

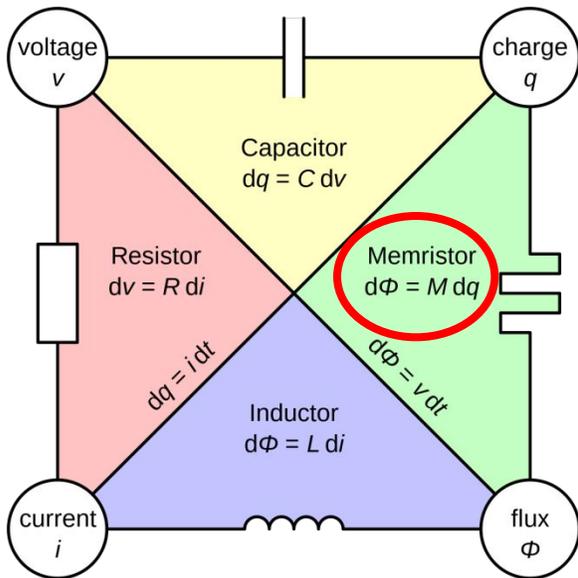
# Нелинейные мемристивные системы: механизмы, технологии, применения

Михайлов Алексей Николаевич

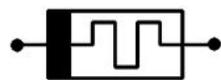
- Введение - мемристоривные системы и их применения
- Дорожные карты в области мемристоривных систем
- Технология мемристоривных устройств
- Микроскопические механизмы
- Мемристор как сложная макроскопическая система
- Применения в технологиях ИИ

- Введение - мемристивные системы и их применения**
- Дорожные карты в области мемристивных систем
- Технология мемристивных устройств
- Микроскопические механизмы
- Мемристор как сложная макроскопическая система
- Применения в технологиях ИИ

## ИСХОДНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ



$$v(t) = M(q(t))i(t)$$



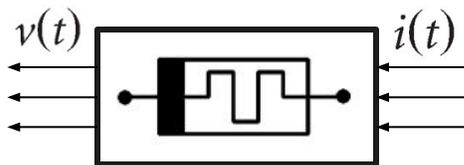
$$M(q) \equiv d\phi(q)/dq$$

L.O. Chua. IEEE Trans. Circuit Theory **18**, 507 (1971)

## ОБОБЩЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ

$$v = \mathcal{R}(w, i)i$$

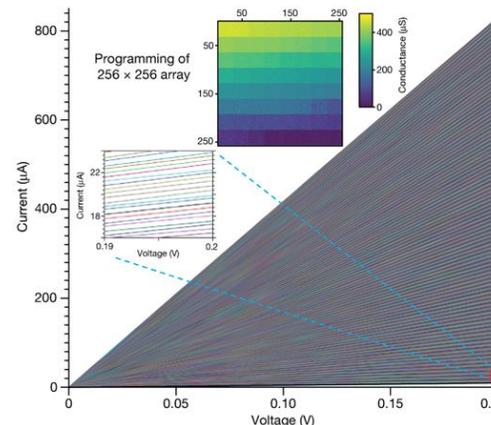
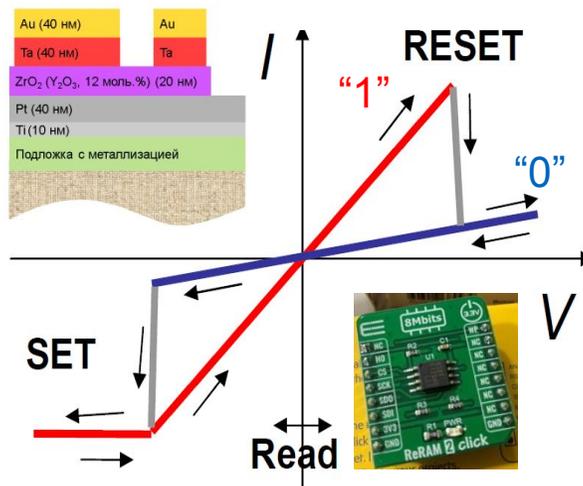
$$\frac{dw}{dt} = f(w, i)$$



L.O. Chua, S.M. Kang. IEEE Proc. **64**, 209 (1976)

## ОСНОВНЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ

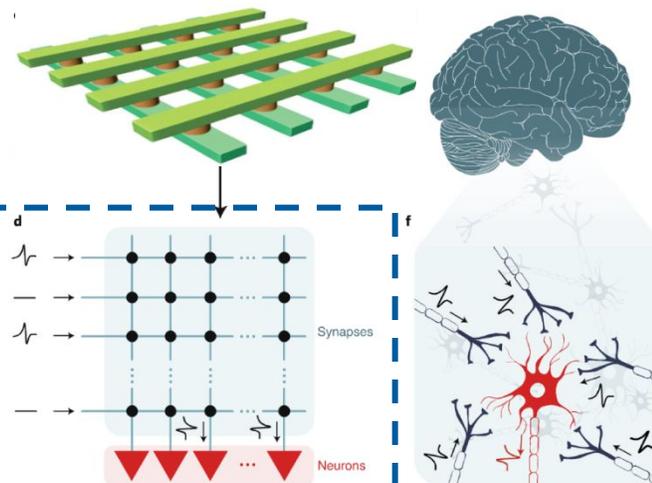
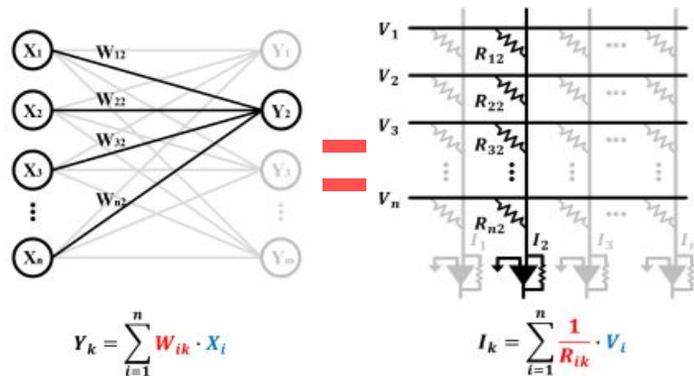
### Резистивная память (RRAM) и вычисления «в памяти»



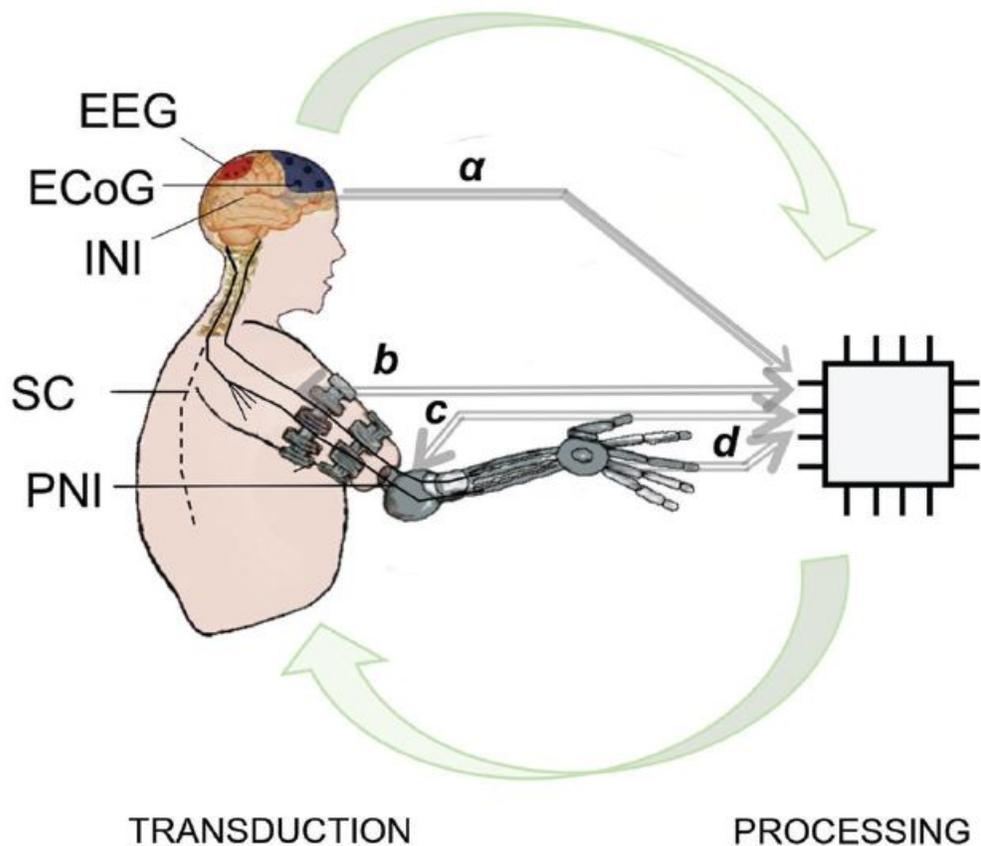
M. Rao et al. Nature **615**, 823 (2023)

### Нейроморфные вычислительные системы

#### Векторно-матричное умножение

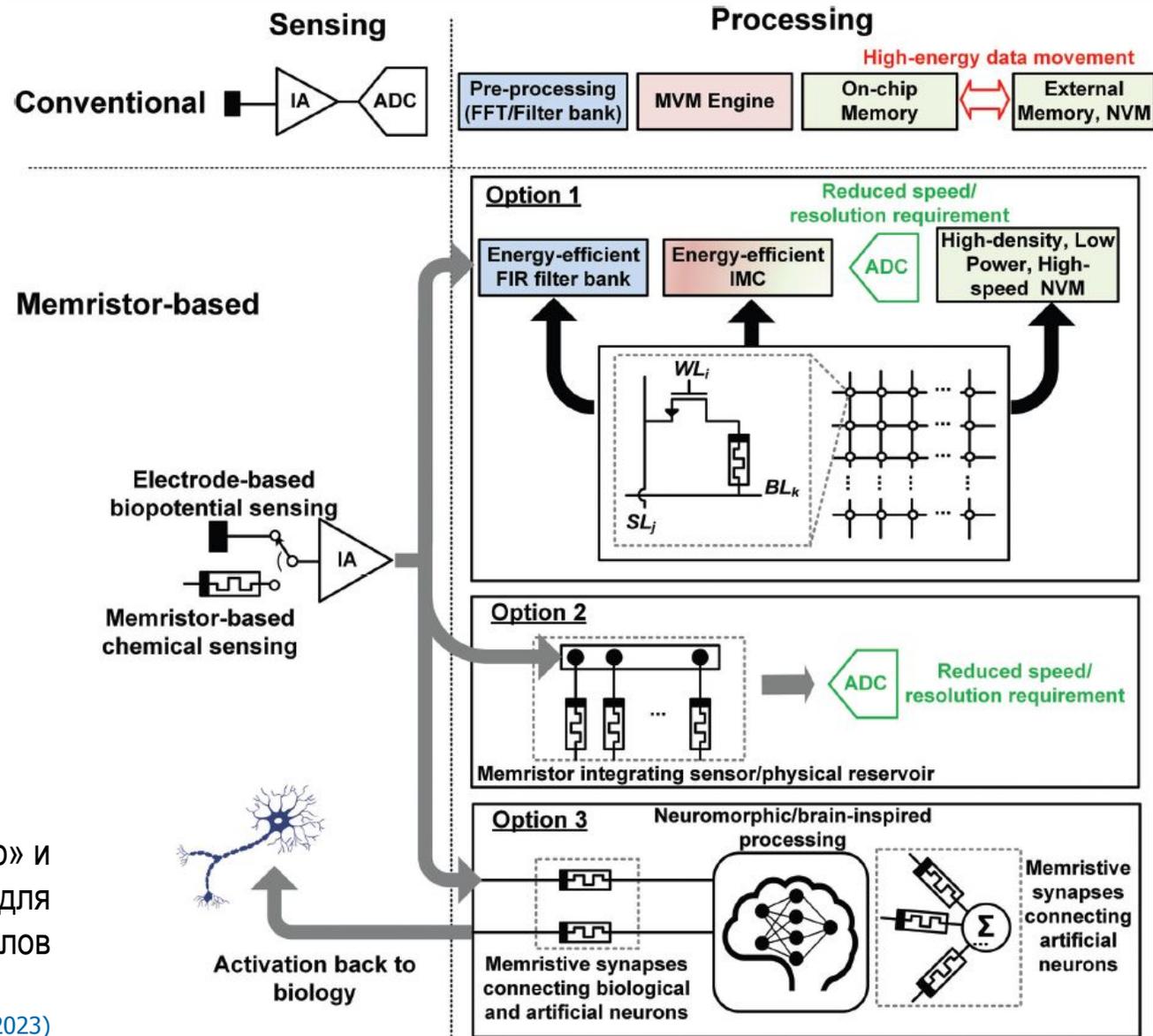


W. Zhang et al. Nature Electron. **3**, 371 (2020)

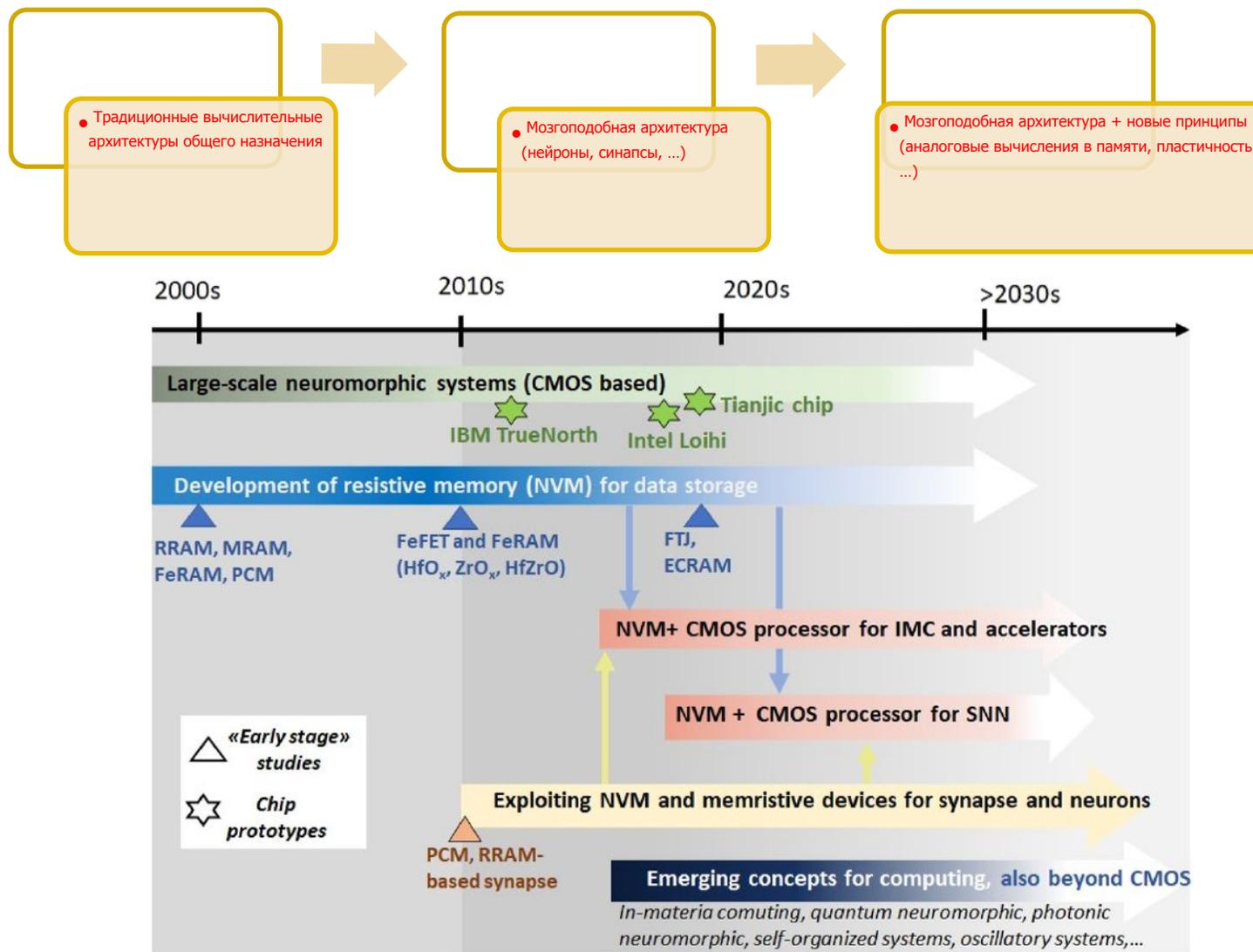


Парадигма двунаправленного интерфейса «мозг-компьютер» и сравнение традиционных и мемристивных систем для регистрации и обработки биологических сигналов

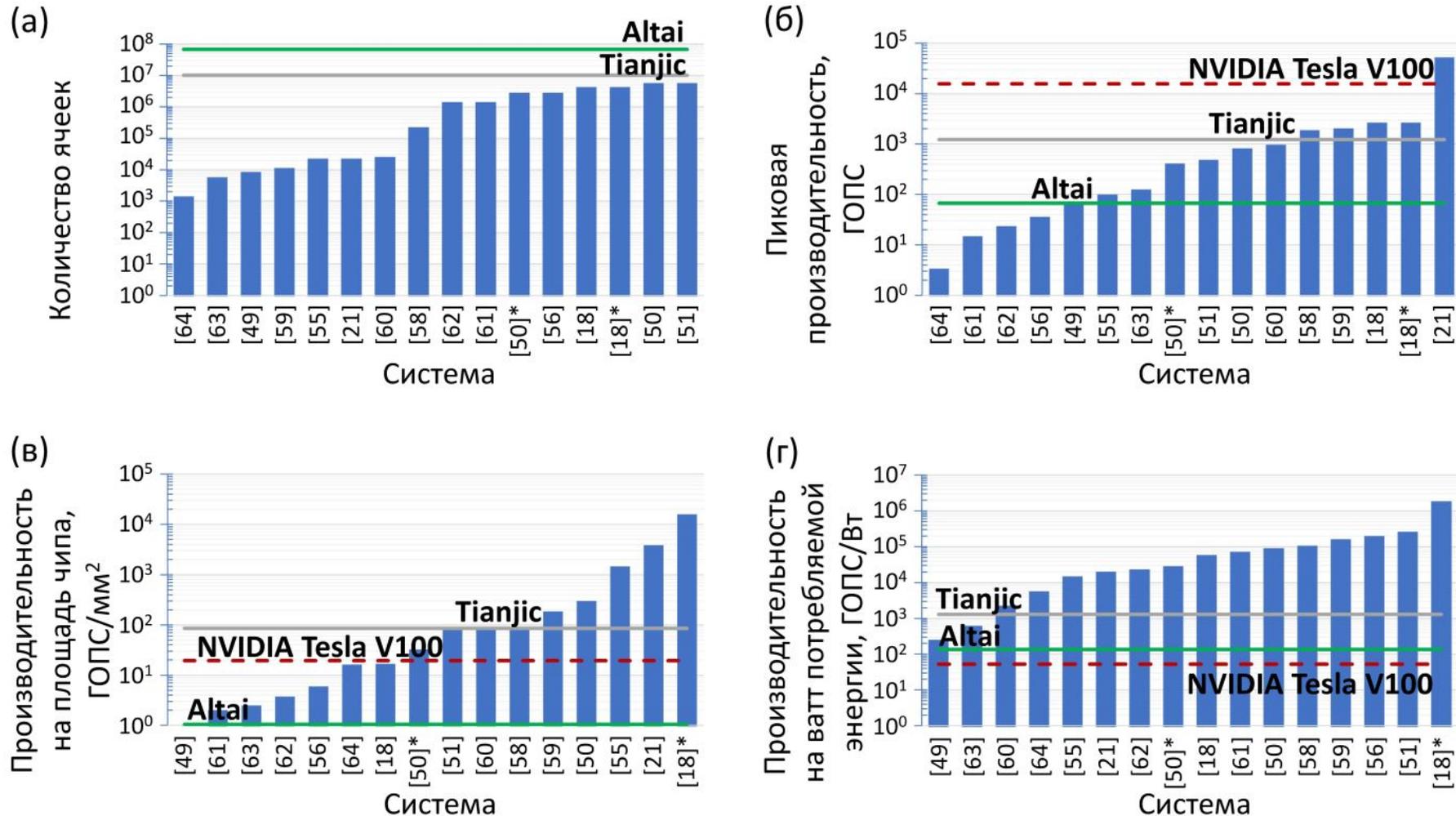
I. Tzouvadaki et al. *Advanced Materials* 2210035 (2023)



- Введение - мемристивные системы и их применения
- **Дорожные карты в области мемристивных систем**
- Технология мемристивных устройств
- Микроскопические механизмы
- Мемристор как сложная макроскопическая система
- Применения в технологиях ИИ



Roadmap to Neuromorphic Computing with Emerging Technologies



Сравнение вычислительных систем на основе мемристоров (столбцы диаграмм) с нейроморфными (горизонтальные сплошные линии) и графическим (горизонтальная пунктирная линия) процессорами на основе традиционной ЭКБ по следующим критериям: количество ячеек (а), пиковая производительность (б), производительность на площадь чипа (в) и производительность на ватт потребляемой энергии (г)



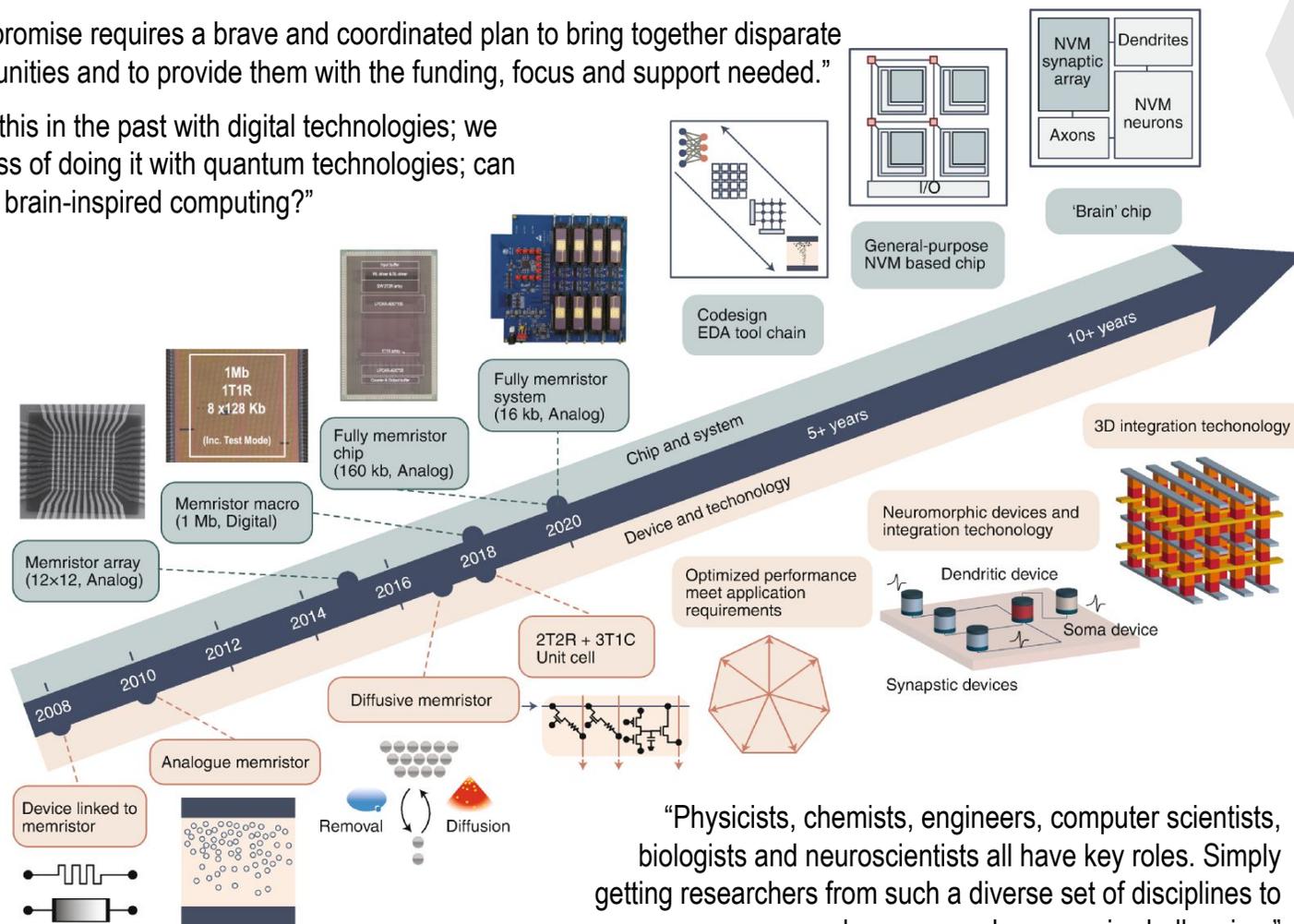
## Perspective

## Brain-inspired computing needs a master plan

Nature | Vol 604 | 14 April 2022 | 255

“To realize this promise requires a brave and coordinated plan to bring together disparate research communities and to provide them with the funding, focus and support needed.”

“We have done this in the past with digital technologies; we are in the process of doing it with quantum technologies; can we now do it for brain-inspired computing?”



“Physicists, chemists, engineers, computer scientists, biologists and neuroscientists all have key roles. Simply getting researchers from such a diverse set of disciplines to speak a common language is challenging.”

