



Российская Академия Наук

НАНОФИЗИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Труды XXVIII
Международного симпозиума

11–15 марта 2024 года

Том 1

Нижний Новгород
2024

НАНОФИЗИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Труды XXVIII Международного симпозиума

11–15 марта 2024 г., Нижний Новгород

Том 1

Секция 1

Сверхпроводящие наносистемы

Секция 2

Магнитные наноструктуры

Секция 5

Многослойная и кристаллическая рентгеновская оптика

Нижний Новгород
ИПФ РАН
2024

УДК 538.9(063)
ББК 22.37я431
32.844.2я431
Н-25

Н-25 Нанопизика и нанозлектроника. Труды XXVIII Международного симпозиума (Нижний Новгород, 11–15 марта 2024 г.). В 2 томах. Том 1-й. — Нижний Новгород : ИПФ РАН, 2024. — 560 с.
ISBN 978-5-8048-0123-7

Организаторы

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Отделение физических наук РАН
Научный совет РАН по физике полупроводников
Научный совет РАН по физике конденсированных сред
Институт физики микроструктур РАН
Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского
Благотворительный фонд «От сердца к сердцу»

Программный комитет

А. В. Акимов, к.ф.-м.н.
А. Ю. Аладышкин, д.ф.-м.н.
В. В. Бельков, д.ф.-м.н.
И. С. Бурмистров, д.ф.-м.н.
В. А. Бушуев, д.ф.-м.н.
В. А. Быков, д.т.н.
В. А. Волков, д.ф.-м.н.
В. И. Гавриленко, д.ф.-м.н.
С. В. Гапонов, академик РАН
А. Б. Грановский, д.ф.-м.н.
К. Н. Ельцов, д.ф.-м.н.
С. В. Зайцев-Зотов, д.ф.-м.н.
С. В. Иванов, д.ф.-м.н.
Е. Л. Ивченко, чл.-корр. РАН
В. В. Кведер, академик РАН
З. Ф. Красильник, чл.-корр. РАН
И. В. Кукушкин, академик РАН
В. Д. Кулаковский, академик РАН
А. В. Латышев, академик РАН
А. С. Мельников, д.ф.-м.н.
М. А. Миляев, д.ф.-м.н.
В. Л. Миронов, д.ф.-м.н.
С. В. Морозов, д.ф.-м.н.
С. А. Никитов, чл.-корр. РАН
А. В. Новиков, д.ф.-м.н.
Д. В. Рощупкин, д.ф.-м.н.
В. В. Рязанов, д.ф.-м.н.
А. В. Садовников, к.ф.-м.н.
Н. Н. Салашенко, чл.-корр. РАН
М. В. Сапожников, д.ф.-м.н.
А. А. Саранин, чл.-корр. РАН
Д. А. Татарский, к.ф.-м.н.
Ю. А. Филимонов, д.ф.-м.н.
А. А. Фраерман, д.ф.-м.н.
Д. Р. Хохлов, чл.-корр. РАН
А. В. Чаплик, академик РАН
Н. И. Чхало, д.ф.-м.н.
Т. В. Шубина, д.ф.-м.н.

РКЦ, ФИАН им. П. Н. Лебедева РАН, Москва
ИФМ РАН, Нижний Новгород
ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН, Черноголовка
МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва
NT-MDT Spectrum Instruments, Москва
ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, Москва
ИФМ РАН, Нижний Новгород
ИФМ РАН, Нижний Новгород
МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва
ИОФ им. А. М. Прохорова РАН, Москва
ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, Москва
ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
ИФТТ РАН, Черноголовка
ИФМ РАН, Нижний Новгород, председатель
ИФТТ РАН, Черноголовка
ИФТТ РАН, Черноголовка
ИФП СО РАН им. А. В. Ржанова, Новосибирск
ИФМ РАН, Нижний Новгород
ИФМ УрО РАН им. М. Н. Михеева, Екатеринбург
ИФМ РАН, Нижний Новгород
ИФМ РАН, Нижний Новгород
ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, Москва
ИФМ РАН, Нижний Новгород
ИПТМ РАН, Черноголовка
ИФТТ РАН, Черноголовка
СГУ им. Н. Г. Чернышевского, Саратов
ИФМ РАН, Нижний Новгород
ИФМ РАН, Нижний Новгород
ИАПУ ДВО РАН, Владивосток
ИФМ РАН, Нижний Новгород, учёный секретарь
Саратовский филиал ИРЭ РАН, Саратов
ИФМ РАН, Нижний Новгород
МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва
ИФП СО РАН им. А. В. Ржанова, Новосибирск
ИФМ РАН, Нижний Новгород
ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

Организационный комитет

А. В. Новиков
В. Г. Беллюстина
М. В. Зорина
А. В. Иконников
Д. А. Камелин
Р. С. Малофеев
М. С. Михайленко
С. В. Морозов
Е. Н. Садова
Е. Е. Пестов

