. Джозефсоновские контакты могут быть заменены на «управляемые» кинетические индуктивности тонких сверхпроводящих слоев, управление в которых достигается за счет контролируемого эффекта близости. Такое решение обеспечивает линейность преобразования для сигнала в виде

магнитного потока.

4. Обучающая ячейка для сверхпроводниковой ИНС типа персептрон может быть создана на основе шунтированного индуктивностью сверхпроводящего квантового интерферометра, содержащего два джозефсоновских контакта. Вычисление передаточной характеристики производится за один такт. Использование предложенной обучающей ячейки обеспечивает длительность одной эпохи обучения 1 нс при выделении энергии, не превышающем 10 зДж за эпоху.

5. Эффективная связь между элементами нейросети может быть реализована на основе волновода с контролируемыми вариациями диэлектрической проницаемости вдоль направления распространения импульса электромагнитного поля при характерном поперечном размере волновода примерно в 10 раз больше области локализации волнового пакета.

На заседании 28 октября 2020 г. диссертационный совет принял решение присудить Щеголеву А.Е. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 9 докторов наук по специальности диссертации, участвовавших в заседании, из 20 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 17, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Зам. председателя ДС МГУ.01.05,
д.ф.-м.н., профессор

А.Т. Рахимов

Ученый секретарь ДС МГУ.01.05,
к.ф.-м.н.

Н.А. Власова

28 октября 2020 г.

Ученый секретарь
Ученого Совета НИИЯФ МГУ,
канд. физ.-мат. наук

Е.А. Сигаева