## Прототип 2022 года:

**48 нейросинаптических ядер**  
**3 миллиона ячеек 1T1M**  
**130 нм – проектные нормы**

Cross-layer co-optimization

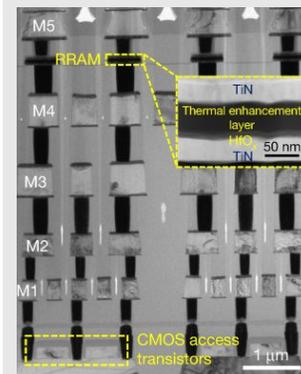
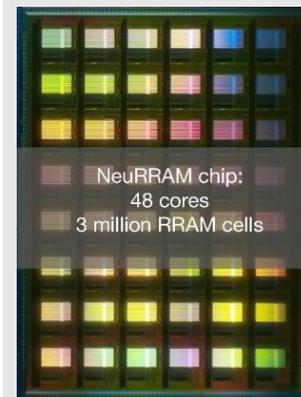
Algorithm  
Model-driven chip calibration and chip-driven model training and fine-tuning

System  
Multi-core parallel operation and flexible weight mapping

Architecture  
Transposable neurosynaptic array enables versatile dataflow directions

Circuit  
Voltage-mode neuron with variable computational bit-precisions and activation functions

Technology  
Monolithically integrated analogue RRAM and CMOS







Мемристорный проект – это комплекс взаимосвязанных междисциплинарных исследований и разработок на разных уровнях

**Уровень систем**

- Микросхемы
- Аналоговые цифровые схемы
- Моделирование
- CADP и САПР
- Алгоритмы
- Архитектуры

**Уровень устройств**

- Контактные схемы
- Управляющие элементы
- Исполнительные элементы
- Интегральные микросхемы

**Уровень материалов**

- Инженерные материалы
- Локальные интегральные свойства
- Многомасштабное моделирование



## Научная программа Национального центра физики и математики (НЦФМ)

### Направление 9 «Искусственный интеллект и большие данные в технических, промышленных, природных и социальных системах»

#### Проект 9.1 «Нейроэлектроника – интеллектуальные нейроморфные и нейрогибридные системы на основе новой электронной компонентной базы»

**Цель проекта до 2025 года:** разработка подходов к решению фундаментальных проблем, сопровождающих создание и применение новой элементной базы информационно-вычислительных систем на основе принципов функционирования элементов биологических нейронных сетей для поддержки развития и массового внедрения технологий искусственного интеллекта, машинного обучения и медицинских нейротехнологий

#### **Задачи проекта до 2025 года:**

- 1) разработка и моделирование новой элементной базы микро- и наноэлектроники (КМОП-совместимых мемристивных устройств);
- 2) разработка и исследование базовой технологии энергонезависимой резистивной памяти RRAM на основе мемристивных устройств, в том числе на предмет стойкости к ионизирующему и дефектообразующему воздействию;
- 3) разработка нейроморфных информационно-вычислительных систем на основе мемристивных устройств;
- 4) исследование принципов организации и адаптивной реорганизации функциональной структуры биологических нейронных сетей;
- 5) разработка нейрогибридных систем на основе новой элементной базы микро- и наноэлектроники;
- 6) разработка и апробация научно-технических решений по созданию новых информационно-вычислительных систем на базе технологических партнеров

#### **Консорциум:**

**ННГУ**  
Курчатовский  
институт  
МИ ВлГУ  
БФУ

**ЮФУ**

**ЛЭТИ**  
**ИФМ РАН**  
**ИПТМ РАН**

**РФЯЦ-ВНИИЭФ**  
(НИИИС, ИЯРФ, КБ-2)  
**НИИМЭ**



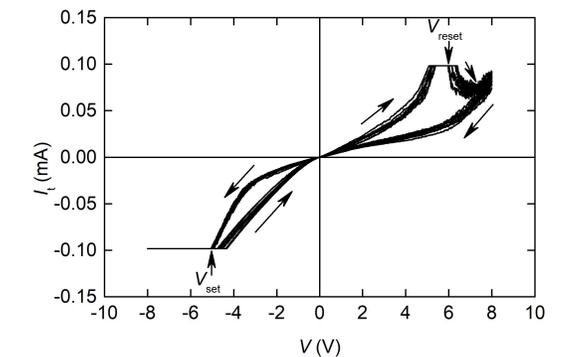
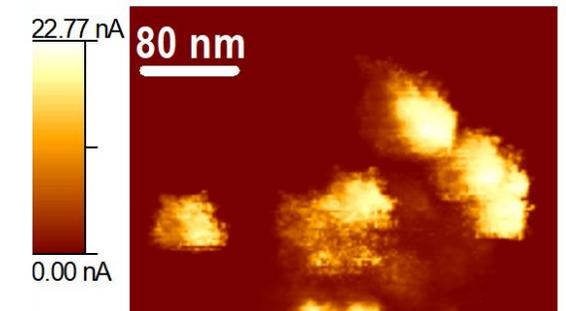
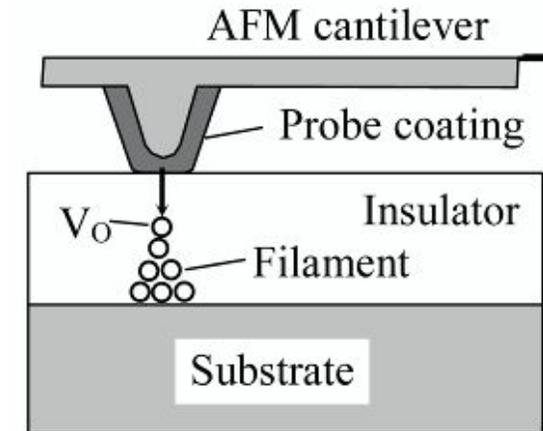
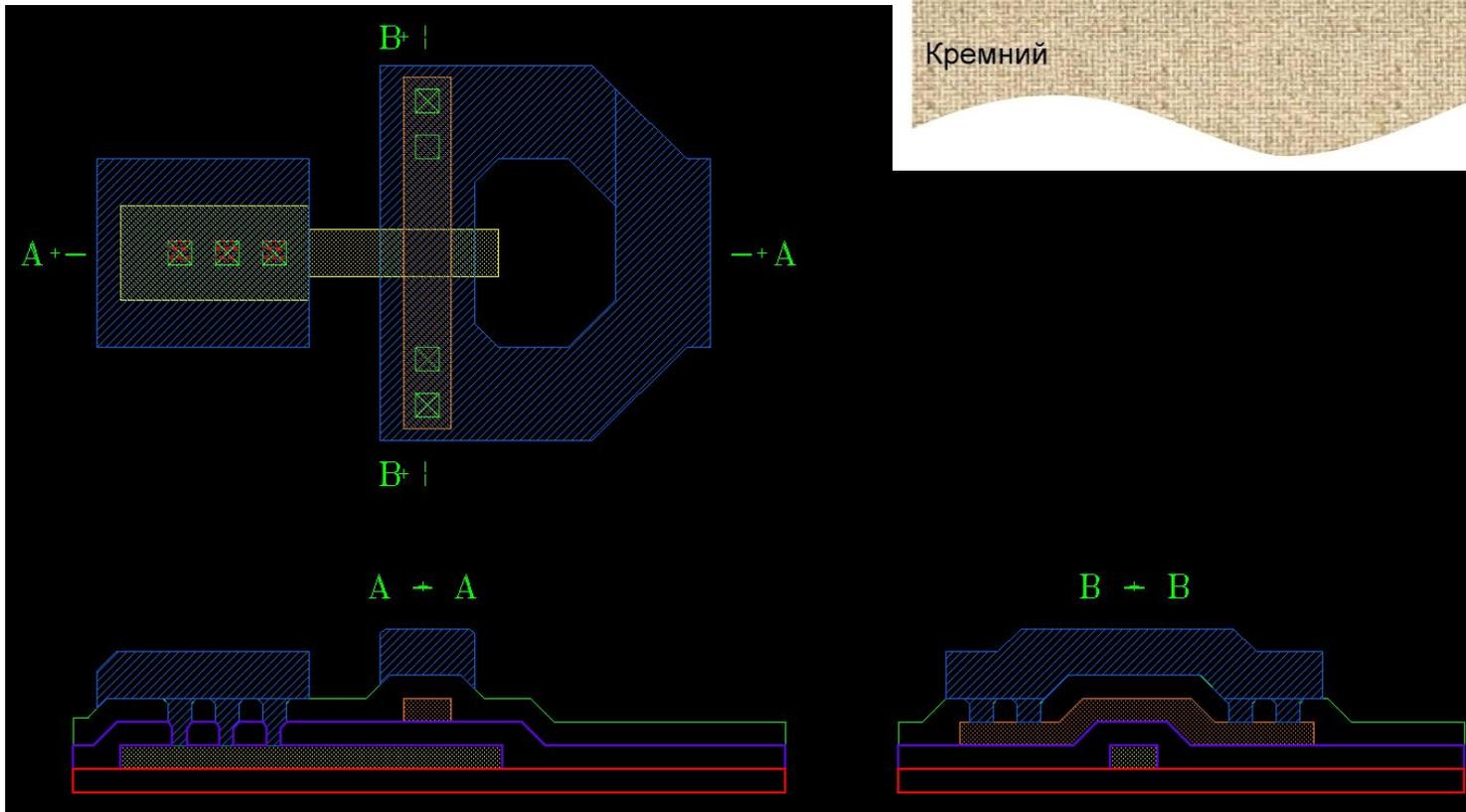
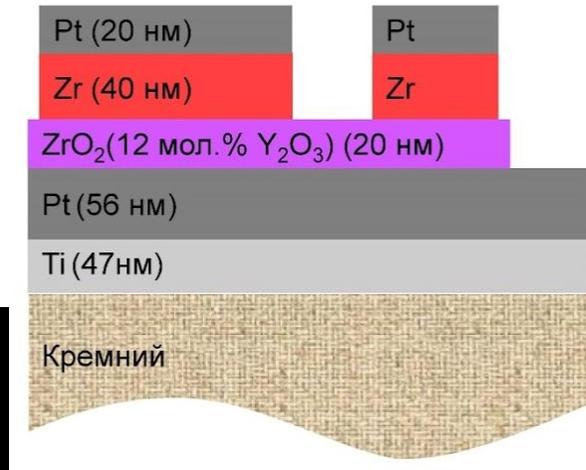
- Введение - мемристивные системы и их применения
- Дорожные карты в области мемристивных систем
- **Технология мемристивных устройств**
- Микроскопические механизмы
- Мемристор как сложная макроскопическая система
- Применения в технологиях ИИ



Два основных поколения технологии используются на разных стадиях исследований и разработок

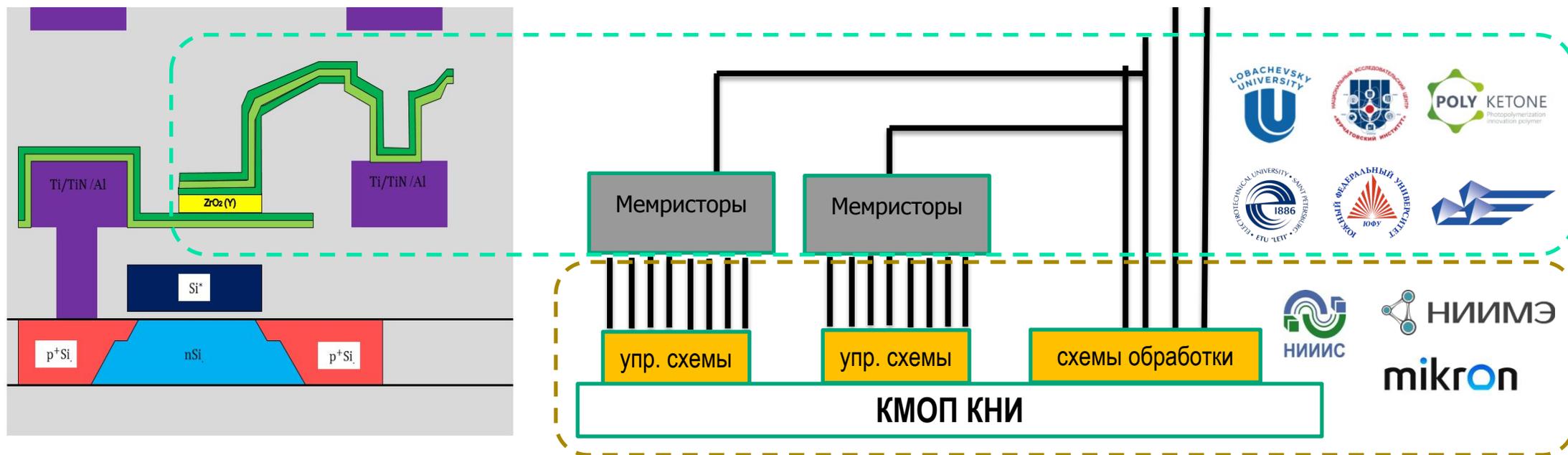
### Пленки и тонкопленочные структуры

- апробация технологических операций
- изучение электрофизических свойств
- определение параметров и механизмов резистивного переключения, необходимых для моделирования



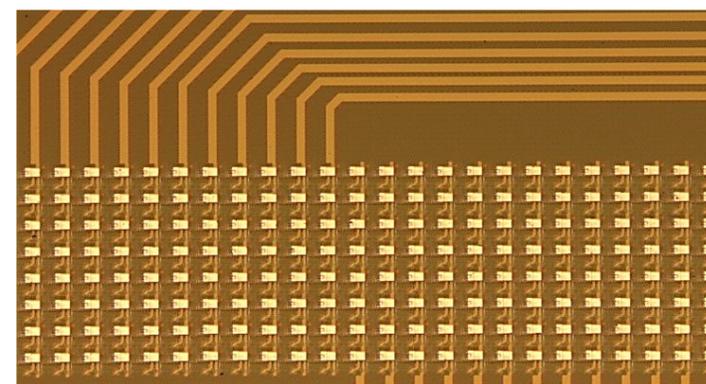
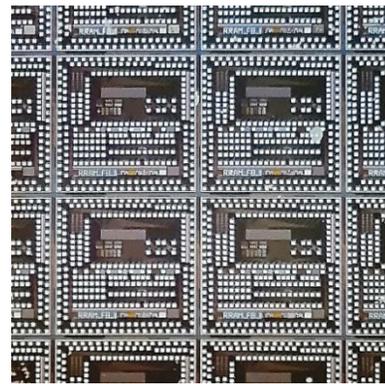
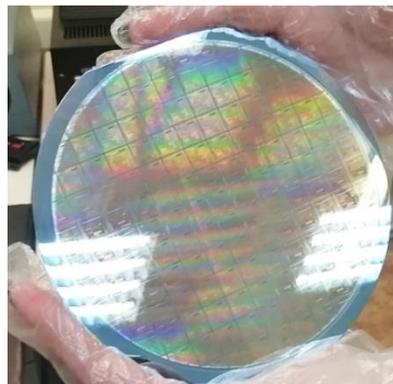


В рамках проекта реализуется общий подход к КМОП-интеграции мемристовых структур, который включает проектирование и изготовление приборного слоя со схемами КМОП на базе технологических партнеров, проектирование и изготовление мемристовых структур и функциональных блоков RRAM в верхних слоях металлизации на базе академических партнеров



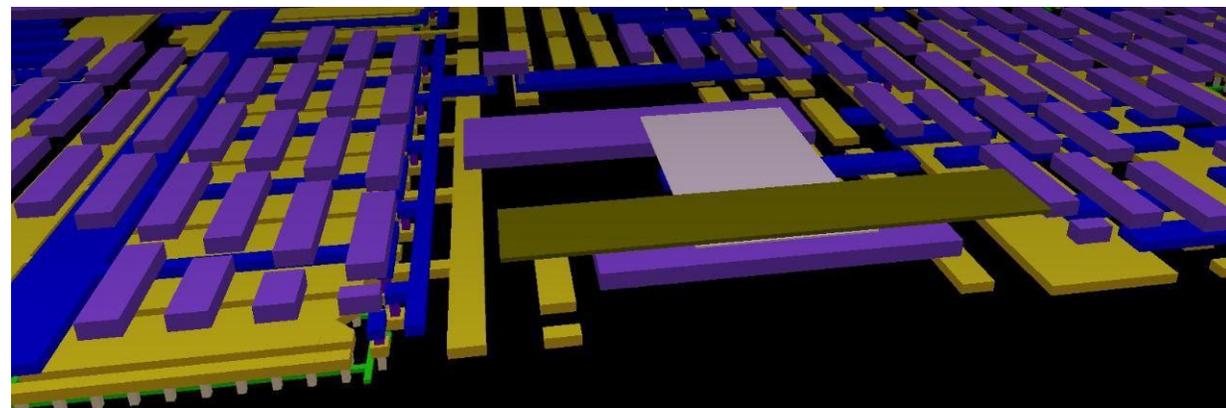
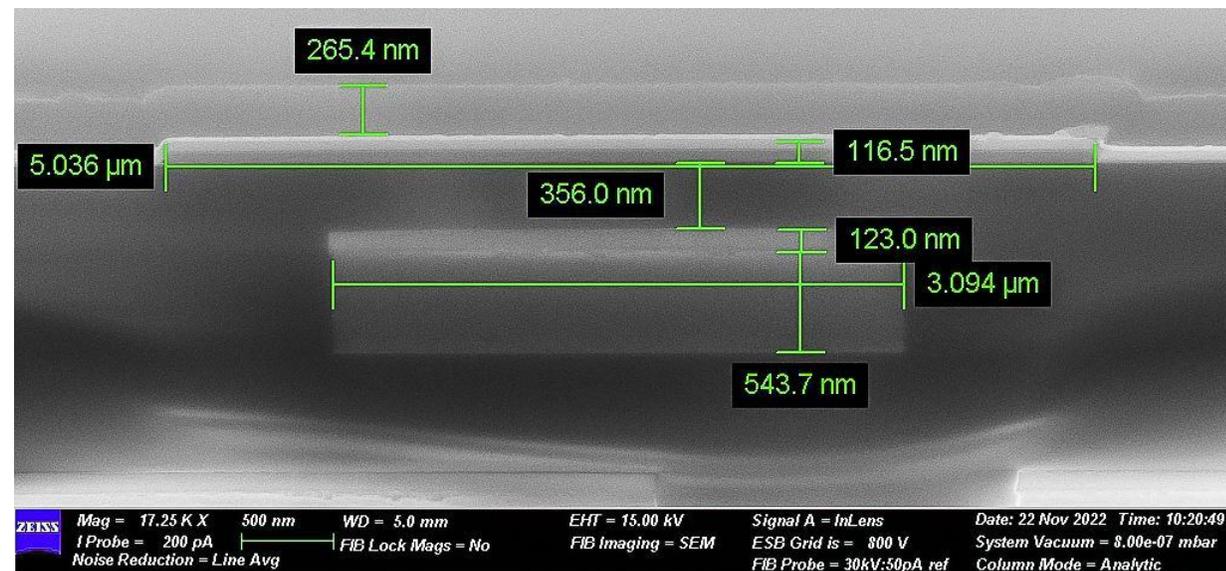
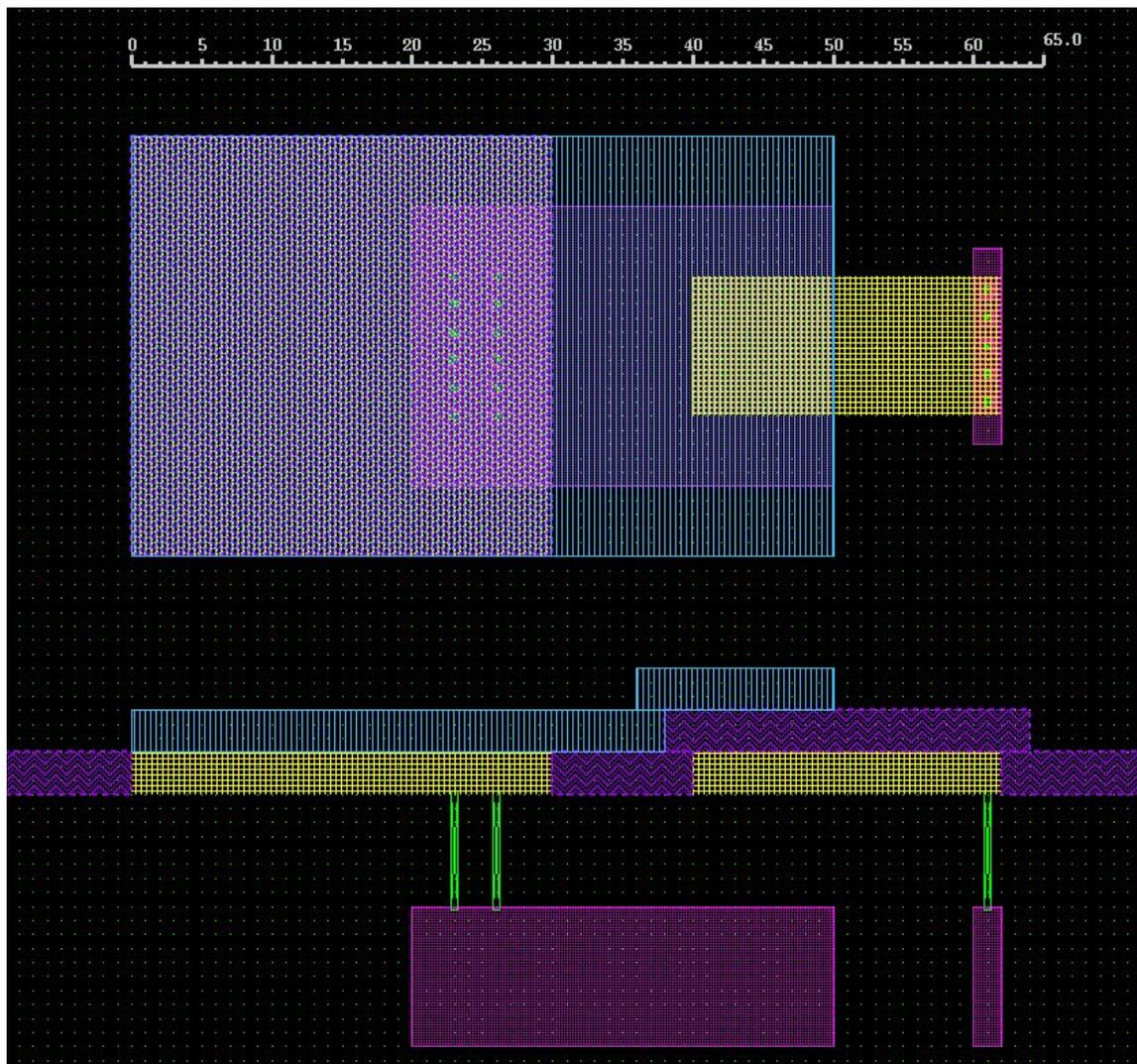
### КМОП-интегрированные схемы

- апробация совмещенного технологического процесса
- проектирование мемристовой интегральной микросхемы
- прототипирование нейроэлектронных систем

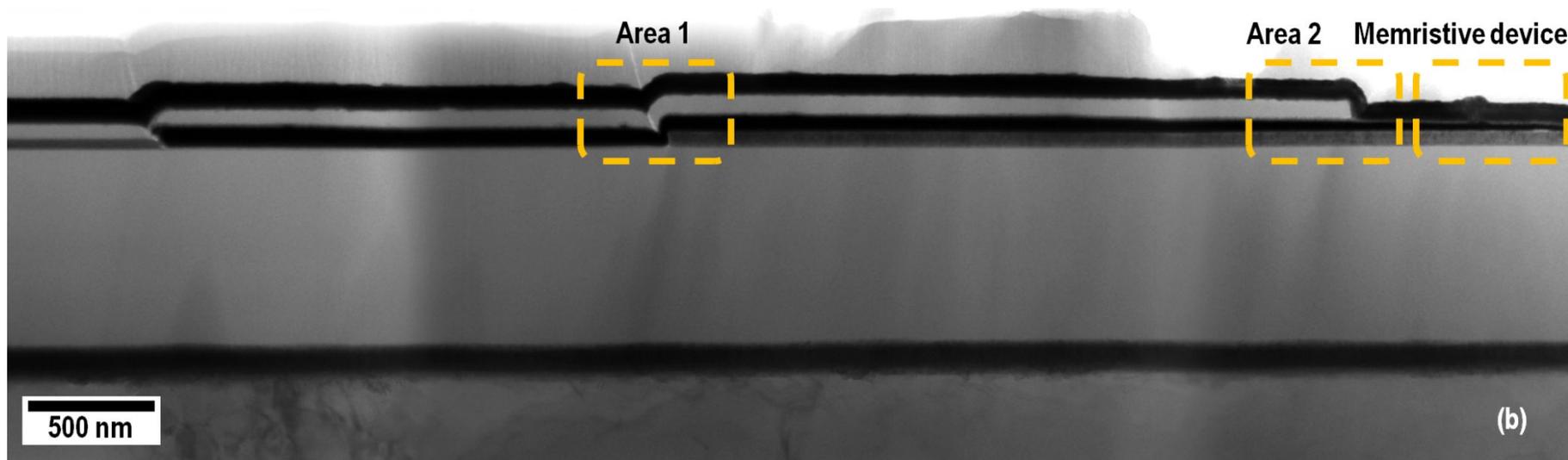




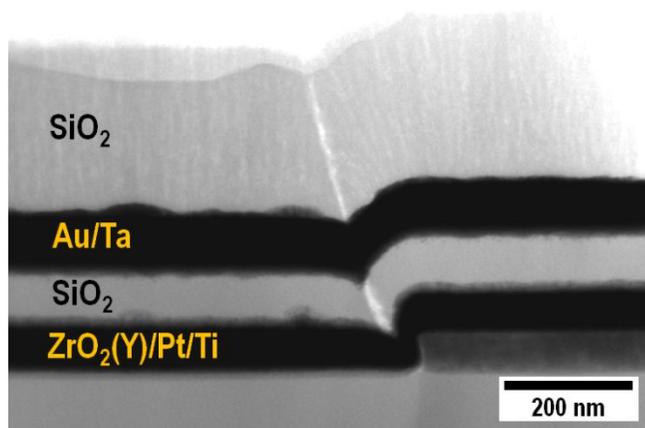
Элемент памяти формируется путем нанесения по заданным чертежам слоев нижнего электрода, функционального оксида, верхнего электрода над выходами из третьего металла, в котором сформированы все токоведущие линии



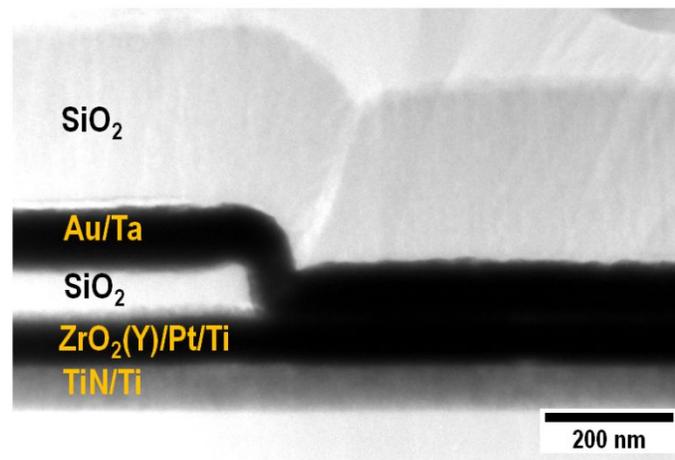
Элемент памяти формируется путем нанесения по заданным чертежам слоев нижнего электрода, функционального оксида, верхнего электрода над выходами из третьего металла, в котором сформированы все токоведущие линии