ИФМ РАН, Нижний Новгород, председатель
ИФМ РАН, Нижний Новгород
ИФМ РАН, Нижний Новгород
МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва
ИФМ РАН, Нижний Новгород
ИФМ РАН, Нижний Новгород
ИФМ РАН, Нижний Новгород
ИФМ РАН, Нижний Новгород
ИФМ РАН, Нижний Новгород
ИФМ РАН, Нижний Новгород
ИФМ РАН, Нижний Новгород

ISBN 978-5-8048-0123-7

ББК 22.37я431
32.844.2я431
© ИПФ РАН, 2024
© ИФМ РАН, 2024

Прогресс в разработке, проектировании и изготовлении джозефсоновских нейросетей

Н. В. Кленов^{1,2,*}, А. Е. Щеголев³, И. И. Соловьев^{2,3}, С. В. Бакурский^{2,3},
М. В. Бастракова⁴, М. Ю. Куприянов³

¹МГУ им. М. В. Ломоносова, Физический факультет, Ленинские горы, 1, Москва, 119991

²Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский пр., 4, Москва, 119049

³МГУ им. М. В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына, Ленинские горы, 1, 119991

⁴Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603022

*nvklenov@mail.ru

В работе разбираются проблемы разработки, создания и применения сверхпроводниковых нейронных сетей: обсуждается актуальность такого подхода к реализации нейроморфных вычислительных систем; разбираются известные подходы к созданию сверхпроводниковых нейросетей; обсуждаются особенности функционирования биоподобных (спайковых) нейронов, аксонов и синапсов, выделяются ограничения в функционале существующих элементов и предлагаются способы его расширения; рассматриваются ключевые элементы адиабатических сверхпроводниковых нейросетей (сигма- и гаусс-нейроны, обучающие ячейки, синапсы); анализируется возможность функционирования ячеек адиабатических сверхпроводниковых нейросетей в квантовом режиме.

Введение

В современных условиях стремительного прогресса в области информационно-телекоммуникационных технологий и активного развития систем искусственного интеллекта постепенно появляются нейроморфные решения, реализованные на аппаратном, а не на программном уровне.

Существует ряд задач, где требуется сочетание высокой скорости работы и энергоэффективности от элементной базы упомянутых нейроморфных решений. Примером таких задач является сигнальный сопроцессор, предназначенный для обработки сложных сигналов, получаемых с квантового компьютера или матриц квантовых детекторов. Нейросетевой подход позволяет оперативно выделять и обрабатывать характерные паттерны в таких данных.

В настоящее время ведутся активные работы по созданию как оптимальных нейроморфных архитектур специализированных процессоров, так и по замене их полупроводниковой элементной базы альтернативными компонентами. Это связано с трудностями, возникающими при реализации базовых элементов нейросетей, таких как нейроны и синапсы, на основе цепей транзисторной логики – каждый элемент требует десятка транзисторов, что значительно ограничивает уровень сложности создаваемой схемы, и одновременно с этим сами схемы характеризуются избыточным количеством элементов и невысокой энергоэффективностью.

Еще более проблематичным выглядит использование полупроводниковых компонент в гибридных вычислительных системах вместе со сверхпроводниковыми квантовыми процессорами. Ввиду необходимости управления и считывания состояний кубитов при помощи полупроводниковых со-процессоров через высокочастотные кабели, увеличение количества элементов в квантовом процессоре для проведения более сложных и масштабных вычислений пропорционально увеличивает тепловую нагрузку на систему охлаждения. Большая длина кабелей увеличивает время реализации протоколов, таких как протокол коррекции ошибок. В результате такое гибридное решение (совмещение полупроводниковой и сверх-

проводниковой элементных баз) приводит к ограничению на быстродействие системы и ограничивает сверху количество выполняемых операций, ухудшает ее энергоэффективность и значительно увеличивает стоимость устройства в целом.

Решением может стать переход к новой, более энергоэффективной технологии, представляющей также возможность функционирования схем при сверхнизких температурах.

Адиабатические джозефсоновские нейросети

За последние 10 лет были предложены, исследованы и спроектированы базовые элементы нейронных сетей (как простейшего персептрона, так и сети на радиальных базисных функциях, RBF-сети) на основе концепций самой энергоэффективной на сегодняшний день адиабатической сверхпроводниковой логики (ASL, Adiabatic Superconductor Logic). Базовой ячейкой в данном подходе является давно известный одно- (для персептрона) и двухконтактный (для RBF-сети) сверхпроводящий джозефсоновский интерферометр, известный также как «адиабатический квантовый потоковый параметрон». Информация в таком потоковом параметроне закодирована через направление циркуляции магнитного потока внутри сверхпроводящего контура ячейки. Для передачи магнитного потока определенного направления от одной ячейки к другой связанные через трансформаторы элементы последовательно смешаются током питания, причем оказалось, что можно подобрать вид и параметры интерферометра так, чтобы передаточная характеристика имела подходящий для нейросетей (сигмоидальный) вид. Экспериментально измеренное энергопотребление адиабатического квантового параметрона при передаче информации с тактовой частотой 5 ГГц составило 10^{-20} Дж, что на порядок меньше характерной энергии переключения джозефсоновского контакта в обычных схемах джозефсоновской быстрой однокубитной логики (RSFQ-логики) и на пять порядков меньше характерной энергии, потребляемой полупроводниковым транзистором.