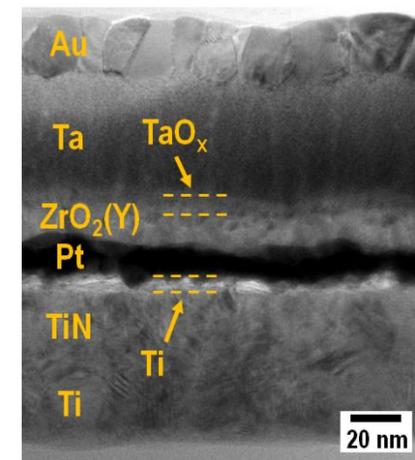
Area 1



Area 2

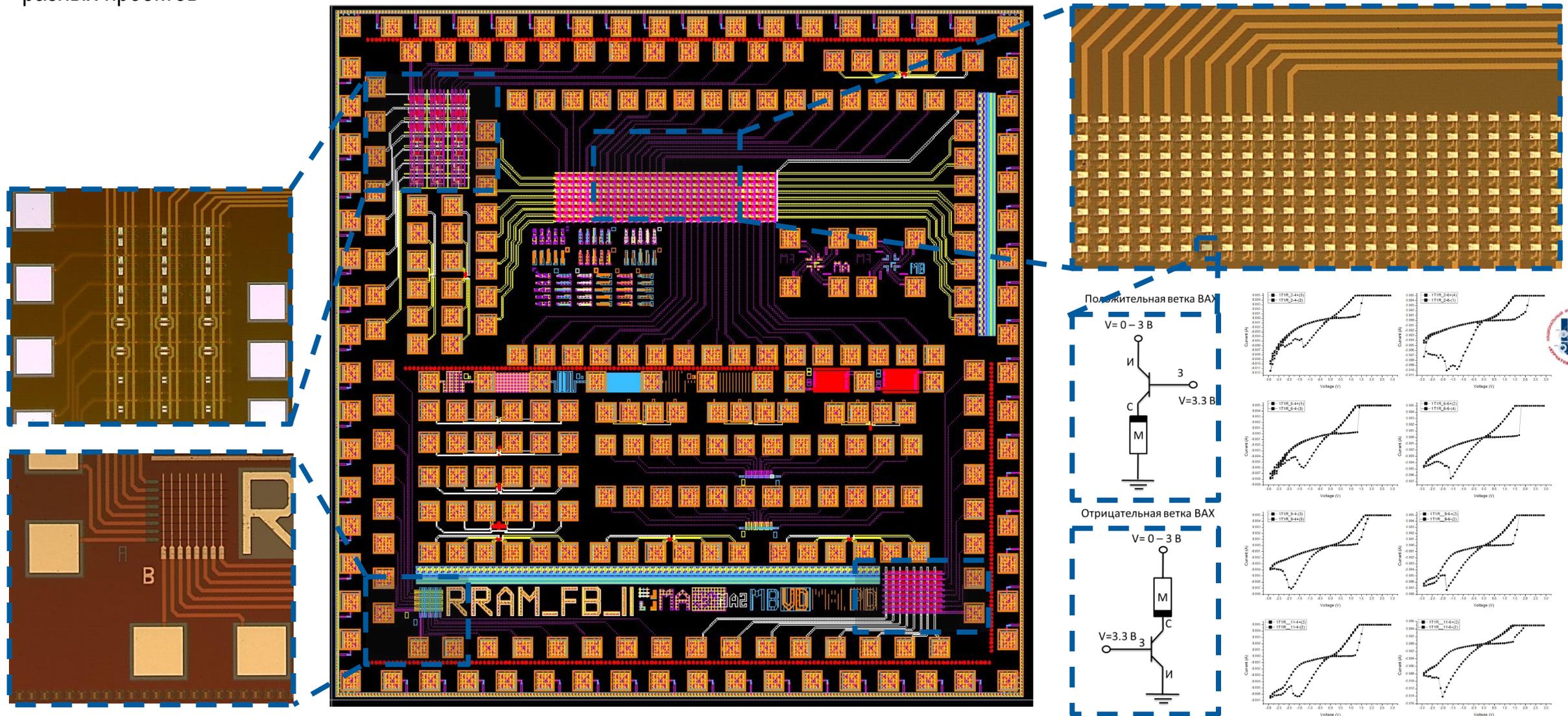


Memristive device

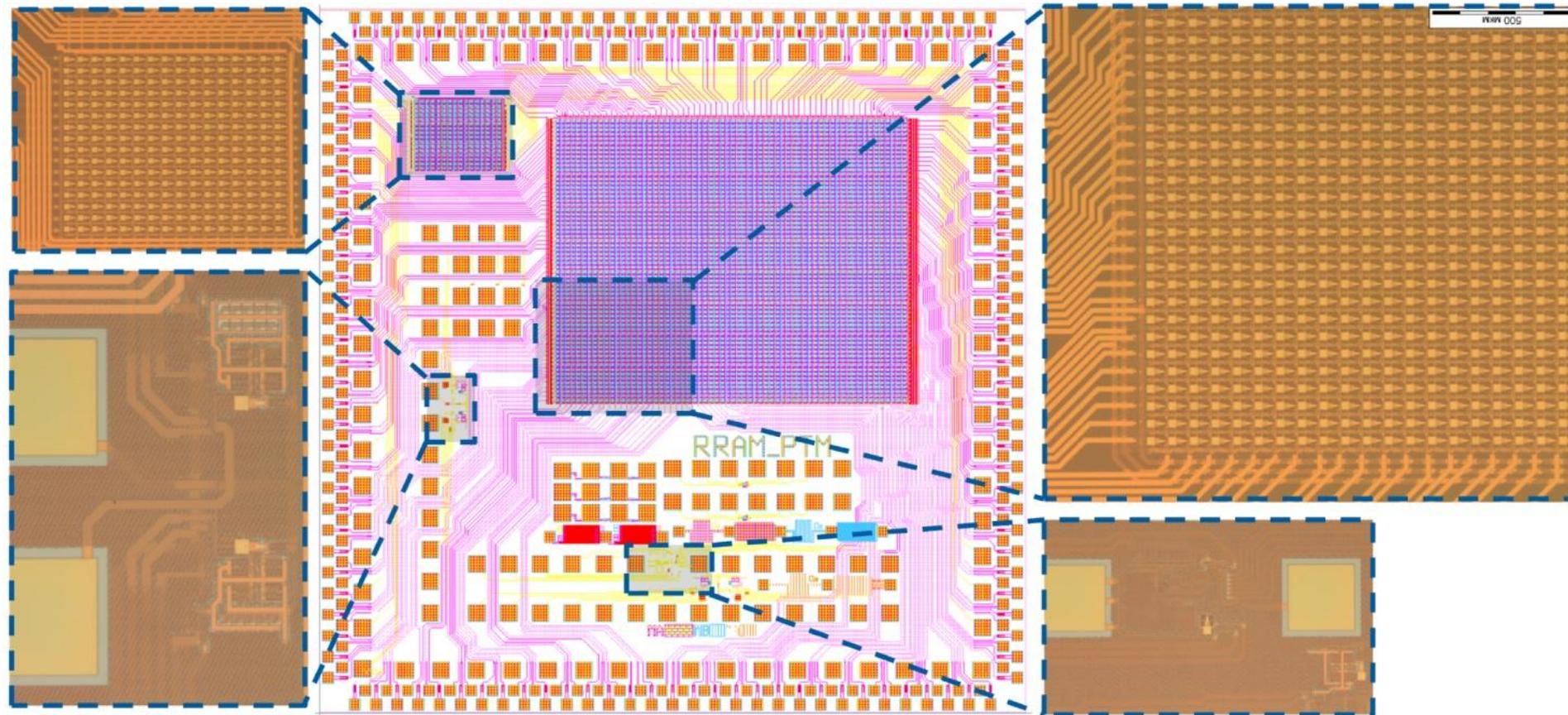
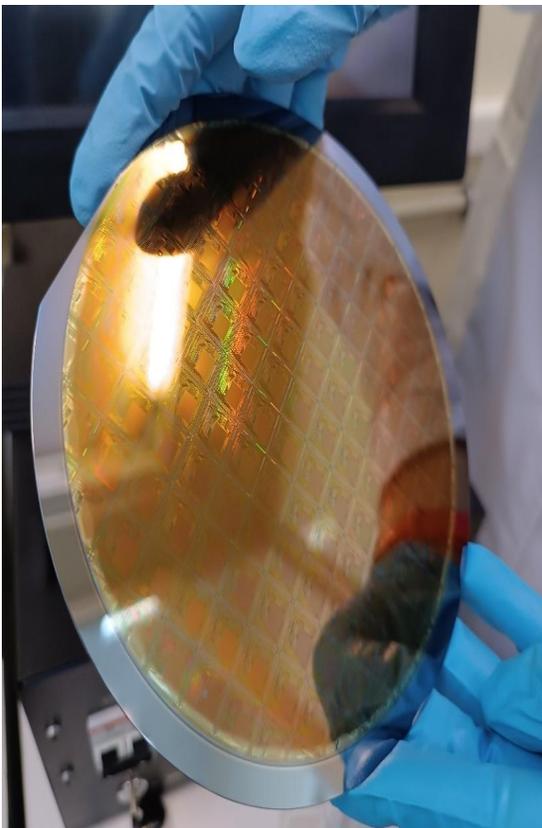




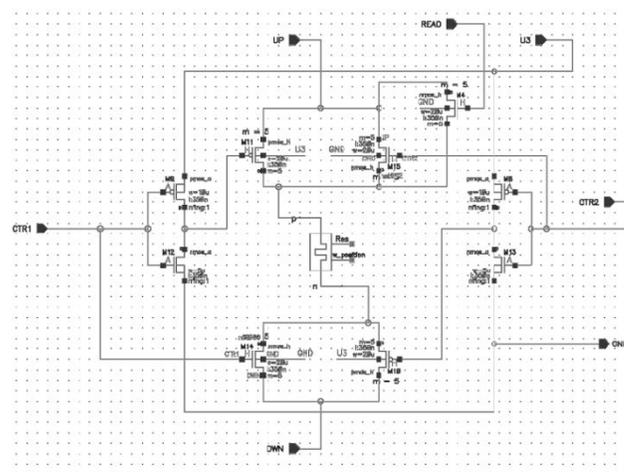
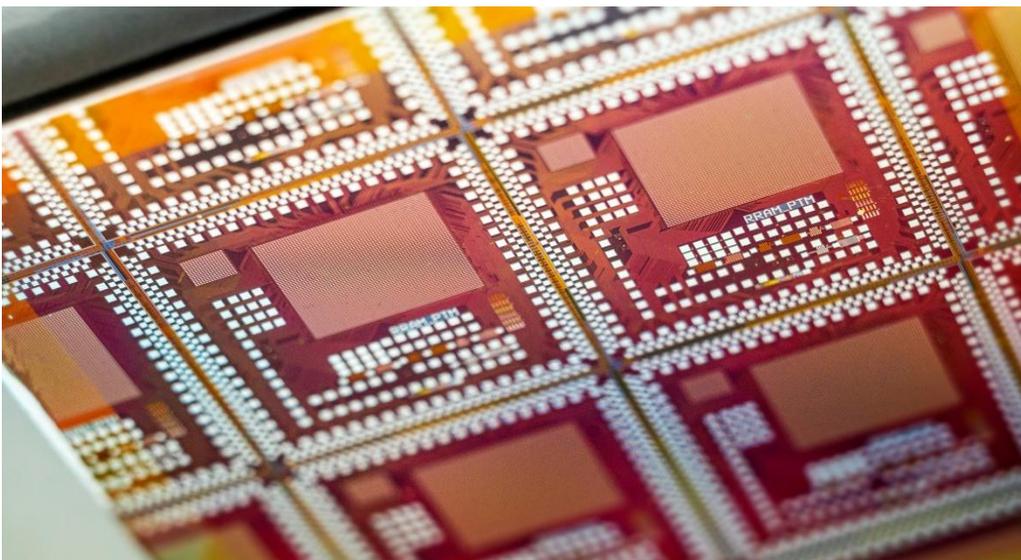
Аналог подхода **MPW (Multi-Project Wafer)** позволяет совмещать на одном кристалле функциональные блоки для выполнения разных проектов



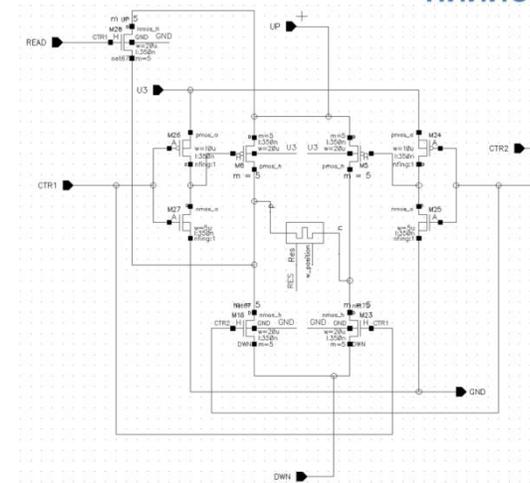
Разработан прототип тестовой микросхемы энергонезависимой резистивной памяти RRAM, который содержит усовершенствованные ячейки 5T1R, новые схемы для записи и считывания резистивных состояний



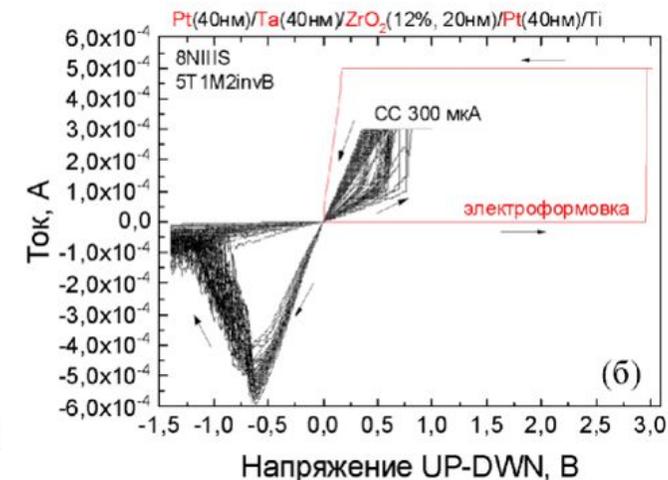
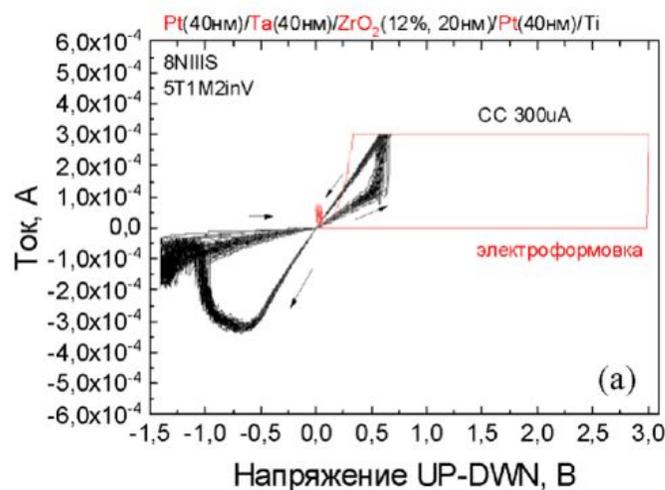
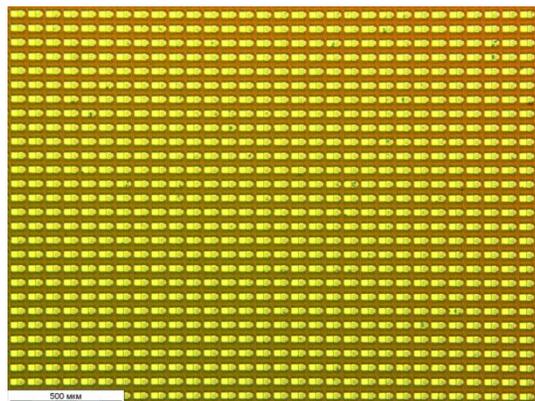
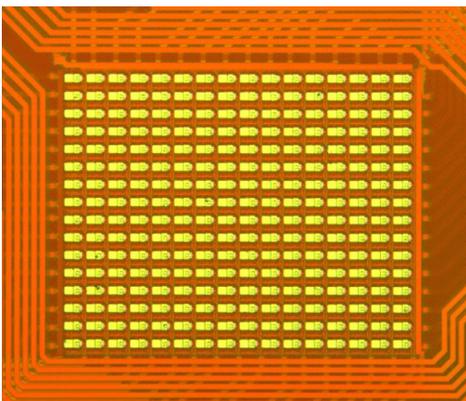
Реализован прототип тестовой микросхемы энергонезависимой резистивной памяти RRAM, демонстрирующий работоспособность усовершенствованных ячеек 5T1R



Ячейка памяти 5T1M2inv



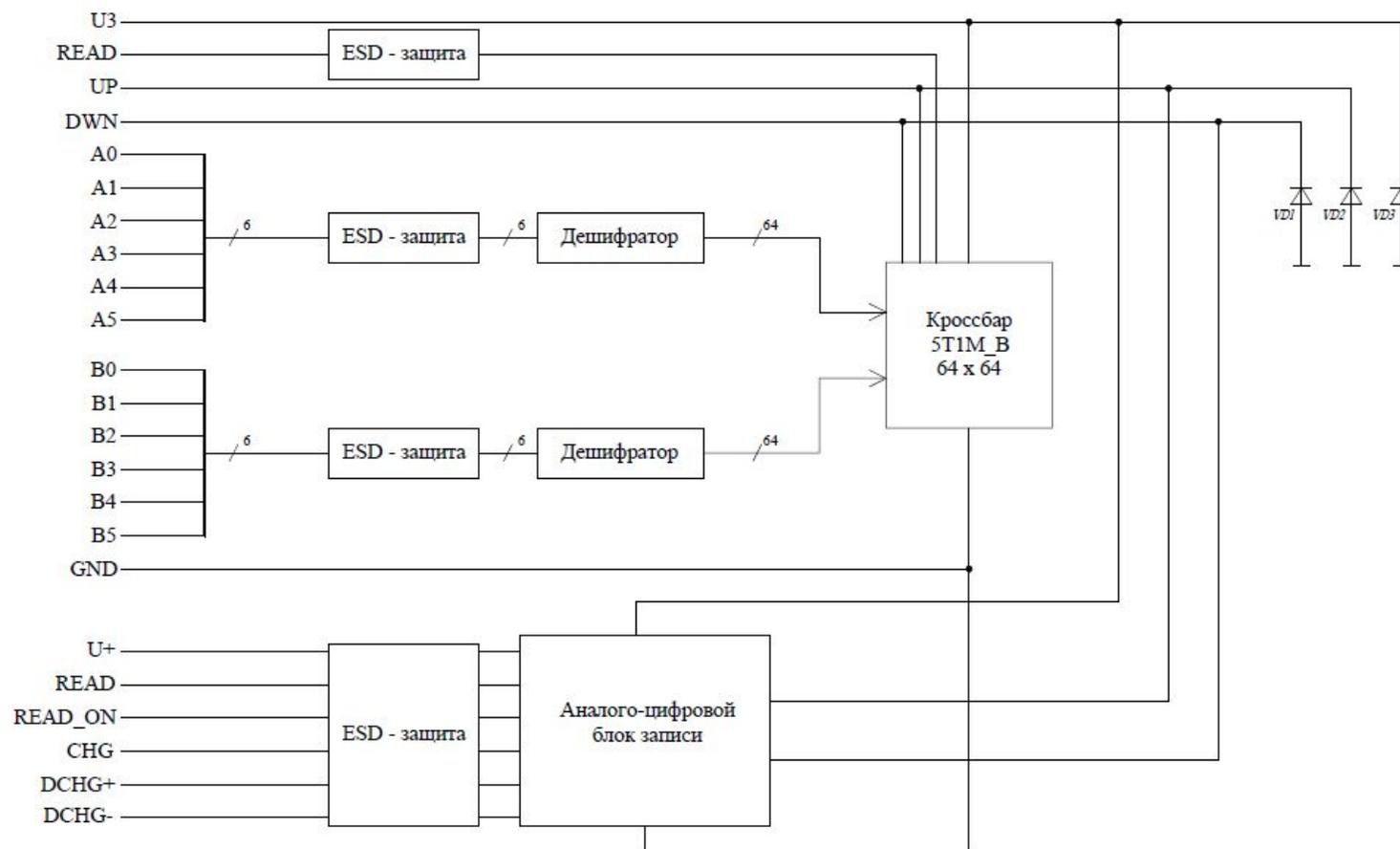
Ячейка памяти 5T1M2invB



Разработана схема электрическая принципиальная тестовой микросхемы радиационно-стойкой энергонезависимой резистивной памяти RRAM

### Состав тестовой микросхемы и требования к ней:

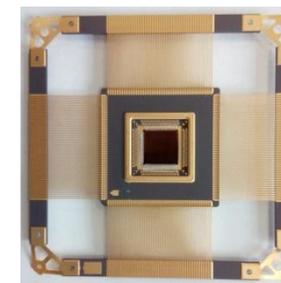
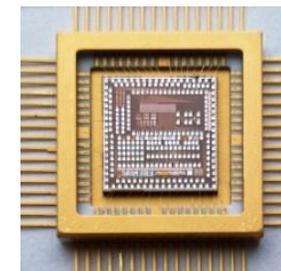
- размер кристалла не более, чем 10 мм × 10 мм, для монтажа в корпус марки 5134.64-6
- банк памяти информационной емкостью 4 Кбит (кроссбар 64 × 64 на ячейках памяти 5T1M2invB)
- дешифратор строк [WL0 .. WL5] и столбцов [BL0 .. BL5]
- аналого-цифровой блок, реализующий алгоритмы записи и чтения логических состояний в блоках памяти
- набор элементов ввода-вывода с системой обеспечения ESD-защиты
- возможность тестирования отдельных элементов памяти, транзисторов выборки, ячеек памяти, функциональных блоков записи, чтения и формовки





Технологическое освоение новой элементной базы микро- и наноэлектроники и организация серийного производства специализированного аппаратного обеспечения на базе архитектуры и принципов функционирования биологических нейронных сетей для массового внедрения технологий ИИ и постановки задач совершенно нового уровня по созданию гибридного ИИ на основе симбиоза искусственных и биологических нейронных сетей

Наименование работы	Сроки выполнения работ		
	2025-2026	2027-2029	2028-2030
НИР «Исследование и разработка конструкций элементов памяти и технологий изготовления радиационно-стойкой энергонезависимой памяти RRAM»			
Перевооружение производственной линии 150 мм для производства микросхем RRAM			
ОКР 1 «Разработка базовой технологии изготовления памяти RRAM»			
ОКР 2 «Разработка и изготовление типовых СБИС с блоками RRAM»			
ОКР 3 «Разработка и изготовление сопроцессоров для выполнения операций векторно-матричного перемножения в матрицах энергонезависимой памяти типа RRAM»			



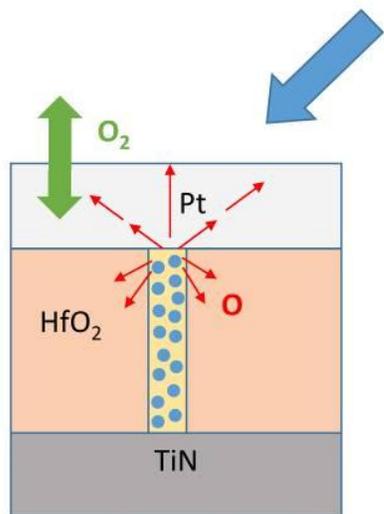
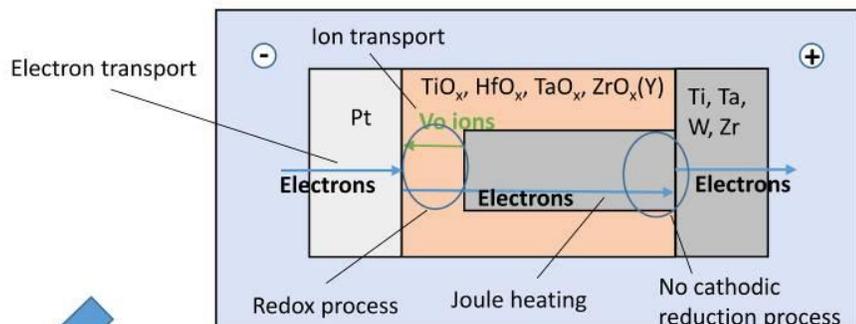
Необходимо создание *опытного участка* на базе филиала РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седакова» для проведения запланированных НИОКР и создания опытных образцов / серий СБИС и сопроцессора на основе технологии RRAM

- Введение - мемристивные системы и их применения
- Дорожные карты в области мемристивных систем
- Технология мемристивных устройств
- **Микроскопические механизмы**
- Мемристор как сложная макроскопическая система
- Применения в технологиях ИИ

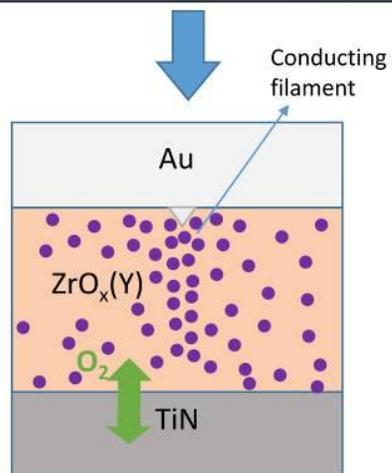


Комбинация взаимосвязанных транспортных явлений для ионов, электронов и фононов (джоулев разогрев) в разных временных масштабах делают мемристивное устройство сложной стохастической системой

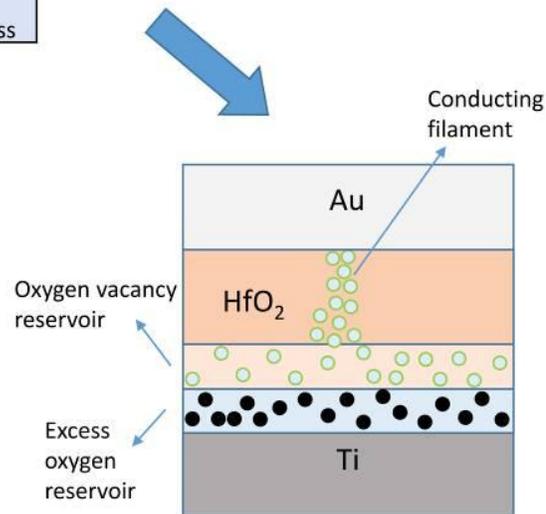
### Valence-Change Mechanism (VCM)



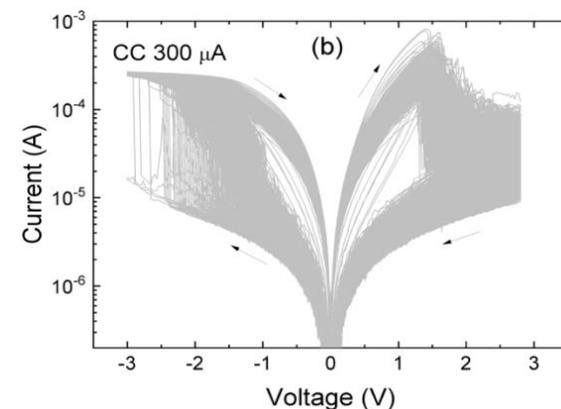
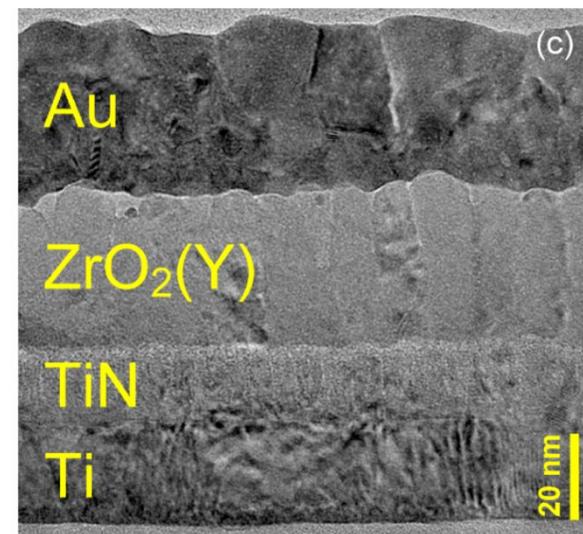
Active Electrode Model



Combined Mechanism



Oxygen Vacancy Drift Model



Схематическое изображение основных механизмов резистивного переключения анионного типа в структурах «металл-оксид-металл»

Реализация механизма в многослойной структуре Au/Ta/ZrO<sub>2</sub>(Y)/Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/TiN/Ti



- Введение - мемристивные системы и их применения
- Дорожные карты в области мемристивных систем
- Технология мемристивных устройств
- Микроскопические механизмы
- **Мемристор как сложная макроскопическая система**
- Применения в технологиях ИИ

Обобщенное описание мемристивной системы, скрывает в себе многообразие (богатство) полезных эффектов, которые обеспечивают различные функциональные применения мемристоров

### Обобщенная модель мемристора

$$I(t) = R^{-1}(\mathbf{x}, V) V(t),$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, V),$$

Важные свойства векторной функции

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}, V)$$

- Размерность (порядок системы)
- Зависимость от состояния
- Стохастичность (в общем случае)

Важные свойства скалярной функции

$$R^{-1}(\mathbf{x}, V)$$

- Нелинейность
- Неразделимость переменных

### Полезные эффекты

Биологически правдоподобные модели пластичности

- Spike-timing-dependent plasticity (STDP)
- Spike-rate-dependent plasticity (SRDP)
- ...

Функциональность нейрона

- Нейроподобная активность
- ...

Мультистабильность

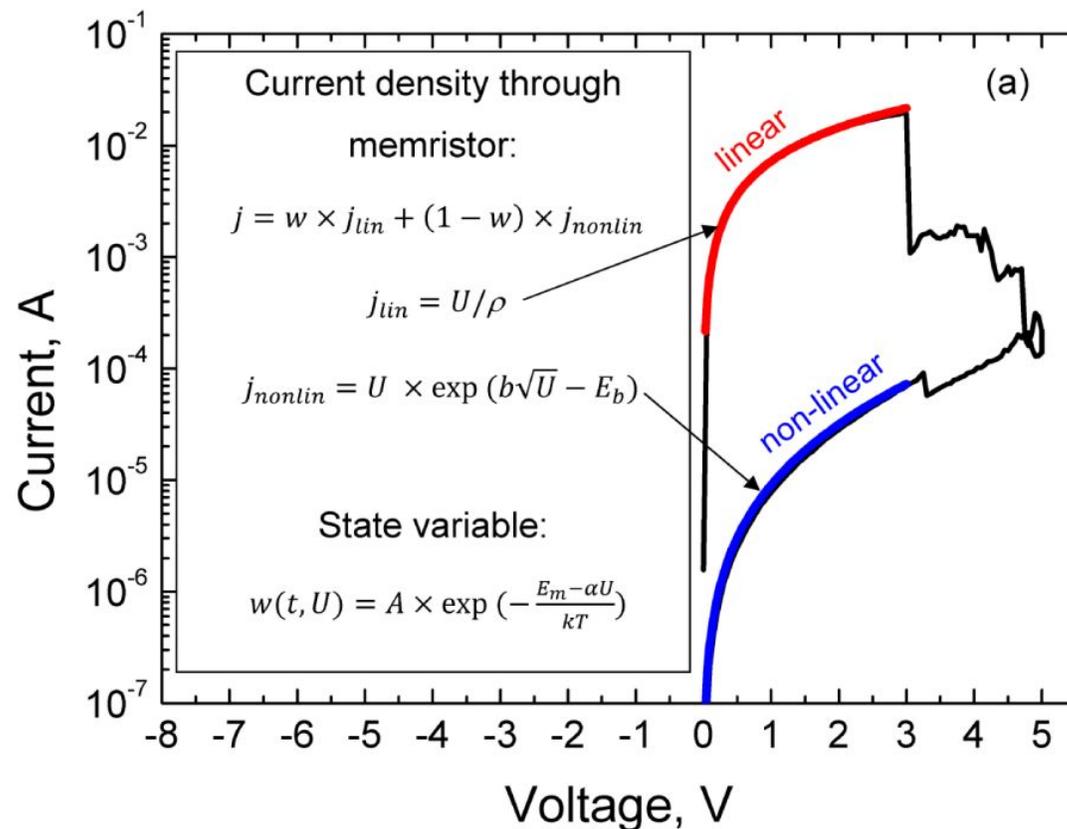
- Атракторы
- Перемежаемость
- Хаос
- ...

Конструктивная роль шума

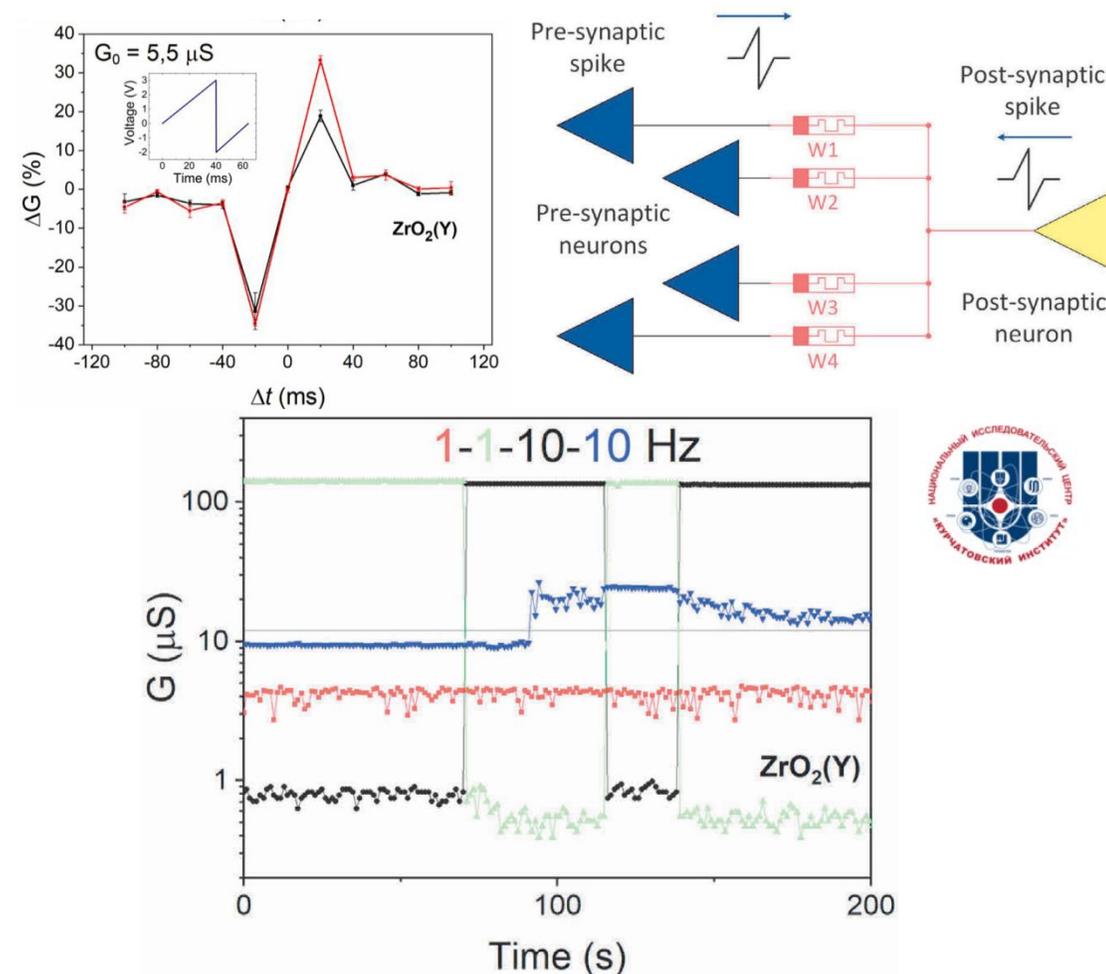
- Стохастический резонанс
- Резонансная активация
- Переходная бимодальность
- ...

Хэббовская пластичность по механизму STDP может быть реализована основе перекрытия пре- и постсинаптических спайков с различными временами прихода как при моделировании с использованием простой модели первого порядка, так и в экспериментах

### Мемристивная система второго порядка



Физическая модель мемристивного устройства, откалиброванная по экспериментальным данным и смоделированная ВАХ

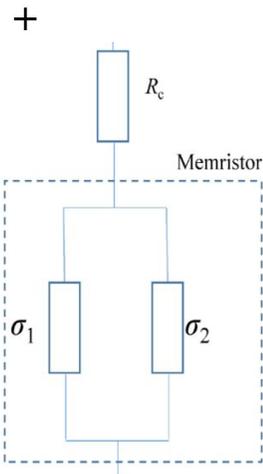
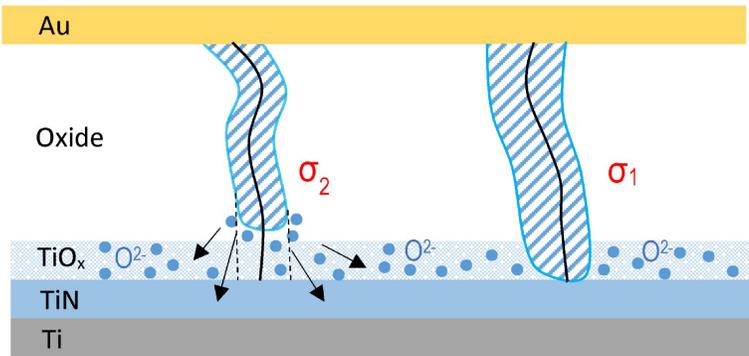


Демонстрация хэббовского обучения на основе STDP



Модель второго порядка не требует перекрытия спайков во времени, поскольку содержит две переменные состояния, действующие в разных временных масштабах, что приводит к зависимости проводимости мемристора от частоты и истории импульсной активности по аналогии со частотно-зависимой пластичностью биологического синапса

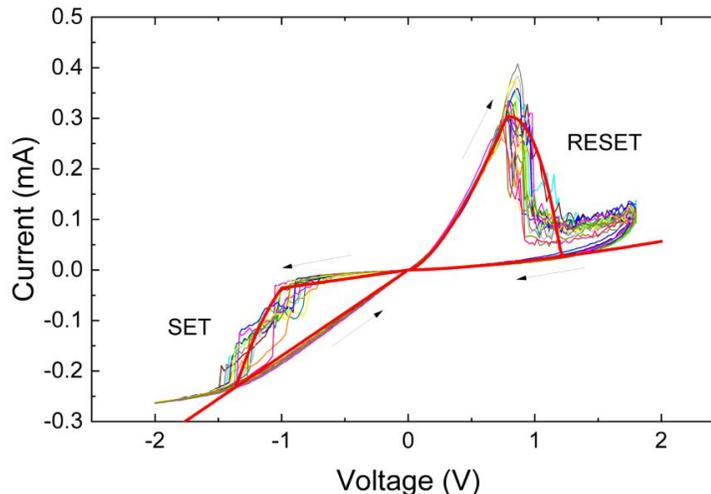
### Мемристивная система второго порядка



Схематическое изображение и эквивалентная схема мемристивного устройства с электронными ловушками

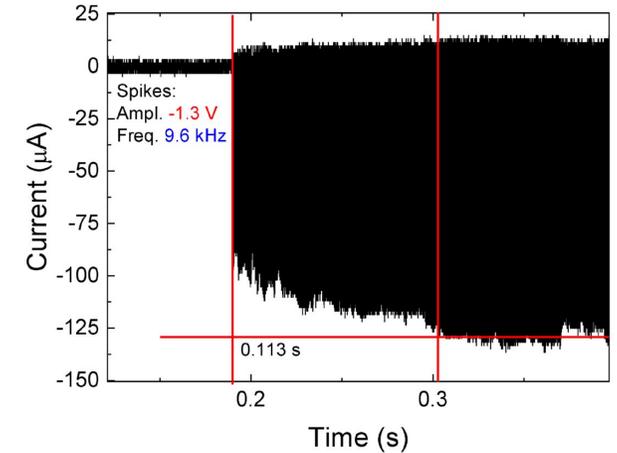
$$I = \frac{U}{\frac{1}{(x\sigma_1 + (1-x)\sigma_2)} + R_c}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx}{dt} = 10^{13} * \text{Exp}\left(-\frac{E_b \pm \beta N - \frac{0.08 * U}{1 + (x\sigma_1 + (1-x)\sigma_2)R_c}}{kT}\right) \\ \frac{dN}{dt} = \frac{I\sigma}{eS} (N_t - N) - \sigma v_0 N_c e^{-\frac{E_c - E_t}{kT}} N \end{array} \right.$$

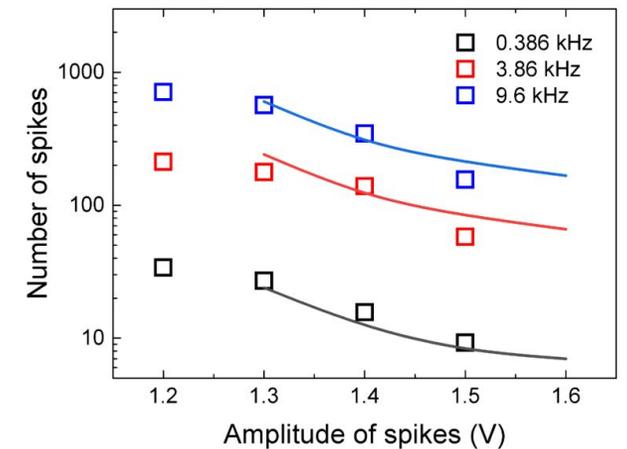


Экспериментальные и смоделированные ВАХ

M. Mishchenko et al. J. Phys. D: Appl. Phys. **55**, 394002 (2022)



Типичный токовый отклик мемристора

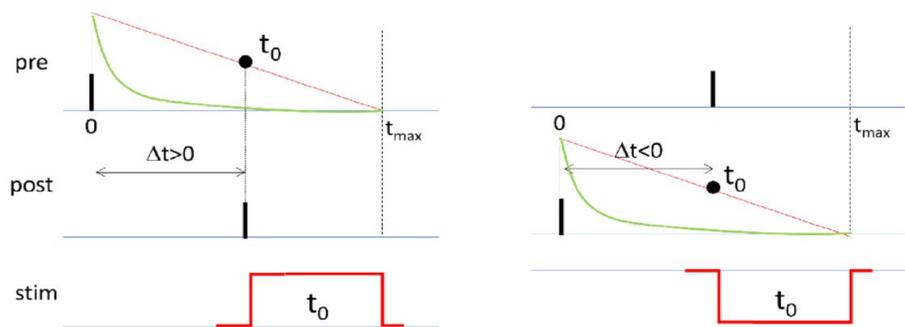
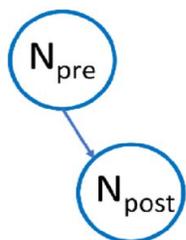


Частотная зависимость отклика мемристора

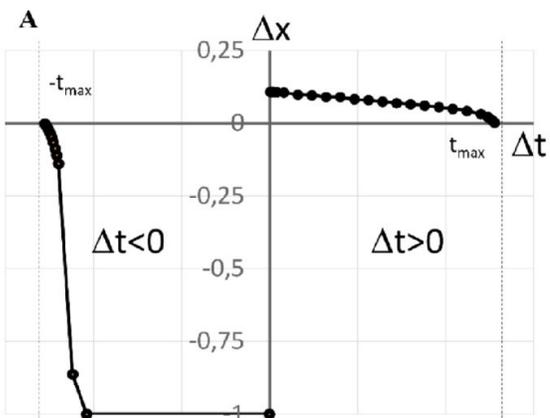


Предложен подход к управлению состоянием мемристоривного устройства, в котором импульсы пре- и постсинаптического нейронов не изменяют состояния мемристора по причине их малой амплитуды, но запускают дополнительный блок, воздействующий на мемристор. Этот блок действует на мемристор одиночным импульсом, полярность и длительность которого определяются порядком и временным интервалом между импульсами пре- и постсинаптического нейронов.

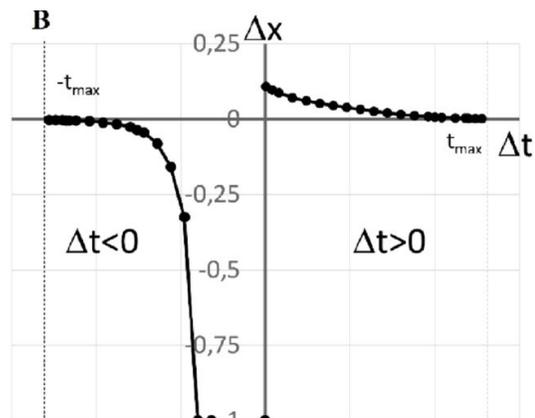
### Модель пластичности



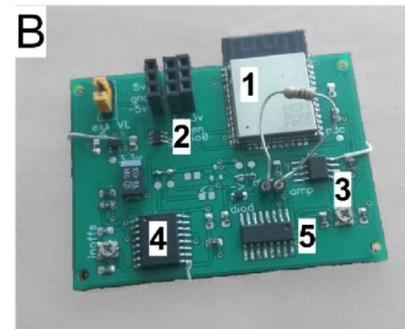
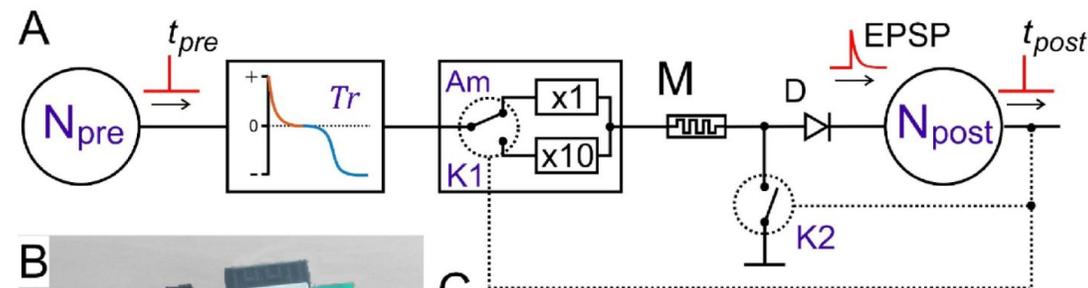
### Линейный «след»



### Экспоненциальный «след»



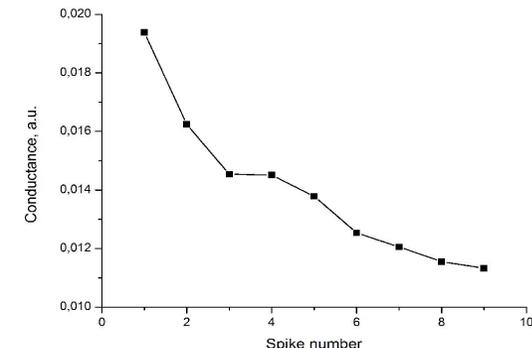
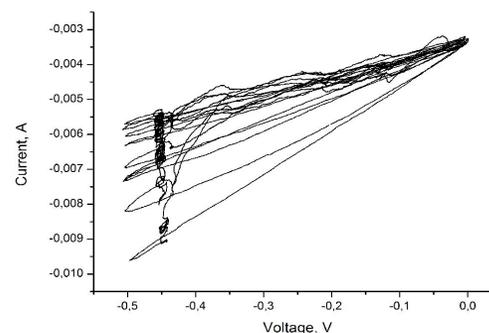
### Аппаратная реализация пластичности



1- MCU: ESPWROOM32D  
Npre, Tr, ADC, Npost, K1 and K2 control

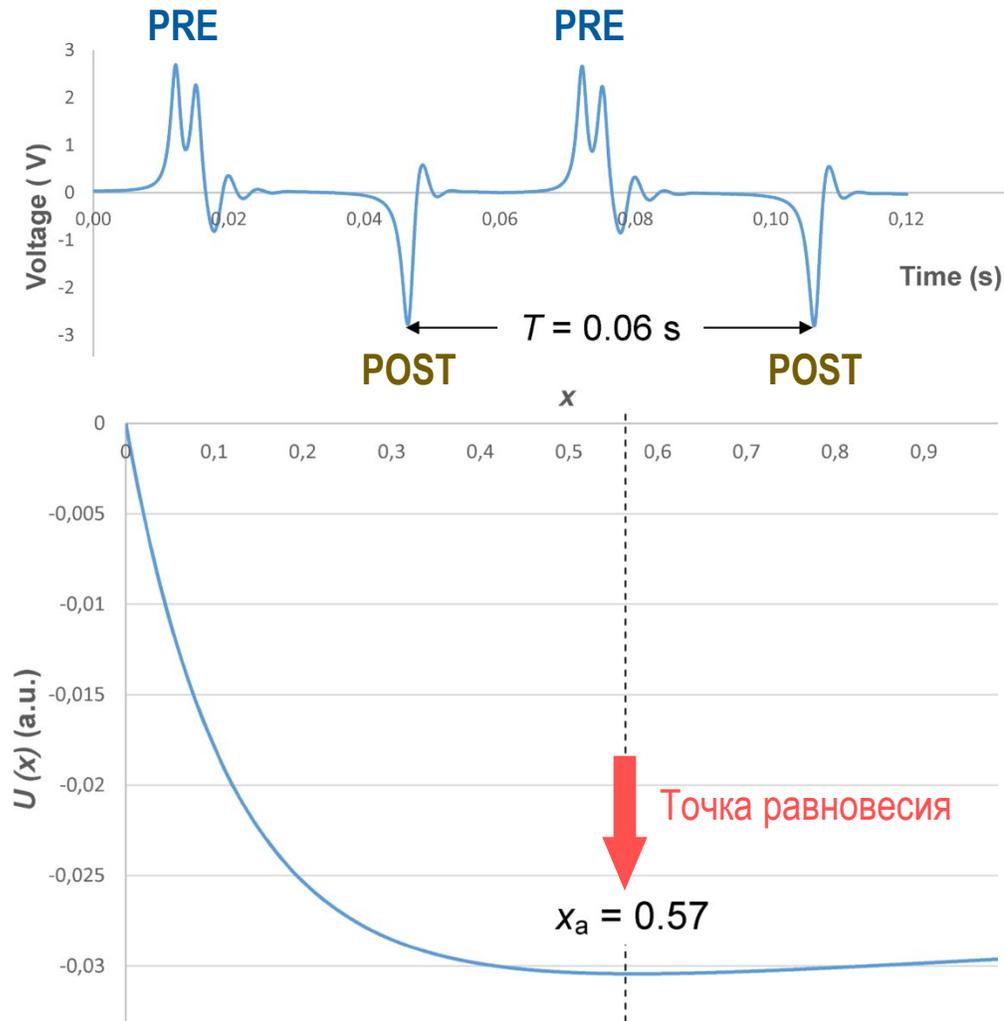
2 - DAC  
DAC121S101CIMK  
Tr → Voltage

3, 4, 5 - Am  
Op2177, TCA0372DWR2G  
ADG5413BCPZ





Точки устойчивого равновесия можно найти в потенциальной функции мемритивного устройства, последовательно соединенного с резистором, служащим в качестве датчика тока



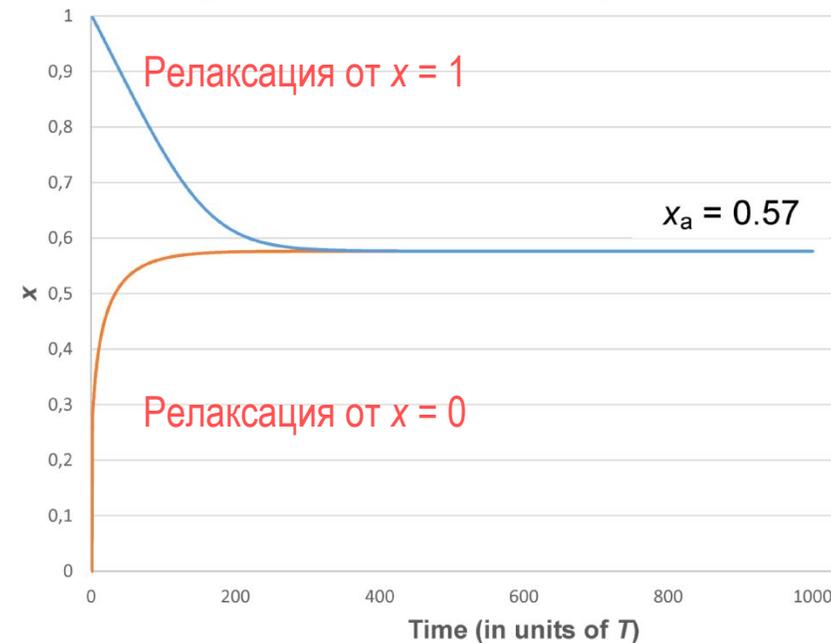
$$I(t) = R^{-1}(x, V) V(t),$$

$$\dot{x} = f(x, V),$$

Y.V. Pershin et al. EPL **125**, 20002 (2019)

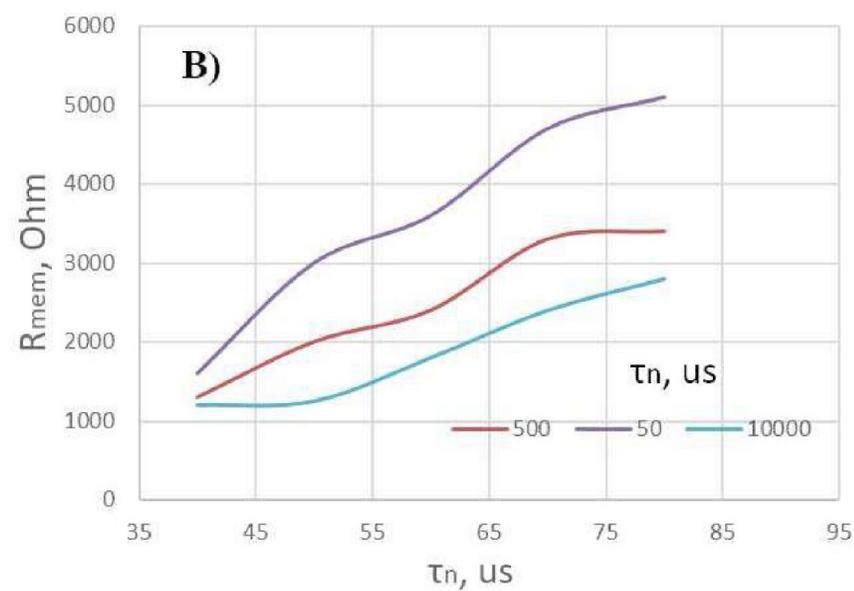
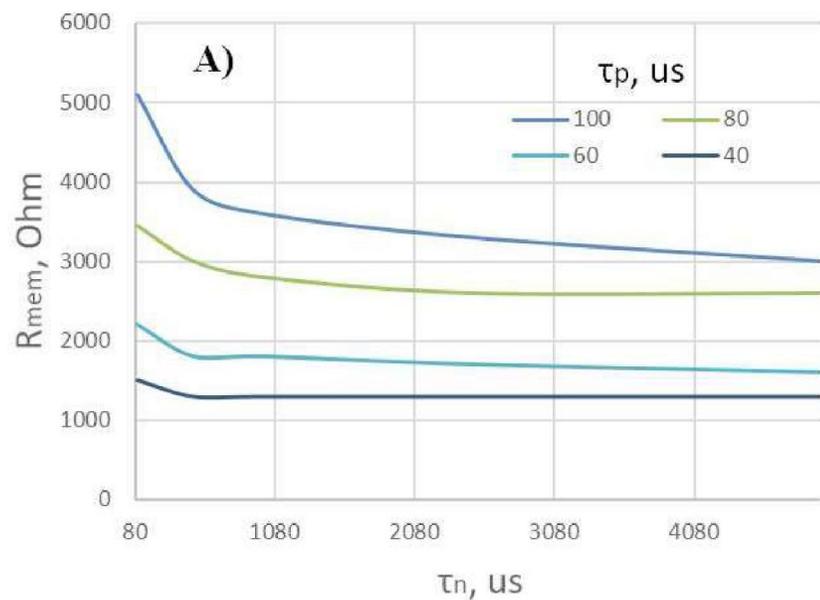
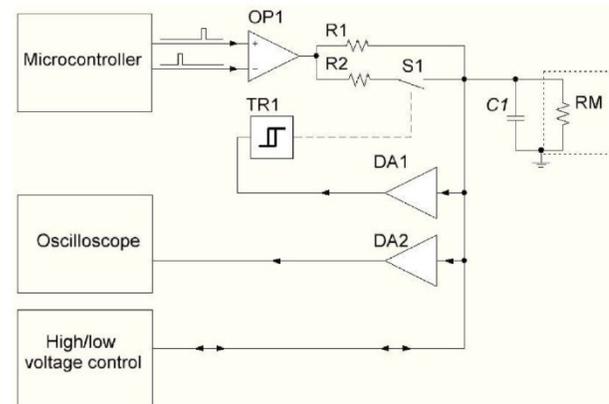
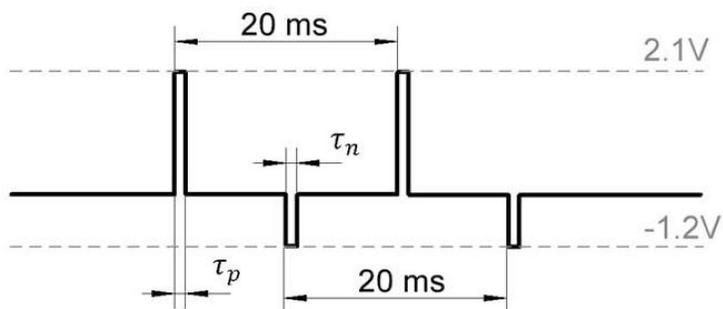
$$\Delta x_+ = f(x, V_+) \tau_+ \text{ and } \Delta x_- = f(x, V_-) \tau_-$$

$$\Delta x_+ = \int_0^{\tau_+} f(x, V_+(t)) dt \quad \Delta x_- = \int_0^{\tau_-} f(x, V_-(t)) dt$$