Также удалось продемонстрировать, что предложенная адиабатическая сверхпроводящая логическая ячейка может функционировать в качестве вспомогательного кубита, сохраняя при этом свою «классическую» функциональность как элемента сети типа персептрон. Би-функциональные ячейки, которые могут действовать как адиабатические нейроны или кубиты, потенциально могут быть использованы для «экономии» места на гибридных квантово-классических чипах, а также для моделирования работы неклассического мозга.

Спайковые джозефсоновские нейросети

Спайковые нейронные сети (СНС) – третье поколение нейронных моделей, наиболее близко имитирующие биологическую активность нервной ткани и кодирующее информацию последовательностями спайков. Реализация СНС весьма востребована как для высокоскоростного моделирования нервной активности биологических живых тканей, так и для систем реального времени, необходимых для создания и совершенствования двунаправленных интерфейсов «мозг-компьютер».

Изучение разработанного в МГУ спайкового нейрона на основе трех джозефсоновских контактов (3JJ) позволило обнаружить удобный механизм переключения между режимами функционирования путем изменения величины тока смещения при фиксированных значениях остальных ключевых параметров системы, таких как геометрический размер джозефсоновских контактов (отвечает за значение критического тока контакта, его емкость и параметр демпфирования) и величины индуктивных элементов. В отличие от предложенного ранее двухконтактного спайкового нейрона разработанный у нас трехконтактный спайковый нейрон позволяет не только работать в широком диапазоне значений параметров джозефсоновских структур, но и устанавливать нужный режим работы: режим нормального функционирования (regular mode), режим «взрывной активности» (bursting mode), режим травмированного нейрона (injury mode) и «мертвый», или спящий, режим (dead mode).

Для передачи сигнала (spike trains) от одного спайкового нейрона к другому были разработаны сверхпроводниковые аналоги аксона и синапса, роли которых исполняют джозефсоновская линия передачи (Josephson Transmission Line, JTL) и RLCJ-фильтр (RLC-фильтр, к которому параллельно подключен джозефсоновский контакт). JTL является хорошо известным решением в RSFQ-схемотехнике и используется для передачи импульсов напряжения (в нашем

случае спайков) от одного блока к другому (или от одного нейрона к другому). Выбор модифицированного RLC-фильтра обоснован тем, что для решаемых задач необходима нелинейная функция пропускания приходящего сигнала для имитации синаптической пластичности – STDP (Spike-timing-dependent plasticity): чем реже приходят импульсы напряжения, тем с меньшей вероятностью они должны проходить через синапс к следующему нейрону, и наоборот, чем чаще приходят, тем в большем количестве проходят. Другими словами, частотная характеристика фильтра должна быть таковой, чтобы выше определенной частоты следования импульсов (ω_{STDP}) все импульсы проходили через синапс, а меньше – либо проходили редко, либо не проходили совсем, а обычный RLC-фильтр до проведенной нами модернизации не обладал подходящей амплитудно-частотной характеристикой.

С использованием двух 3JJ спайковых нейронов, JTL и RLCJ-фильтра была продемонстрирована передача спайковых последовательностей от одного нейрона к другому.

Выводы

Можно сделать вывод, что, несмотря на значительное количество проблем, сверхпроводящие нейроны, будь то адиабатические или биоподобные, находятся в процессе превращения из фундаментальной концепции в применяемые на практике устройства.

Финансирование

Моделирование работы квантово-классических нейроморфных ячеек выполнено при поддержке гранта РНФ № 22-72-10075. Исследование биоподобных ячеек проводилось при поддержке программы «Приоритет-2030» (грант НИТУ МИСИС № K2-2022-029). А. Ш. благодарит Фонд развития теоретической физики и математики «БАЗИС» (грант 22-1-3-16-1).

Литература

1. M. M. Islam, et al. // Journal of Applied Physics. 2023. V. 133, № 7. P. 070701.
2. A. E. Schegolev, N. V. Klenov, I. I. Soloviev, M. V. Tereshonok // Superconductor Science and Technology. 2021. V. 34, no. 1. P. 015006.
3. D. S. Pashin, P. V. Pikunov, M. V. Bastrakova, et al. // Beilstein journal of nanotechnology. 2023. V. 14. P. 1116–1126.
4. A. E. Schegolev, N. V. Klenov, G. I. Gubochkin, et al. // Nanomaterials. 2023. V. 13, no. 14. P. 2101.