Последовательности спайков, потенциальная функция и релаксация мемристора до точек устойчивого равновесия

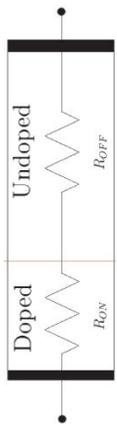
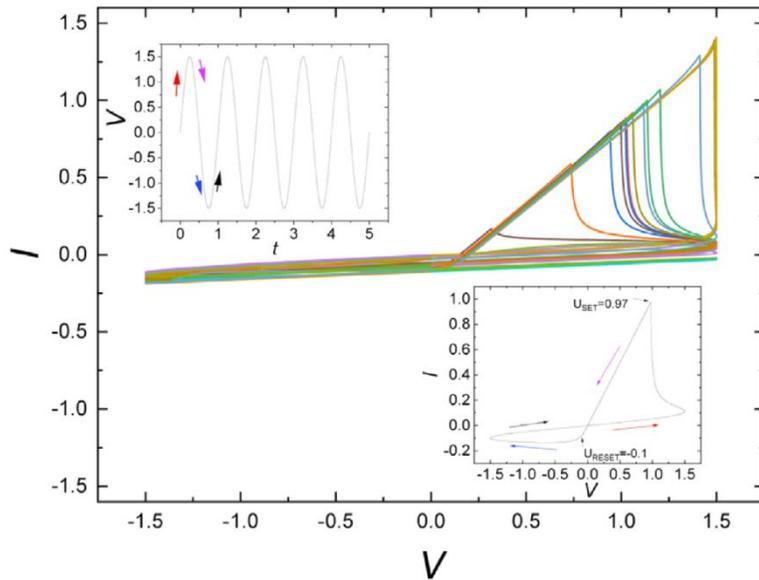
Возможность задания промежуточных состояний реализуется в рамках идеологии широтно-импульсной модуляции (ШИМ)



Экспериментальная реализация динамического переключения мемристора при периодической импульсной стимуляции



Детерминированный хаос можно обнаружить при внешнем периодическом воздействии в динамической модели мемристивной системы второго порядка с резистивными и емкостными компонентами, что объясняет изменчивость резистивного переключения от цикла к циклу

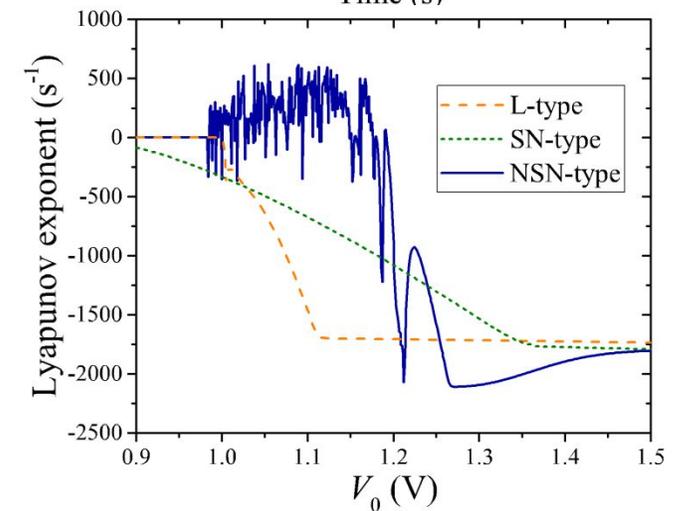
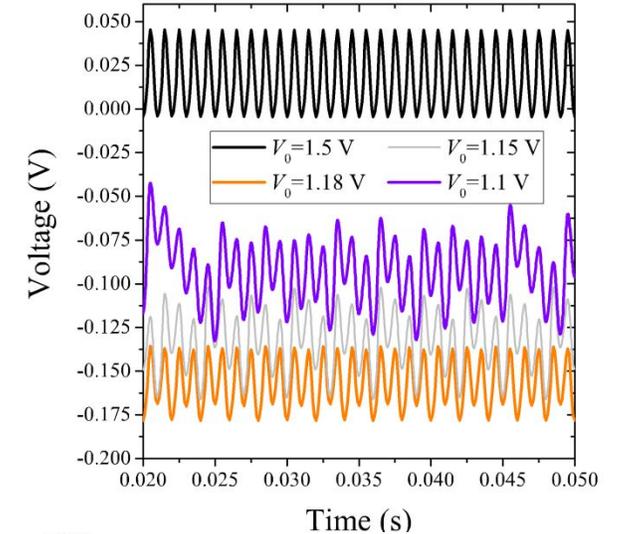
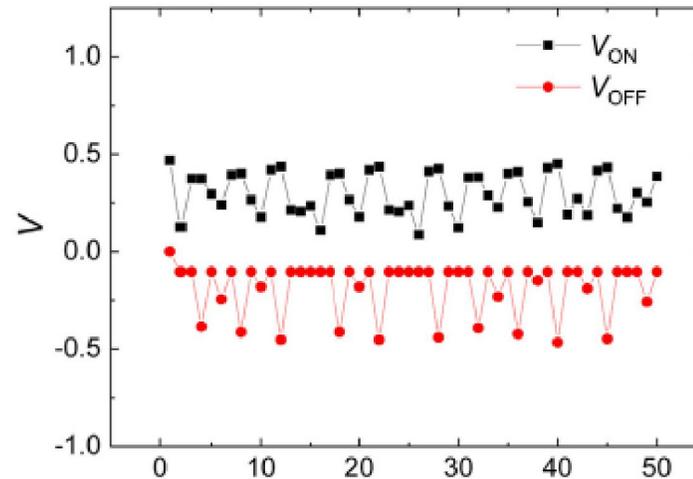
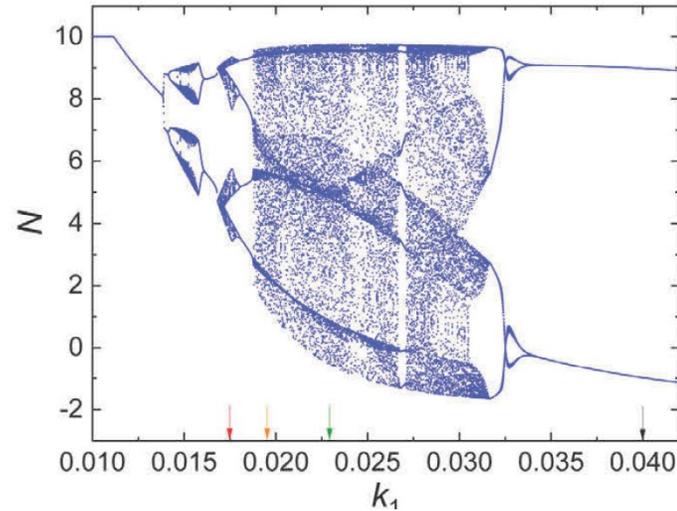


$$R = R_{ON}x + R_{OFF}(1 - x)$$

$$V(t) = R(x)I(t) + k_1 \frac{N}{x + a},$$

$$\frac{dx}{dt} = k_2 f_w(x)I(t),$$

$$\frac{dN}{dt} = k_3 f_v(N)I(t).$$

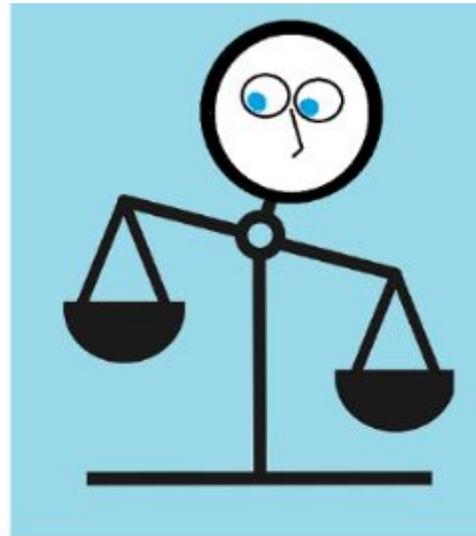


Бифуркационная диаграмма и моделируемый разброс параметров резистивного переключения



Classic approach:

**Fight with noise**

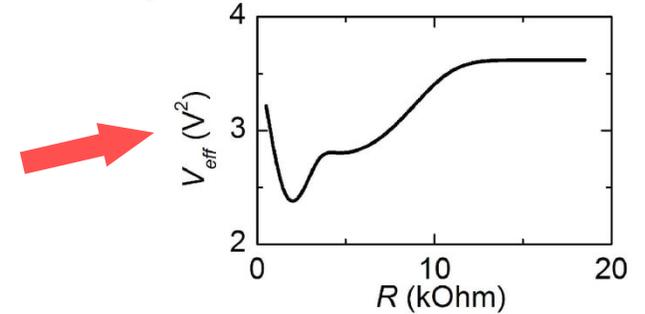
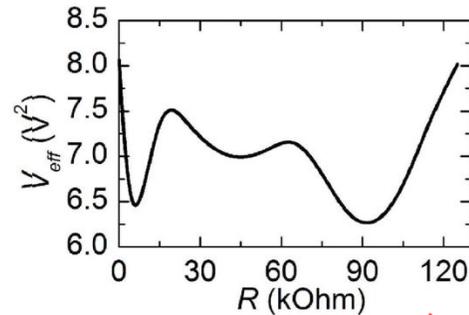
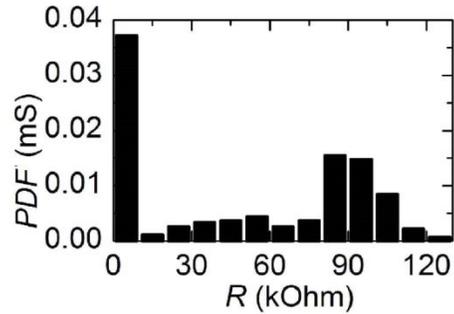
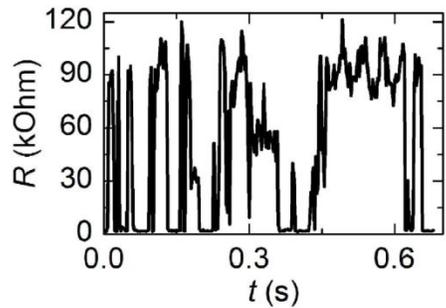
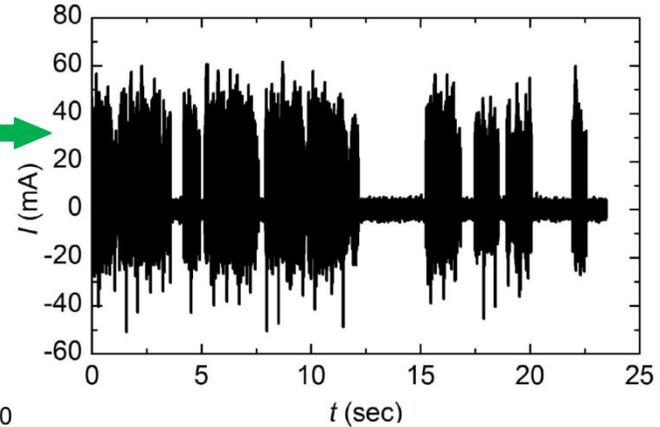
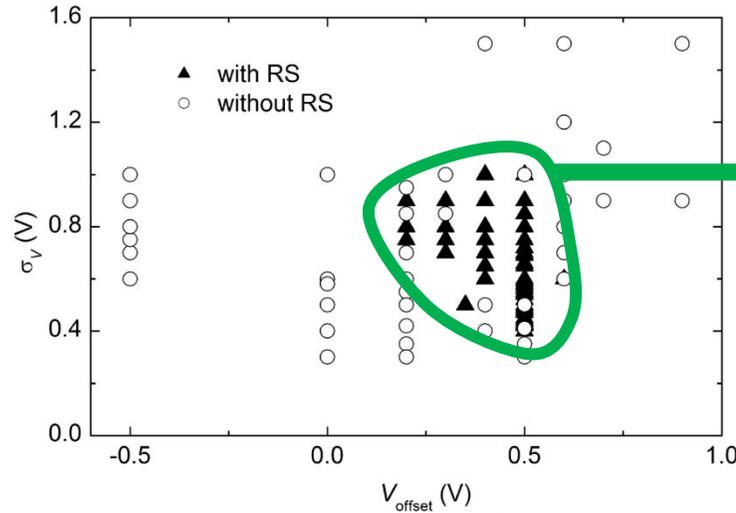
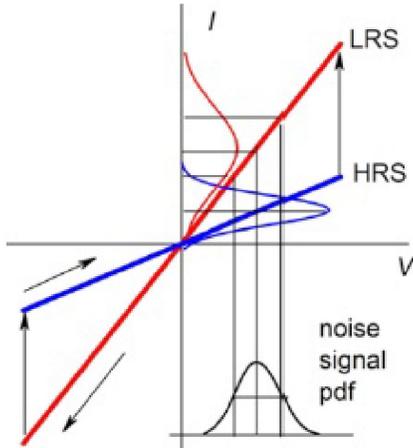


Modern theory of  
fluctuations:

**Use the noise!**

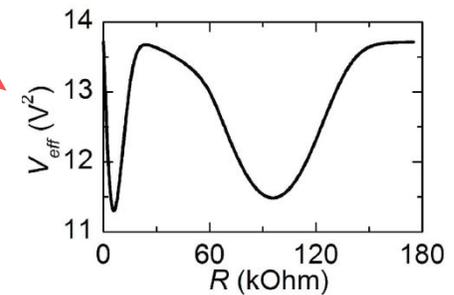


Шум можно использовать для изучения природы мемристового явления, в частности, можно определить эффективный потенциальный профиль мемристового устройства



$$R(t) = \sigma_V / \sigma_I(t)$$

Влияние белого гауссовского шума на реакцию мемристового устройства



## СТОХАСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ МЕМРИСТОРОВ

Dynamical	Microstructural	Thermodynamical	Stochastic
First or higher order differential equation (1D)	Large number of equations and all material properties in details (3D)	Fokker–Planck equation, Boltzmann distribution in equilibrium (1D)	First order Langevin equation, Fokker–Planck equation (1D, 3D)
<ul style="list-style-type: none"> <li>Mathematical formulation of generalized switching process</li> <li>Does not involve fluctuations</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Less practical</li> <li>Does not catch the general features</li> <li>Provide only qualitative fit to experimental data</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Naturally involves the fluctuations</li> <li>Need to calculate the thermodynamic potential (e.g. free energy)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mathematical formulation of generalized switching process</li> <li>Involves fluctuations</li> </ul>

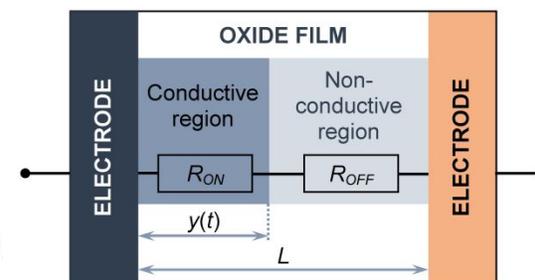
Уравнение Ланжевена

$$\frac{dx}{dt} = - \frac{dU(x)}{dx} + \xi(t)$$

Уравнение Фоккера-Планка

$$\frac{\partial}{\partial t} n_1(x, t) = \frac{\partial}{\partial x} \left[ n_1(x, t) \frac{\partial U_1(x, V)}{\partial x} \right] + D_{eff} \frac{\partial^2}{\partial x^2} n_1(x, t)$$

Компактная модель

J.B. Roldan et al. *Advanced Intelligent Systems* **2200338** (2023)N.V. Agudov et al. *JSTAT* **2020**, 024003 (2020)

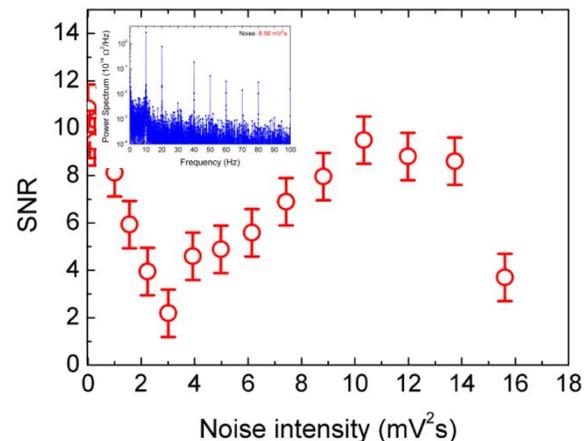
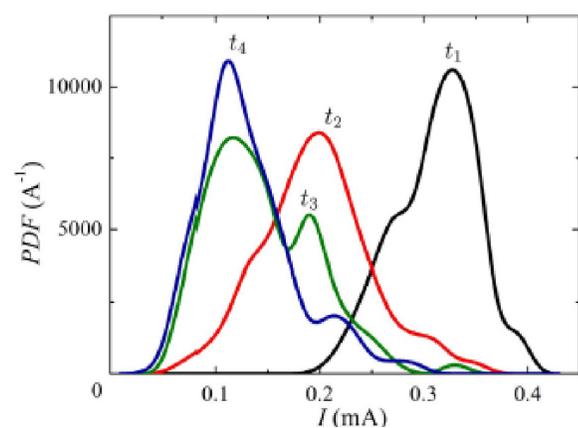
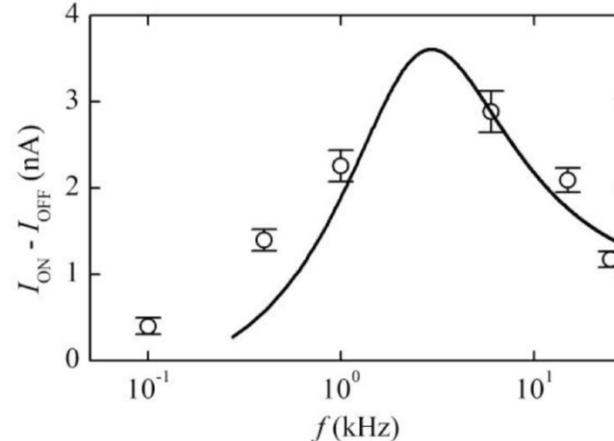
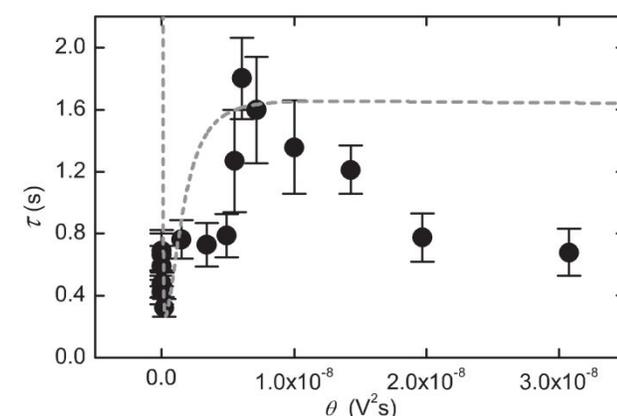
## ИНДУЦИРОВАННЫЕ ШУМОМ ЯВЛЕНИЯ

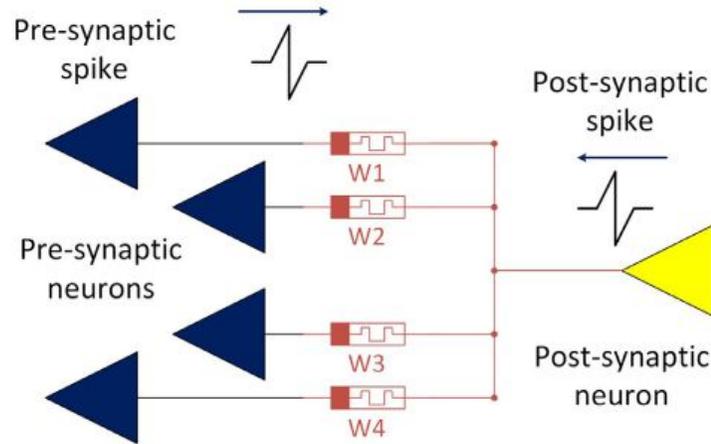
Стохастический резонанс

Переходная бимодальность

Резонансная активация

Стабилизация состояний

A.N. Mikhaylov et al. *Chaos Solitons & Fractals* **144**, 110723 (2021)N.V. Agudov et al. *Chaos Solitons & Fractals* **150**, 111131 (2021)D.O. Filatov et al. *Technical Physics* **65**, 1744 (2020)M.N. Koryazhkina et al. *Chaos Solitons & Fractals* **162**, 112459 (2022)



### Модельный эксперимент:

#### Фаза I, паттерн на входе (Хэбб):

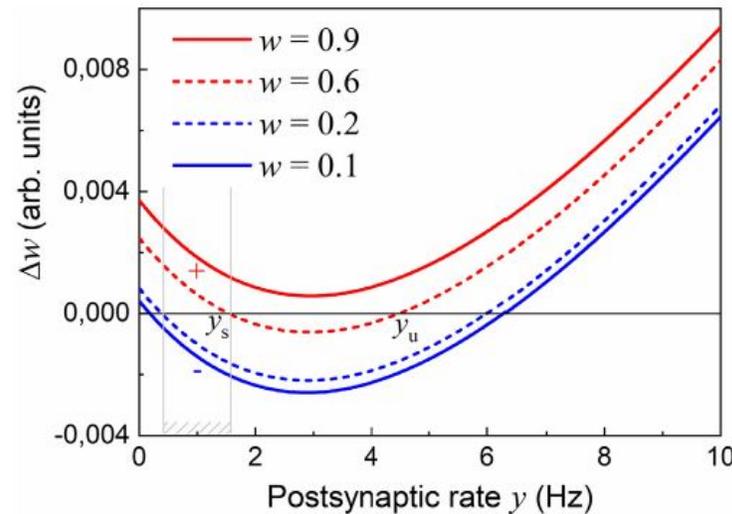
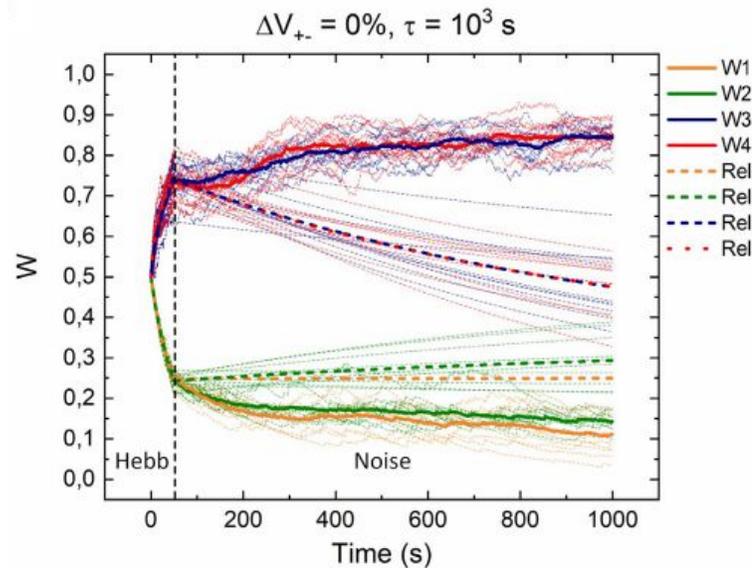
на половине входов высокочастотные пуассоновские спайки, а на другой - последовательность спайков с низкой частотой;

#### Фаза II, шум на входе:

на всех входах – низкочастотные пуассоновские последовательности спайков



Шумовая последовательность спайков обеспечивает поддержание или даже дообучение изначально обученных мемристивных весов

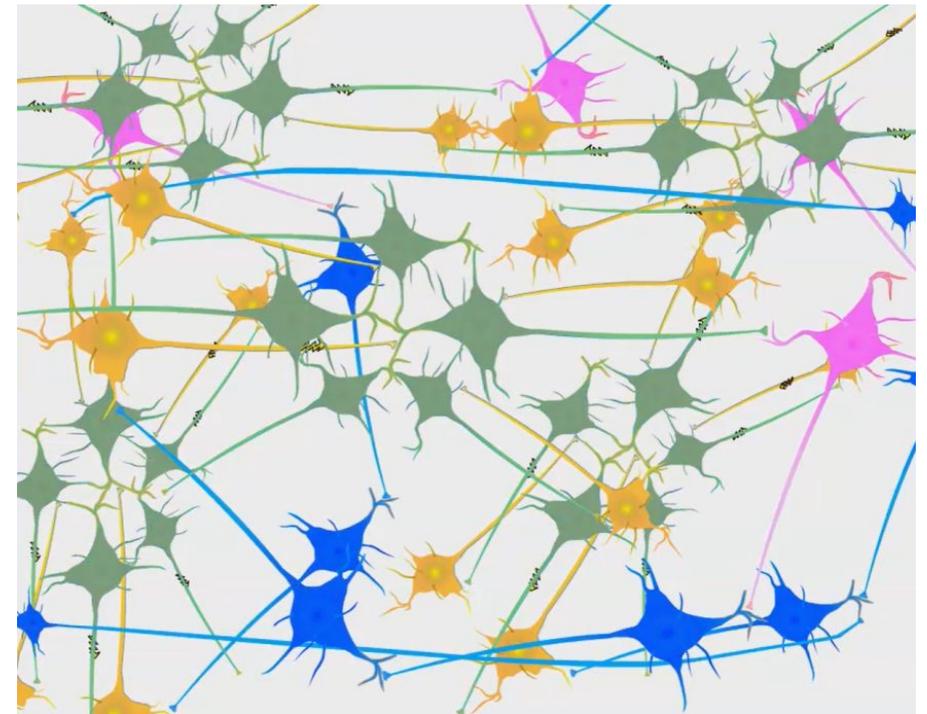
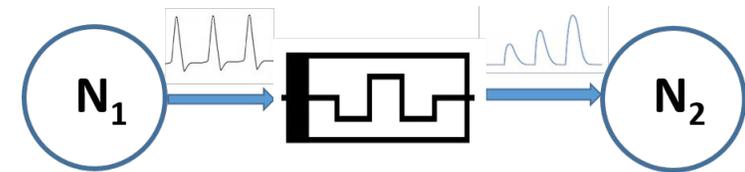
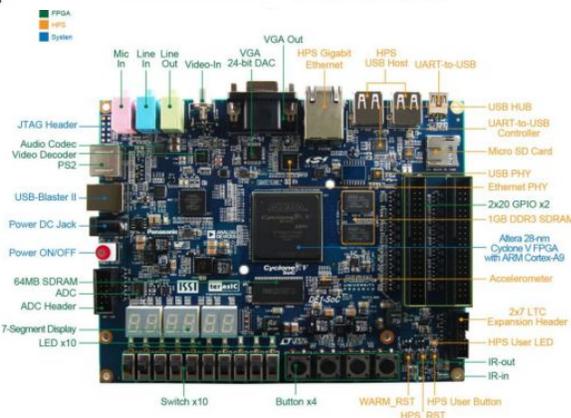
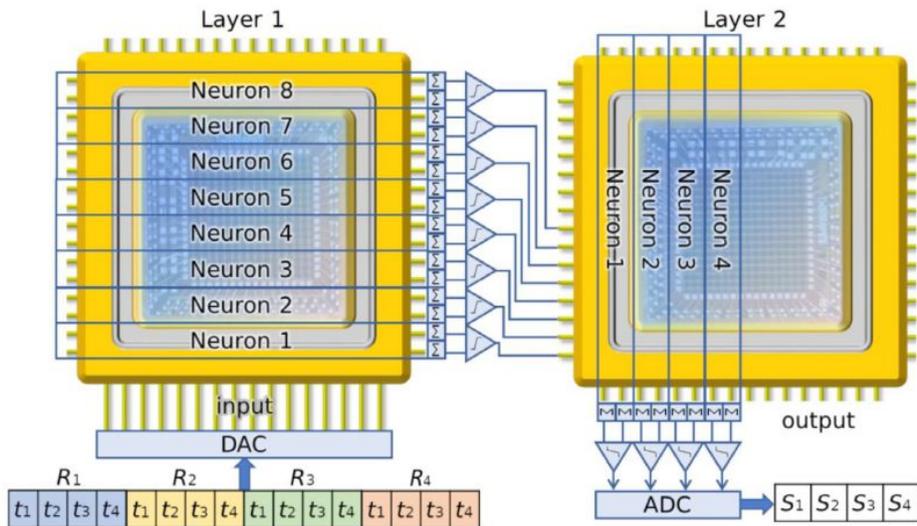


Этот эффект можно объяснить существованием некоторого диапазона частот постсинаптического нейрона вблизи низких значений, где имеет место расхождение весов

- Введение - мемристивные системы и их применения
- Дорожные карты в области мемристивных систем
- Технология мемристивных устройств
- Микроскопические механизмы
- Мемристор как сложная макроскопическая система
- **Применения в технологиях ИИ**



Два разных подхода к созданию мемристивных систем: на основе формальной искусственной нейронной сети или на основе мемристивной стохастической пластичности и нейронной синхронии в составе мозгоподобных спайковых (импульсных) архитектур

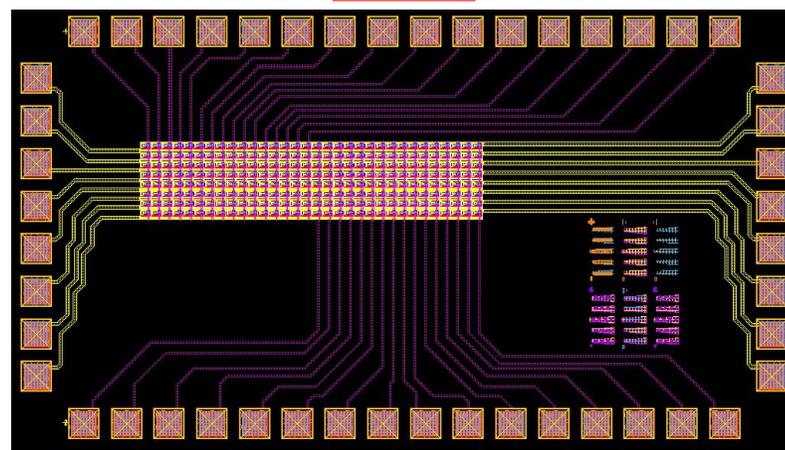
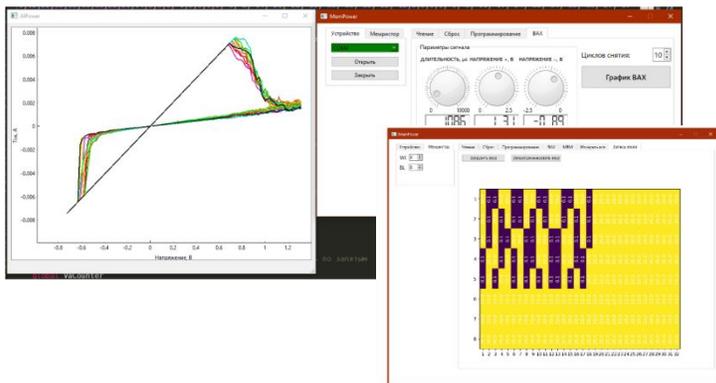
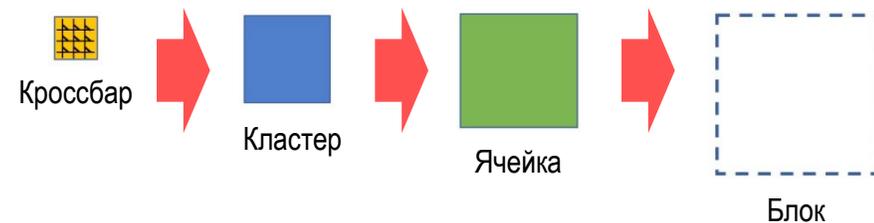
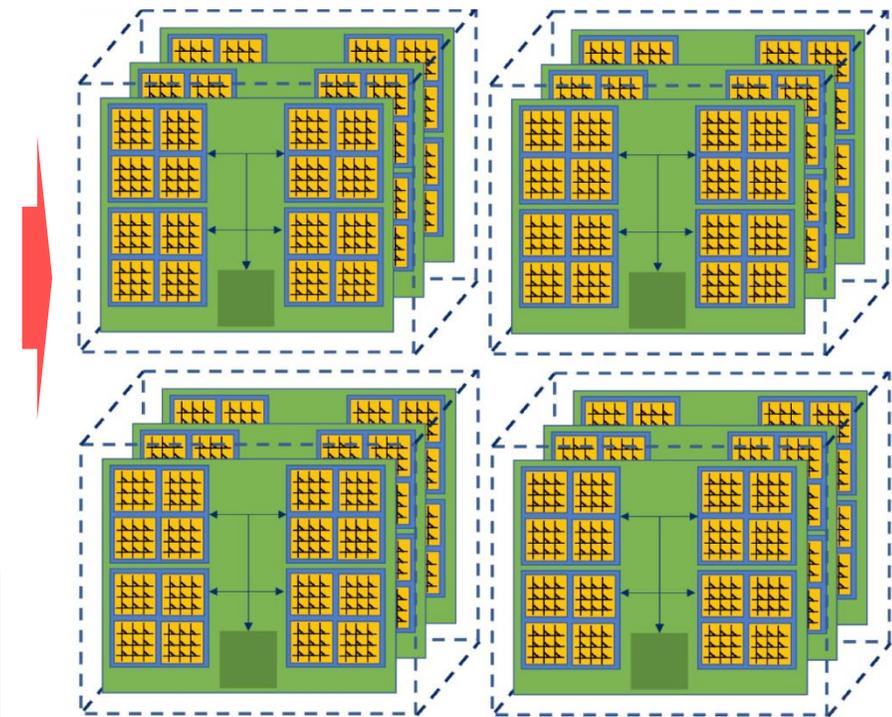
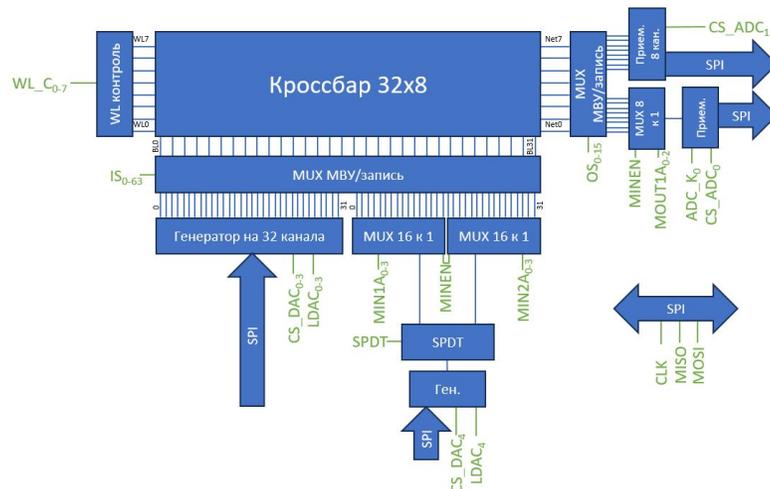
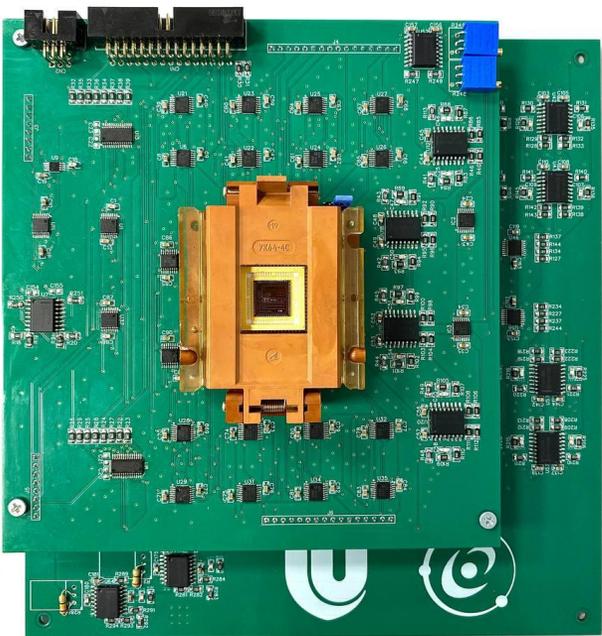


Пример двухслойного перцептрона на основе мемристоров под управлением ПЛИС



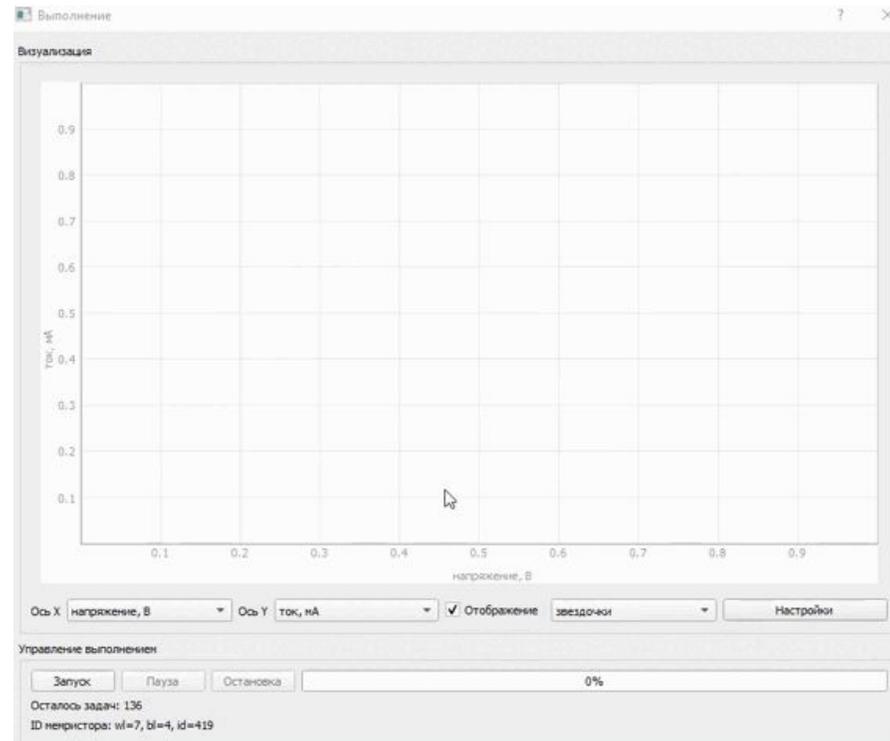
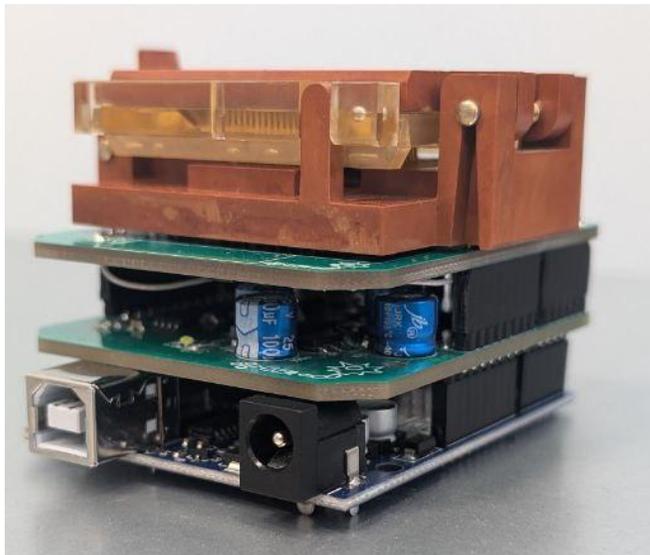
Разработана и последовательно реализуется масштабируемая архитектура ускорителя нейроморфных вычислений на основе КМОП-интегрированных мемристивных массивов кроссбар

### Макет вычислительного ядра





В целях популяризации данного научного направления и обеспечения доступности мемристивных технологий для широкого круга пользователей разработана плата расширения для микрокомпьютера Arduino Uno



- Подключение кроссбара 32x8 или работа с отдельными ячейками
- Количество мемристивных устройств до 256
- Съёмный кроссбар, можно работать с несколькими
- Подключение по USB
- Питание от розетки 220В 50Гц

Кроссбар-массив

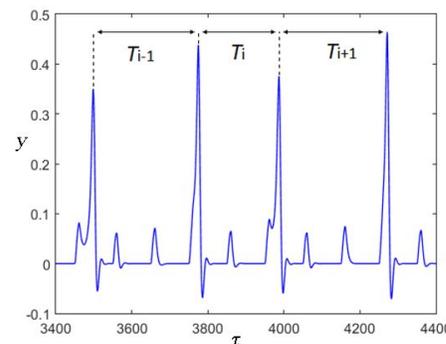
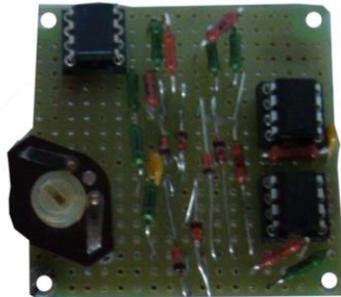
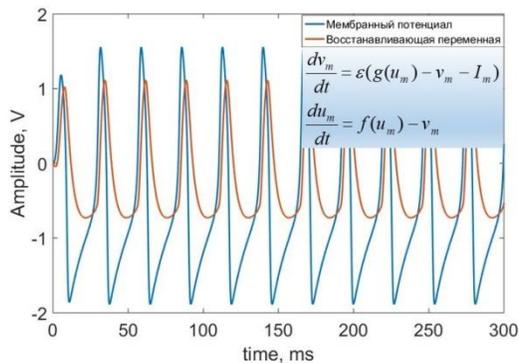
RRAM    Математика    ИНС    Тесты    Снапшот    Настройки    Реконнект

	0	1	2	3	4	5	6	7
0	1080	266	1177	6519	18593	1177	6519	18593
1	1168	260	1251	8493	5226	1251	8493	5226
2	4495	260	1477	1251	6203	1477	1251	6203
3	4083	260	1124	1186	1376	1124	1186	1376
4	5866	260	1106	1168	8358	1106	1168	8358
5	1063	260	2172	1260	2271	2172	1260	2271
6	1214	260	1159	1205	1347	1159	1205	1347
7	1251	260	1196	1205	1447	1196	1205	1447
8	1289	260	2809	6335	6291	2809	6335	6291
9	1308	260	1279	1467	4380	1279	1467	4380
10	1205	255	1467	1159	683	1467	1159	683
11	1337	260	770	662	1205	770	662	1205
12	5089	260	4765	14827	10778	4765	14827	10778
13	1530	260	3692	1584	2740	3692	1584	2740
14	1406	260	3082	1488	1824	3082	1488	1824

- Базовое ПО содержит необходимый функционал для проведения исследований мемристивных устройств и для запуска моделей ИНС в кроссбаре
- Открытый исходный код на Python  
<https://github.com/neurocomputer/MemArdBoard>



Искусственные нейроны различной степени биологического правдоподобия основаны на модифицированной модели ФитцХью-Нагумо (ФХН) и оригинальной модели генератора на основе системы фазовой автоподстройки частоты

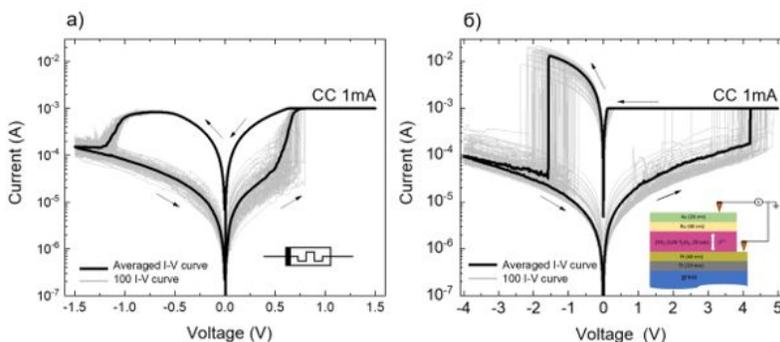


$$\frac{d\varphi}{d\tau} = y, \frac{dy}{d\tau} = z$$

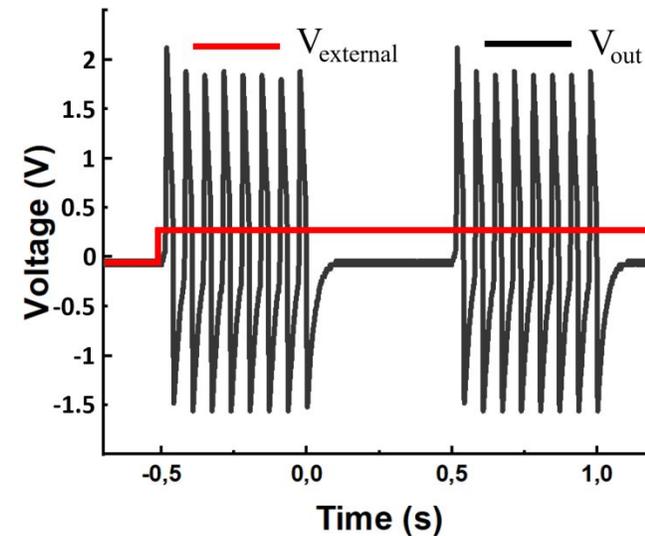
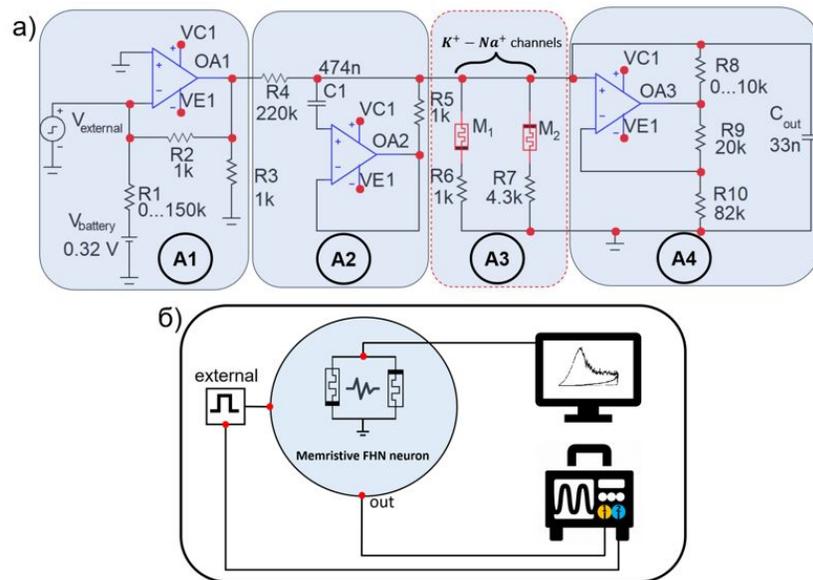
$$\varepsilon_1 \varepsilon_2 \frac{dz}{d\tau} = y - (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)z - (1 + \varepsilon_1 \cos \varphi)y$$

M.A. Mishchenko et al. Tech. Phys. Lett. **43**, 596 (2017)

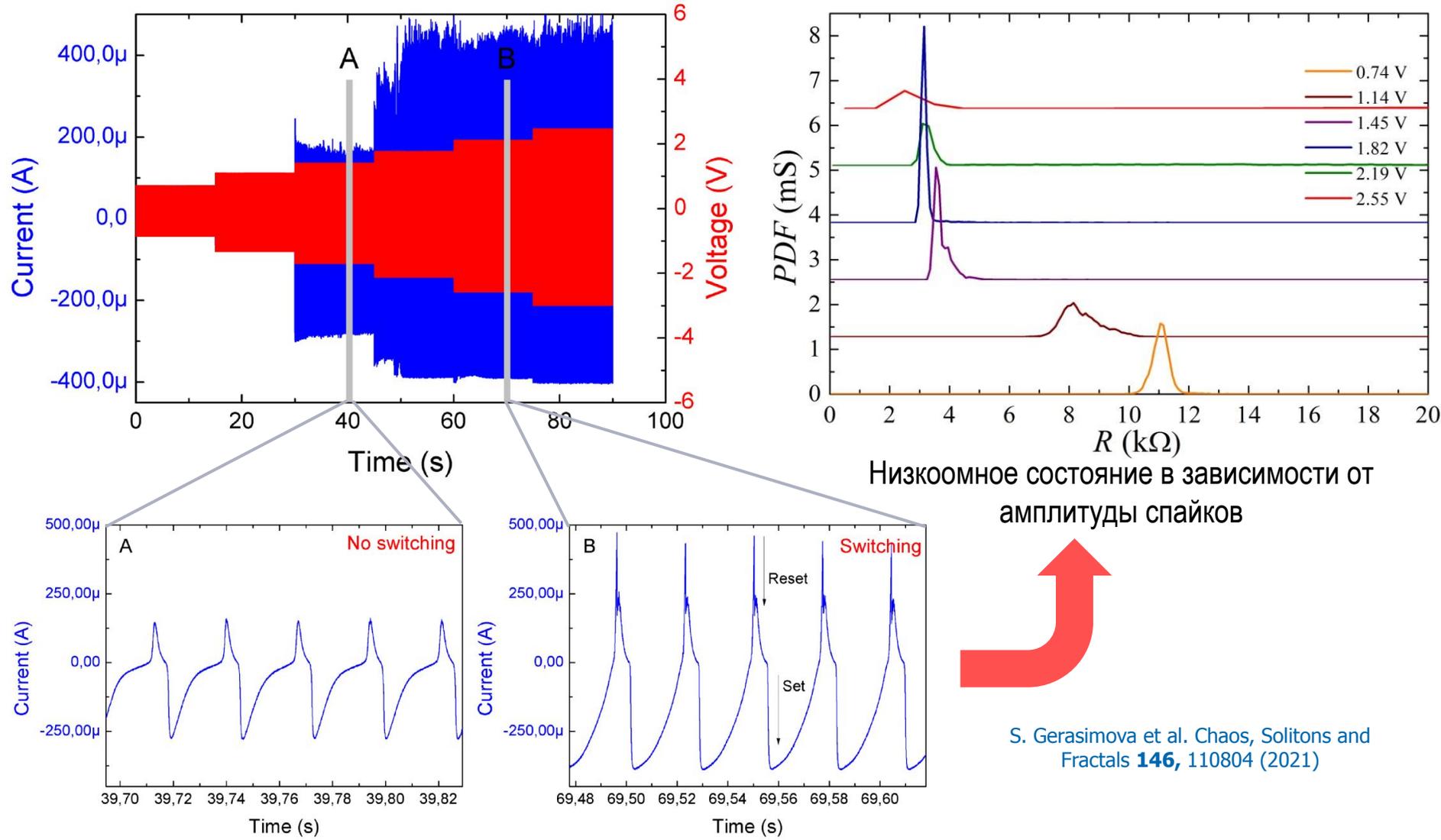
Разработана биологически правдоподобная аппаратная модель модифицированного нейроноподобного генератора ФХН, имитирующая ионную динамику настоящего нейрона



I.M. Kipelkin et al. Frontiers in Neuroscience (2024)



Стохастическая пластичность мемритивного устройства реализуется под воздействием спайкоподобной активности нейрона ФХН

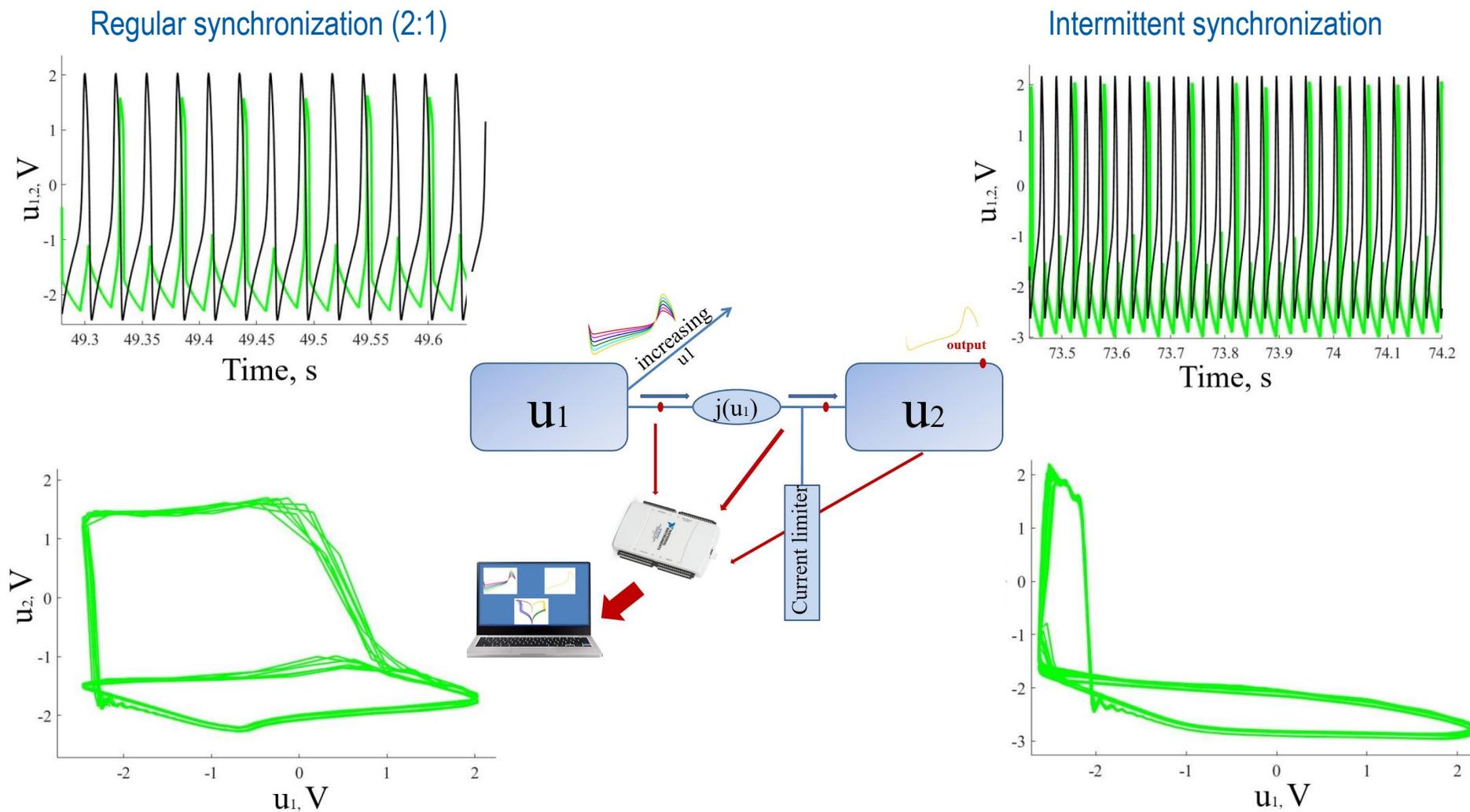


S. Gerasimova et al. Chaos, Solitons and Fractals **146**, 110804 (2021)

Осциллограммы входного напряжения и токового отклика в разных режимах

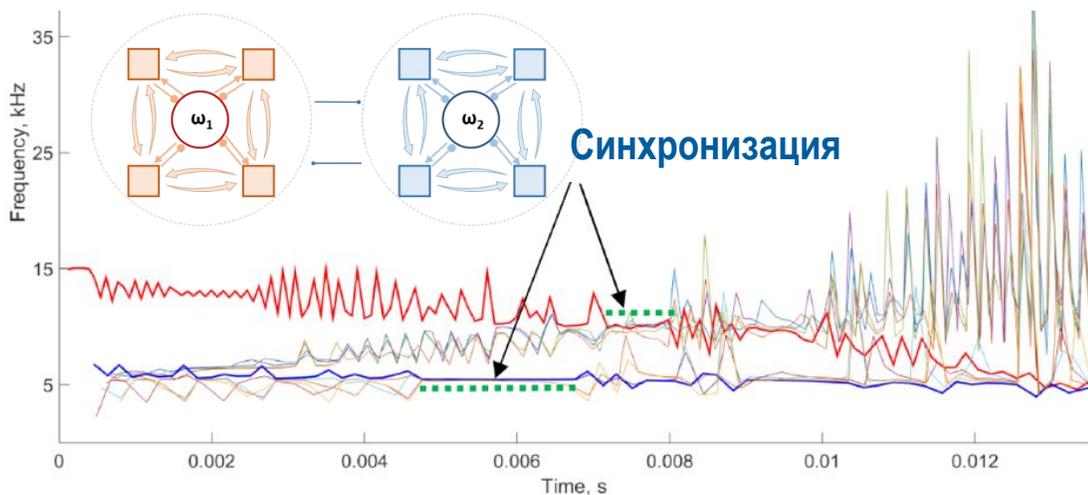


Численное моделирование и эксперименты демонстрируют различные режимы частотной синхронизации для электронных нейронов ФХН, связанных через мемристивное устройство



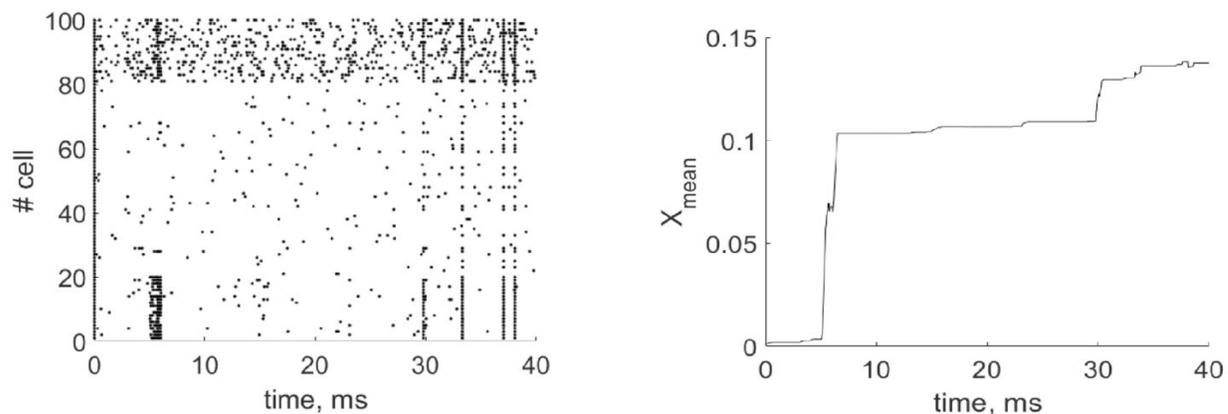


Синаптическая пластичность мемристивных устройств обеспечивает синхронизацию нейронов в ансамблях (популяциях), а также позволяет изучать более сложные явления в сетях мемристивно связанных нейронов

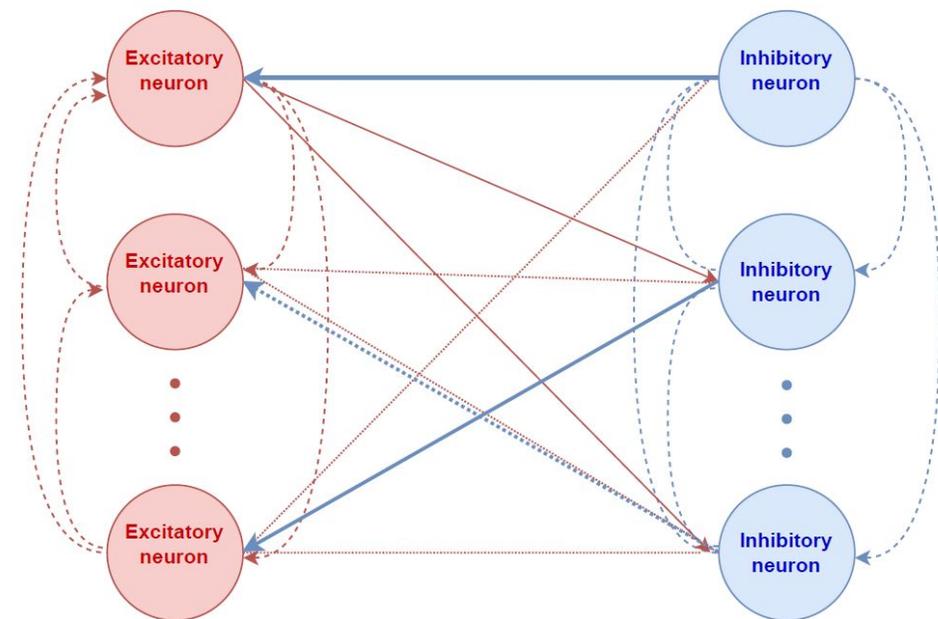


Растровая диаграмма активности 10 нейронов, связанных через мемристоры

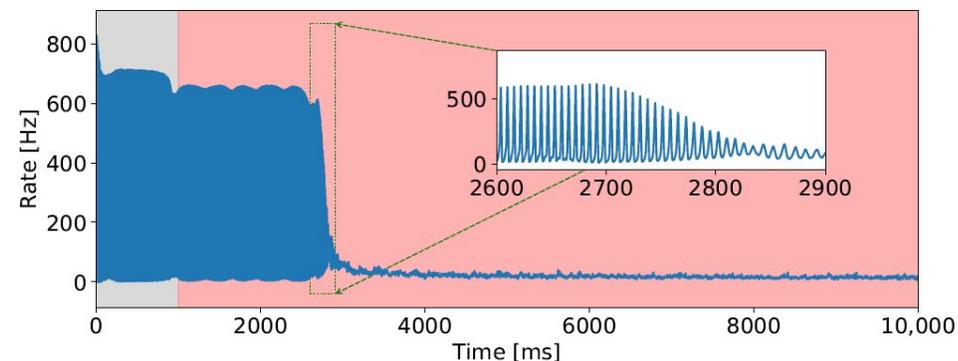
M. Mishchenko et al. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **55**, 394002 (2022)



Растровая диаграмма нейросетевой активности в ансамбле из 100 нейронов



Спайковая нейронная сеть с мемристивной пластичностью



Режимы популяционной активности

S.V. Stasenکو et al. *Mathematics* **11**, 3888 (2023)

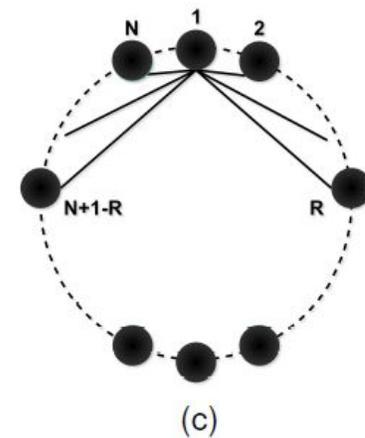
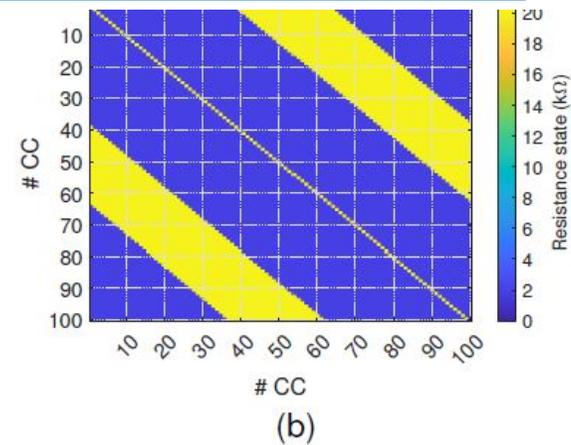
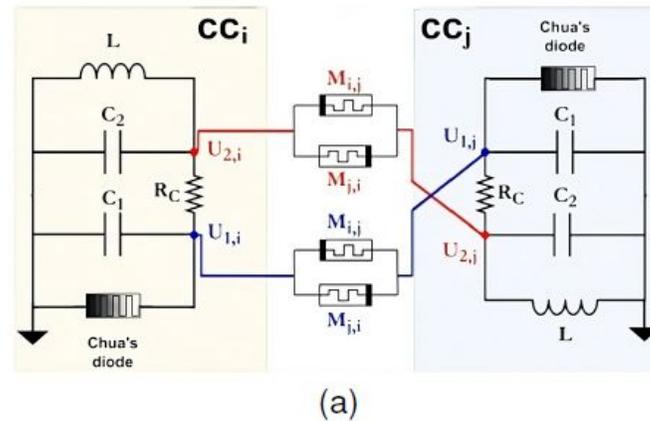
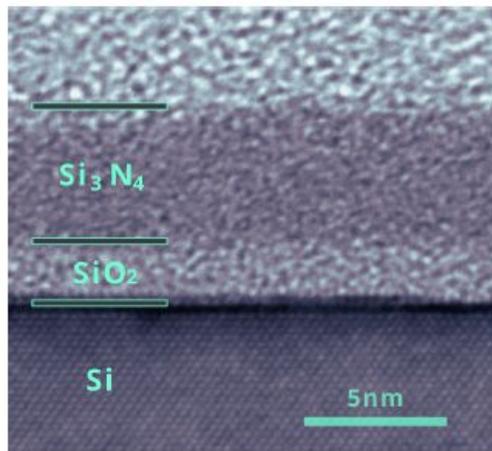


Fig. 1. (a) Circuit diagram of coupled CCs on both state variables by two anti-parallel memristors each, (b) A memristor crossbar connectivity matrix of  $N=100$  coupled oscillators with nonlocal connectivity of  $R=37$ , where  $R$  equals the number of adjacent nodes from each side (c) Non-local coupling scheme for a ring-based network

K.-A. Tsakalos et al. IEEE TCASII (2024)

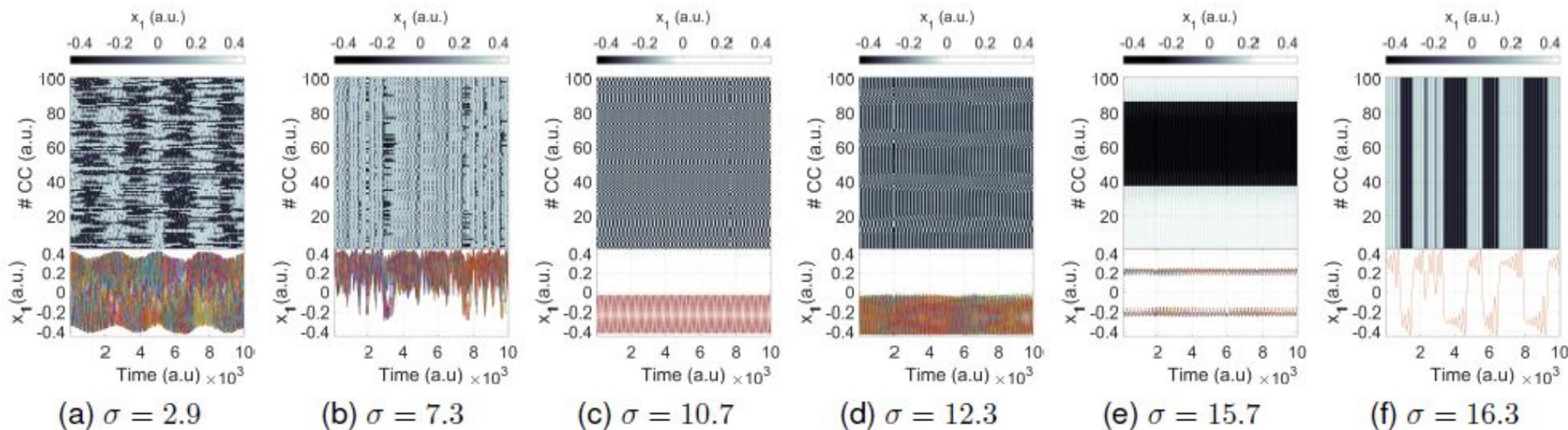
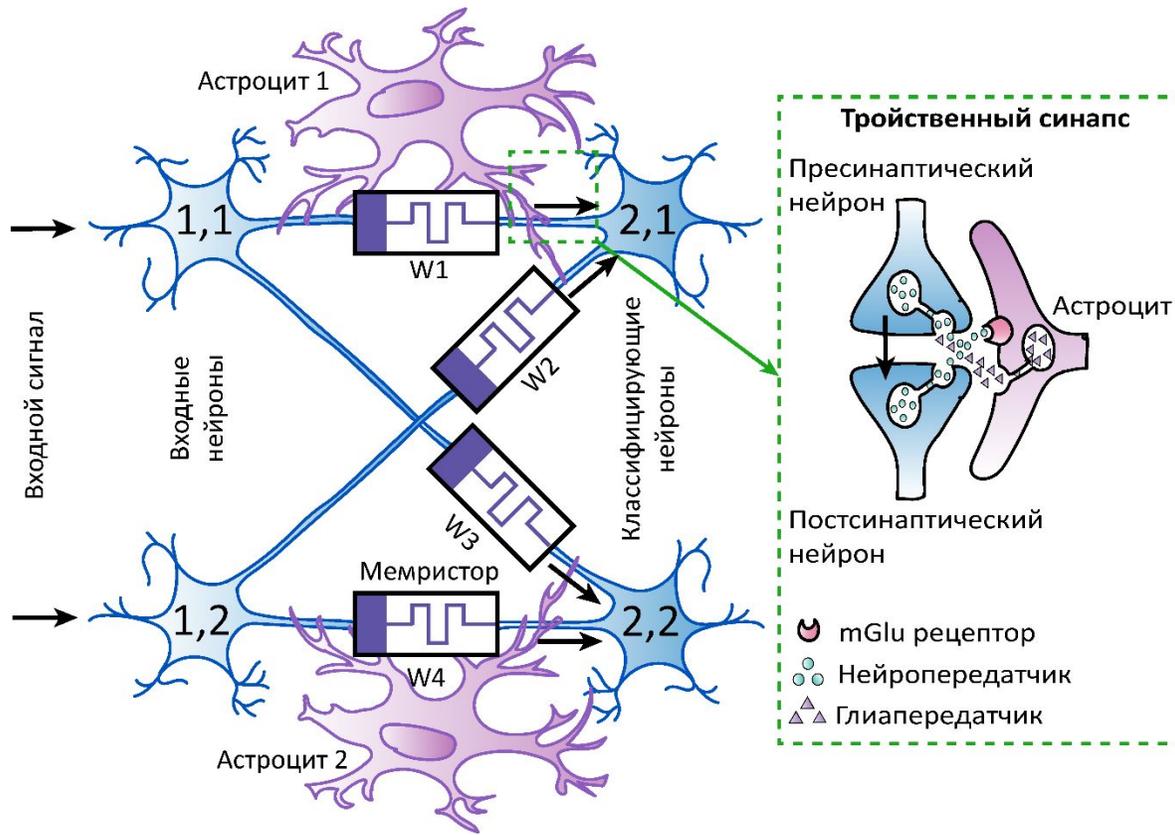


Fig. 4. Synchronization regimes under varying coupling strength ( $\sigma$ ) at  $R=37$ . (a) Double-well Incoherence; (b) Single-well Incoherence; (c) Phase-lag; (d) Chimera state; (e) Partial Synchronization; (f) Full Chaotic Synchronization. (g) The phase-parametric diagram presents the voltage traces of the first oscillator

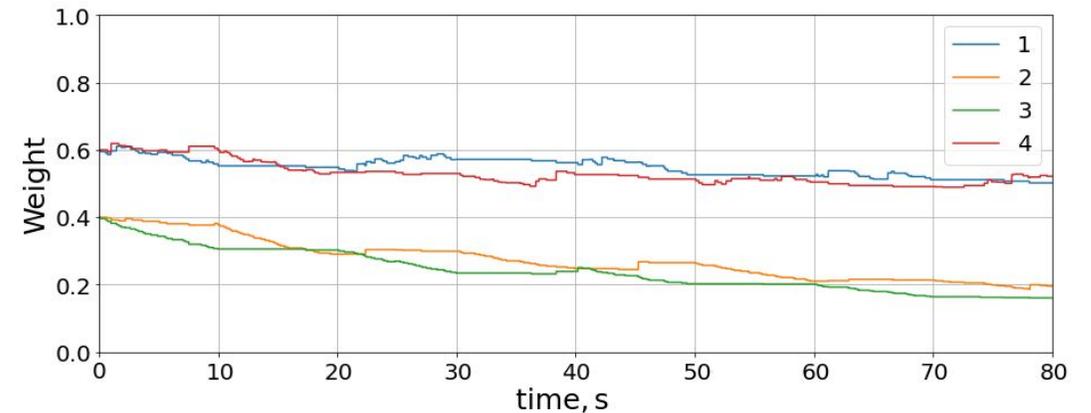


Разработаны математические модели, описывающие взаимодействие мемристоривных нейронов и мемристоривных астроцитов на уровне отдельных клеток

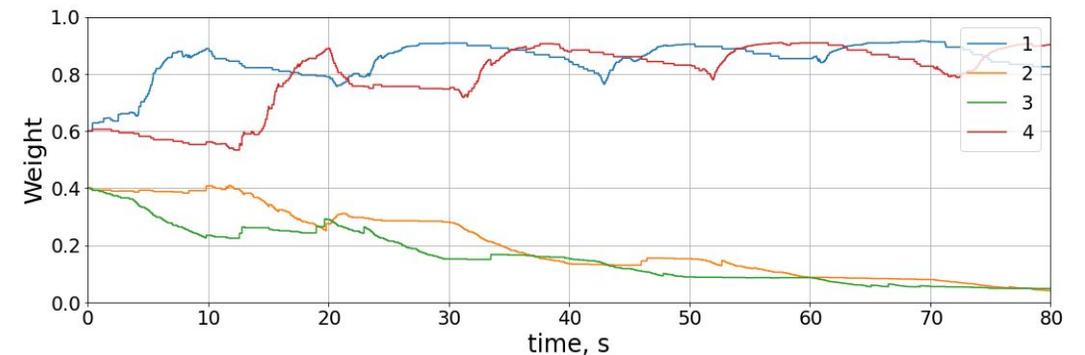
### Импульсная нейрон-астроцитарная сеть с мемристоривной пластичностью типа STDP



### Без астроцитарной регуляции



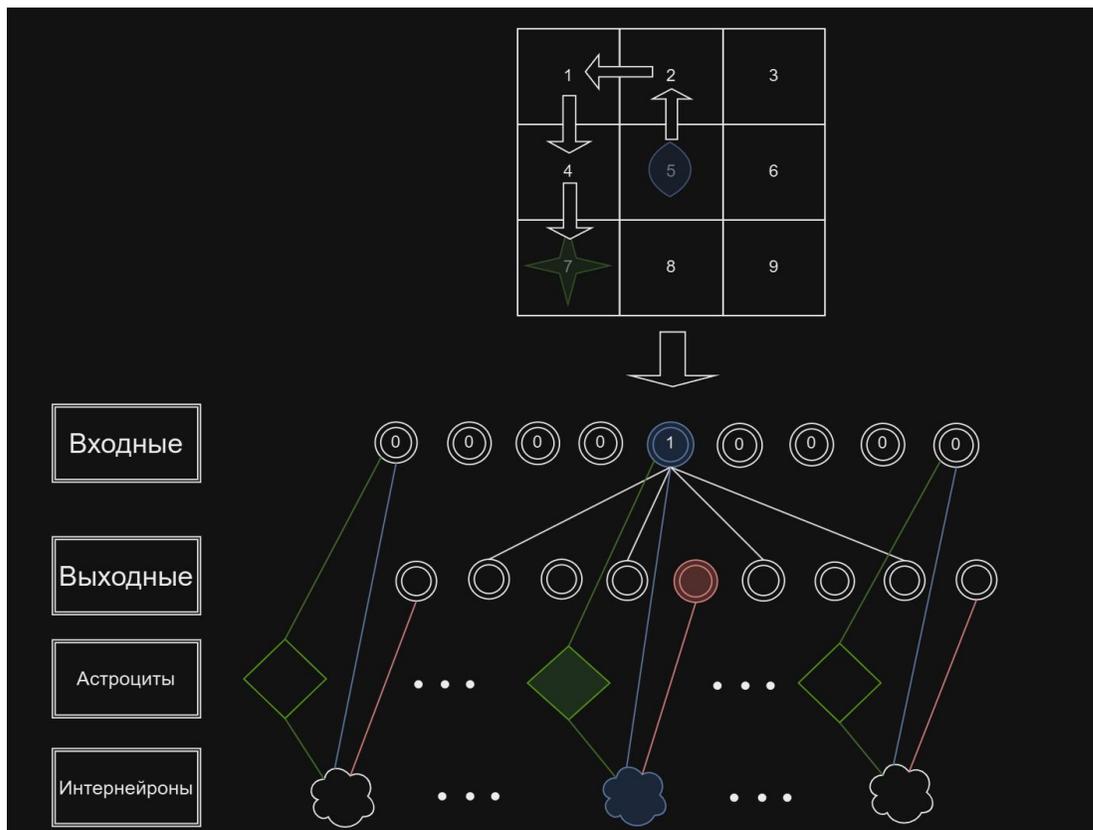
### С астроцитарной регуляцией



Результат отмечен Премией Президента РФ в области науки и инноваций для молодых учёных (Гордлеева Сусанна Юрьевна)

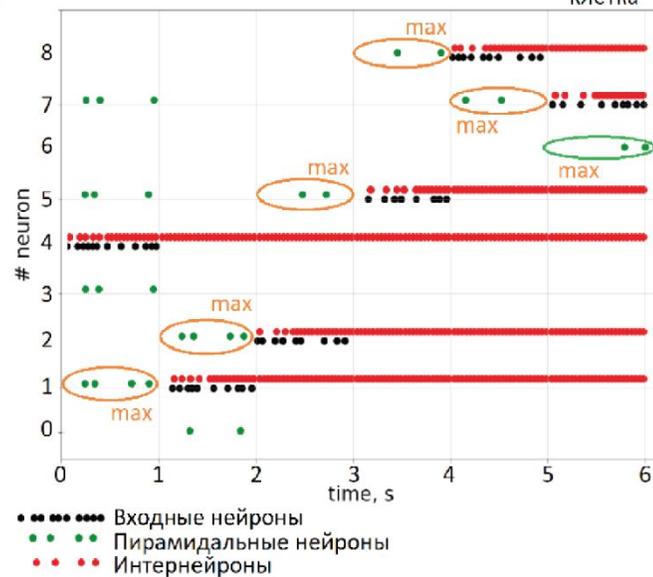
Разработаны математические модели мемристивных нейрон-астроцитарных сетей с учетом астроцитарного влияния на синаптическую передачу

### Модель мемристивной нейрон-астроцитарной сети в задаче MDP/POMDP

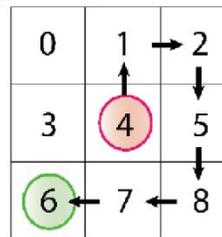


Положение агента:  $4 \Rightarrow 1 \Rightarrow 2 \Rightarrow 5 \Rightarrow 8 \Rightarrow 7 \Rightarrow 6$   
Целевая клетка

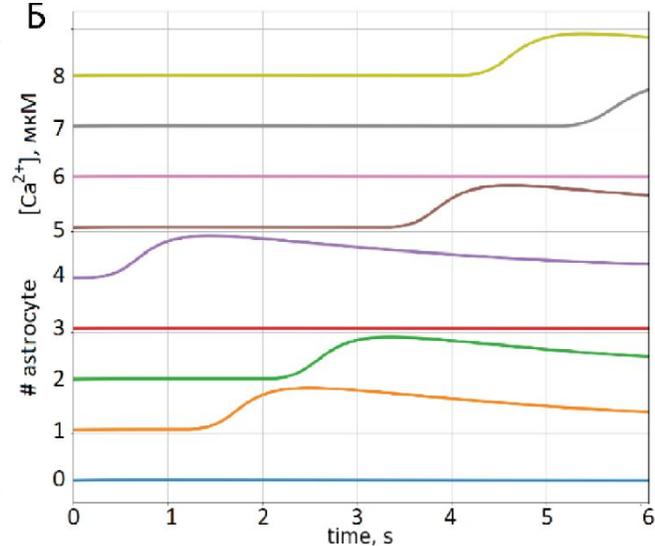
А



Перемещение агента

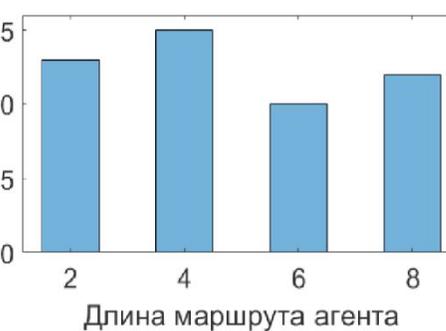


Б



Кол-во маршрутов

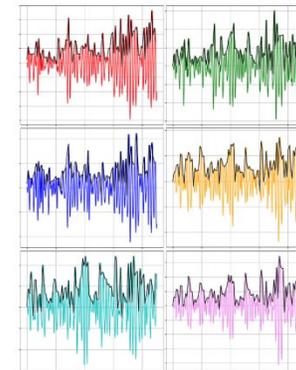
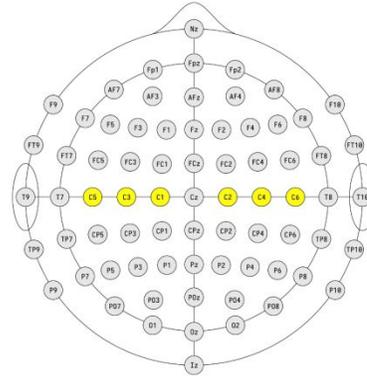
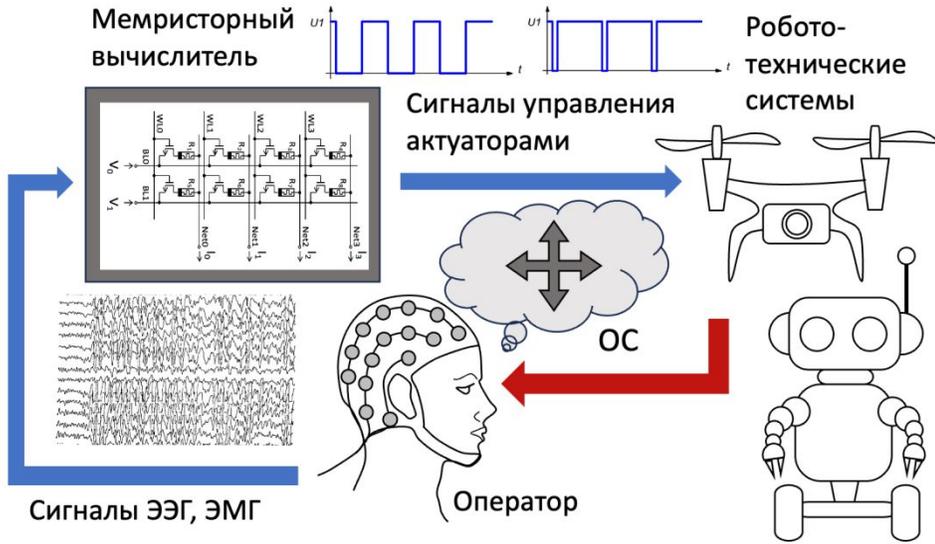
В



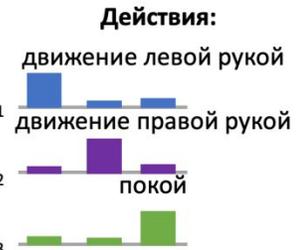
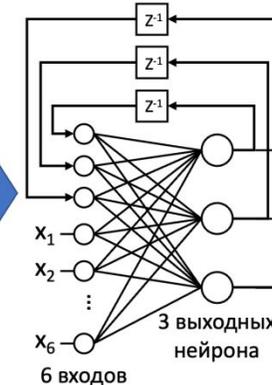
- Введение - мемристивные системы и их применения
- Дорожные карты в области мемристивных систем
- Технология мемристивных устройств
- Микроскопические механизмы
- Мемристор как сложная макроскопическая система
- Применения в технологиях ИИ



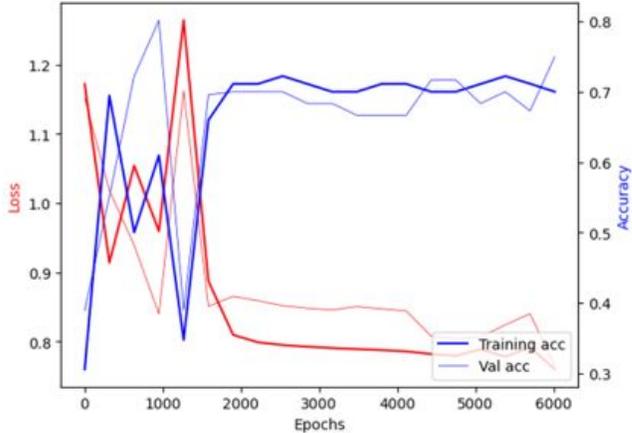
В составе нейроинтерфейса моторно-воображаемого типа продемонстрирована возможность классификации воображаемых движений с точностью 77% на макете контуры записи вычислительного ядра мемристорного нейропроцессора



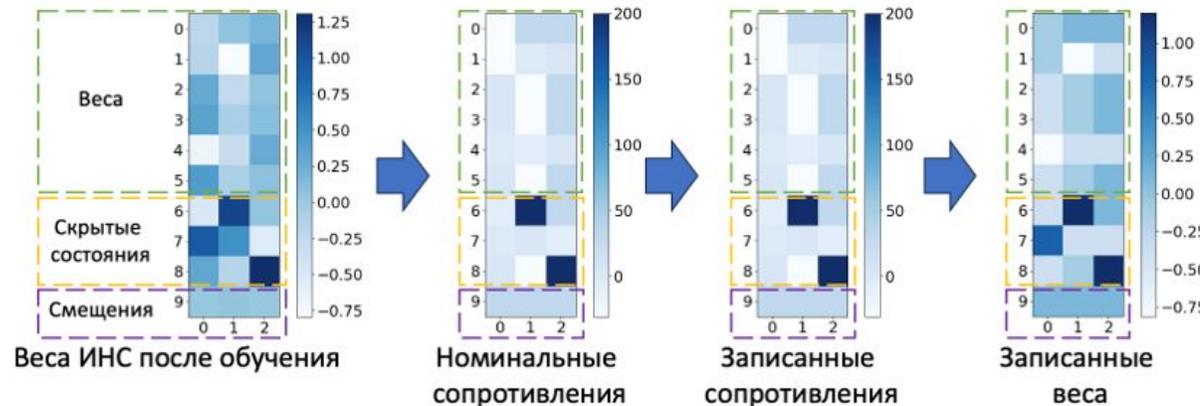
Однослойная RNN



Обучение на 100 точках с L2 и дропаутом

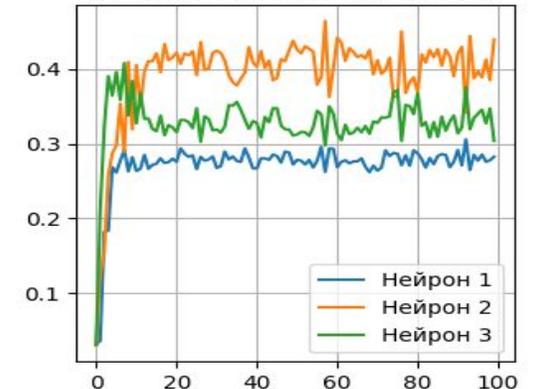


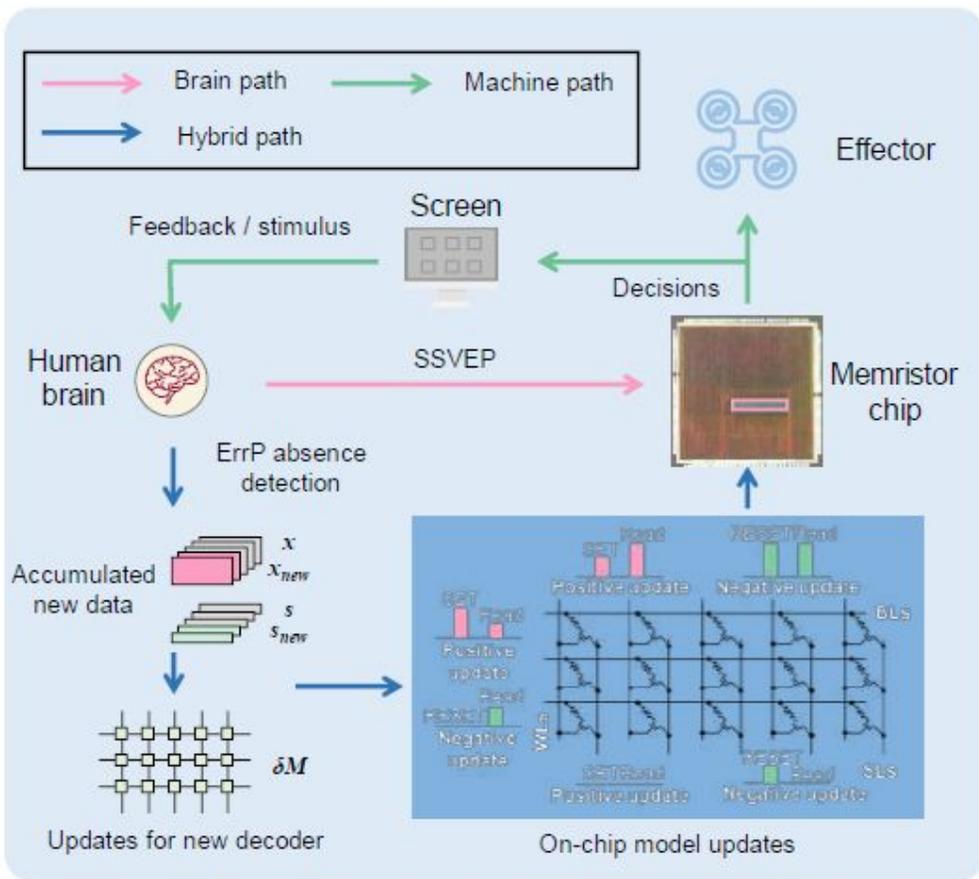
Запись весов



Пример работы сети

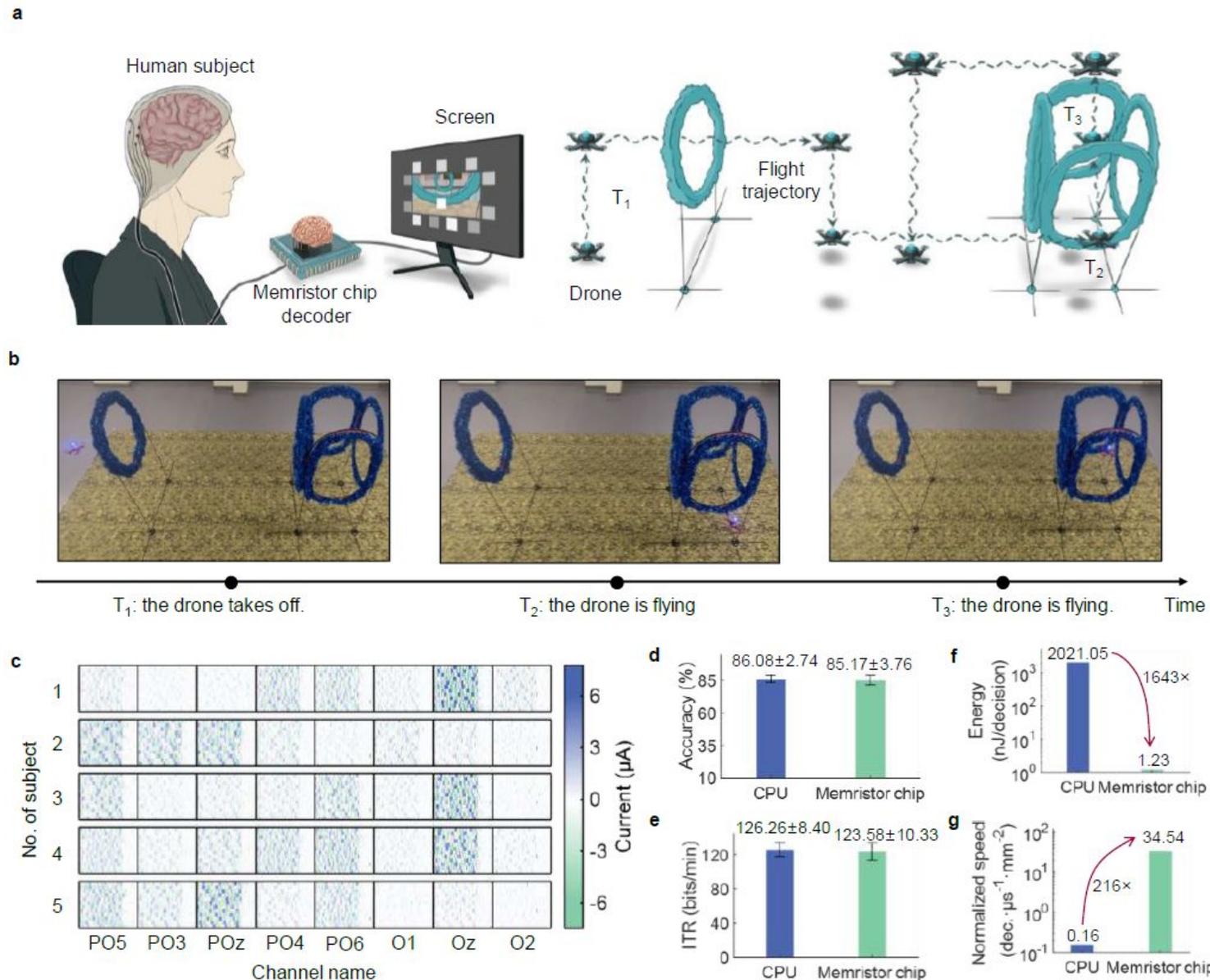
Пример 2. Целевой нейрон 2





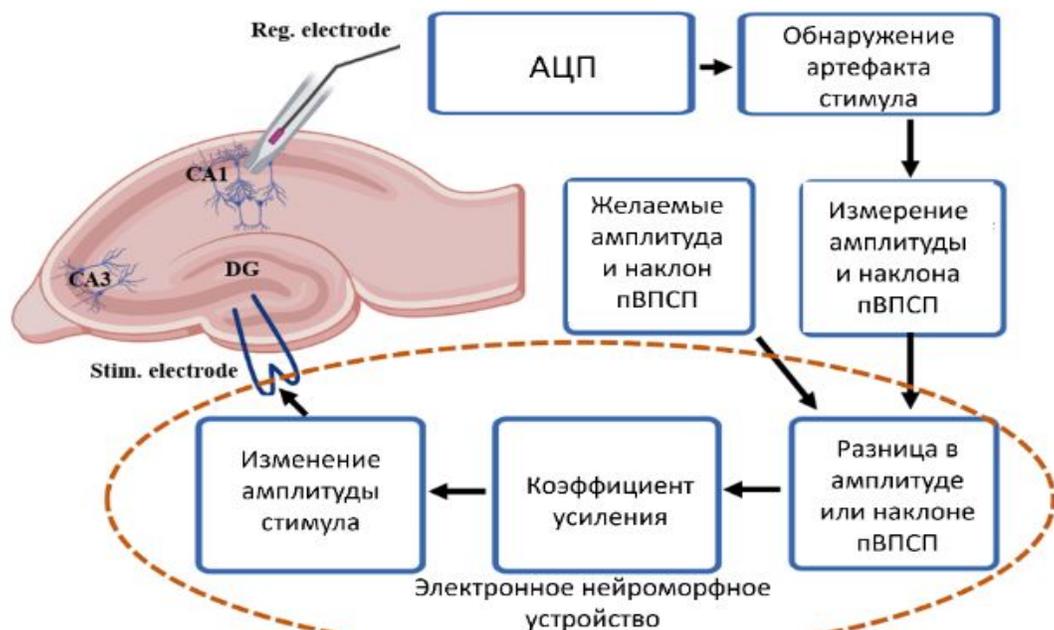
Демонстрация декодирования сигналов мозга в составе интерфейса «мозг-компьютер» для управления дроном с использованием отработанного процесса интеграции мемристоров (0,5 мкм x 0,5 мкм) с приборным слоем КМОП 130 нм (размер кроссбара 1T1R 1024 на 128).

Z. Liu et al. Research Square preprint (2024)

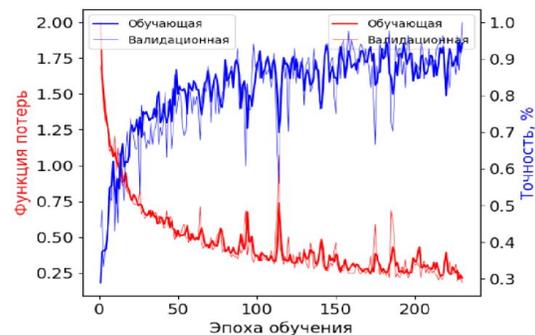
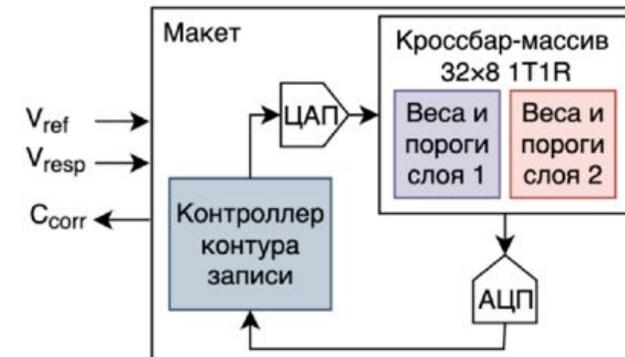
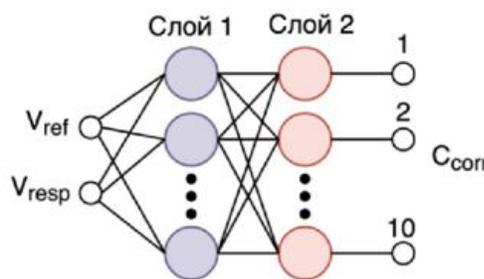
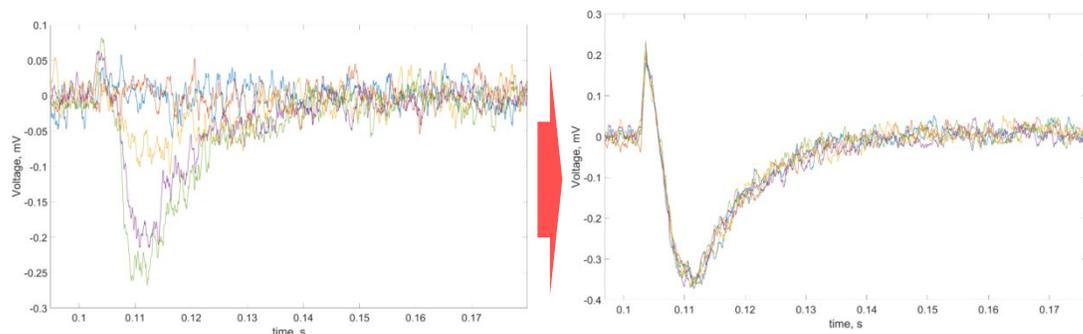




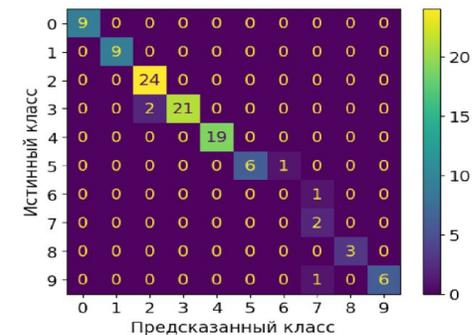
Реализуется технология адаптивной стимуляции, открывающая возможность для восстановления функциональности перфорантного пути за счет введения в гиппокамп мемристоривной нейроморфной системы для замещения утраченных участков



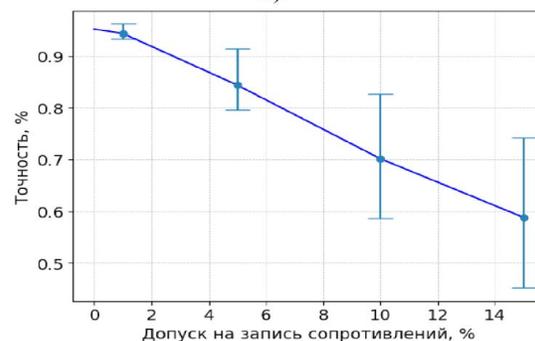
### До и после адаптации стимуляции



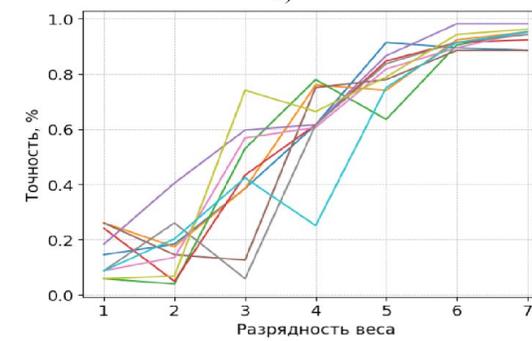
а)



б)



в)

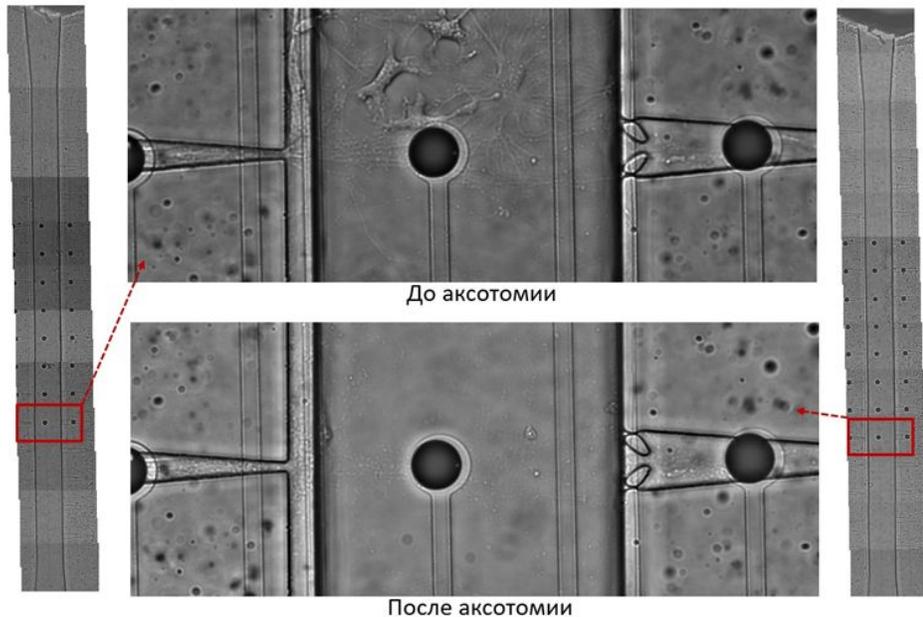
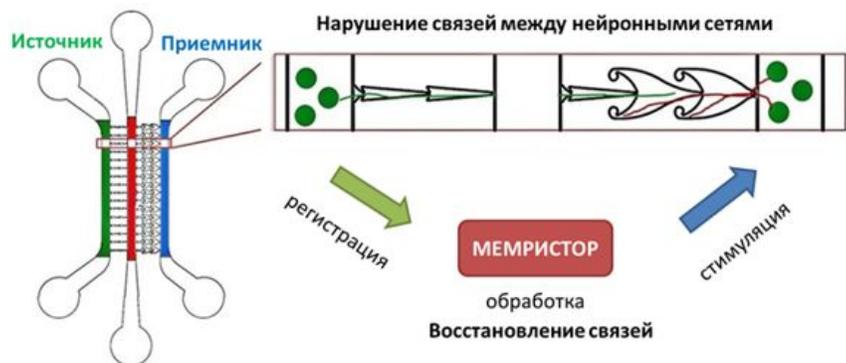


г)

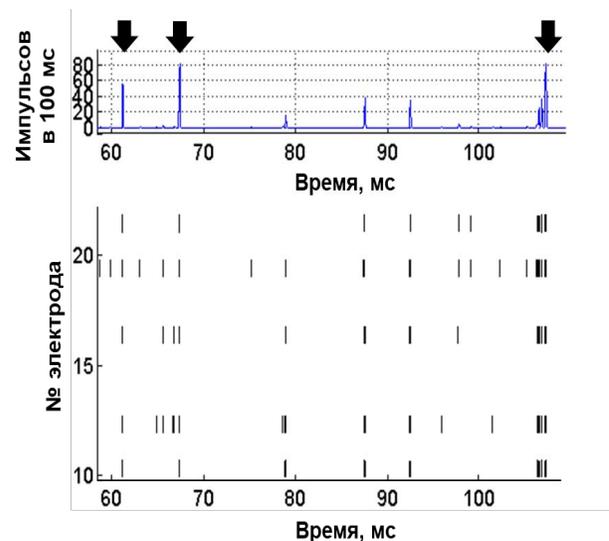


Мемристор может выполнять функцию выделения полезной информации из активности нейрональной сети в аналоговом виде (динамики внеклеточного потенциала), которая может использоваться для генерации активности в другой сети клеток, замещая тем самым физиологическую функциональную связь

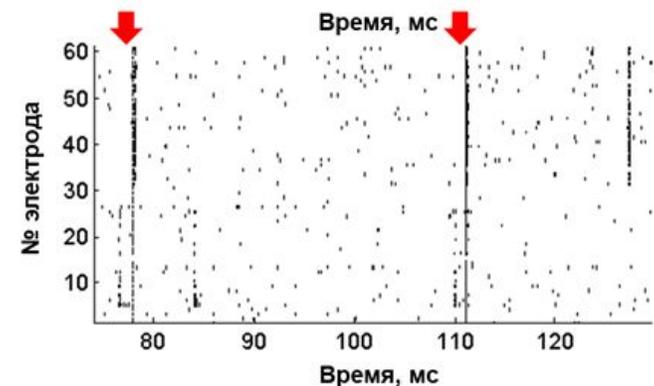
### Дизайн эксперимента



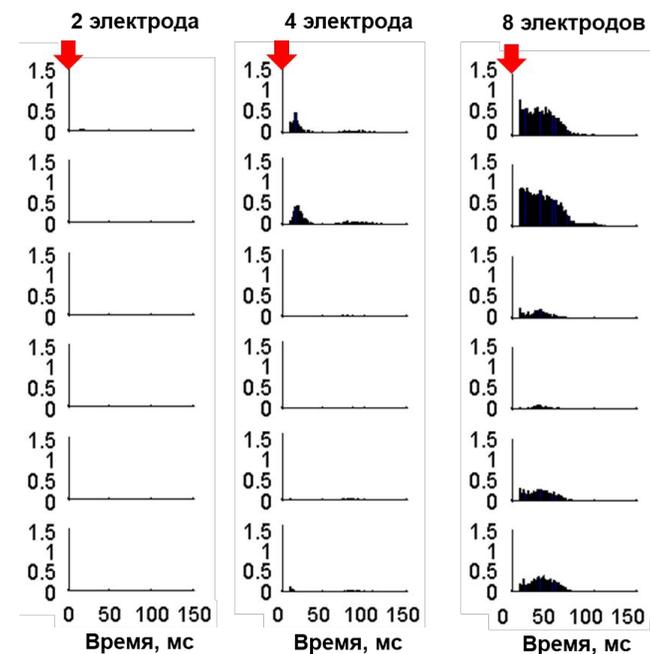
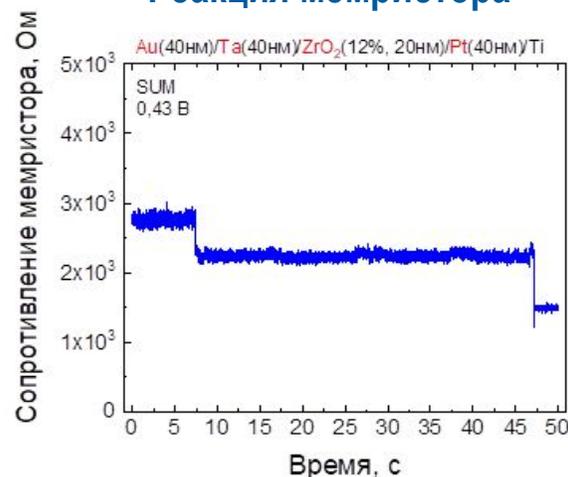
### Активность в Источнике



### Восстановленная активность в Приемнике

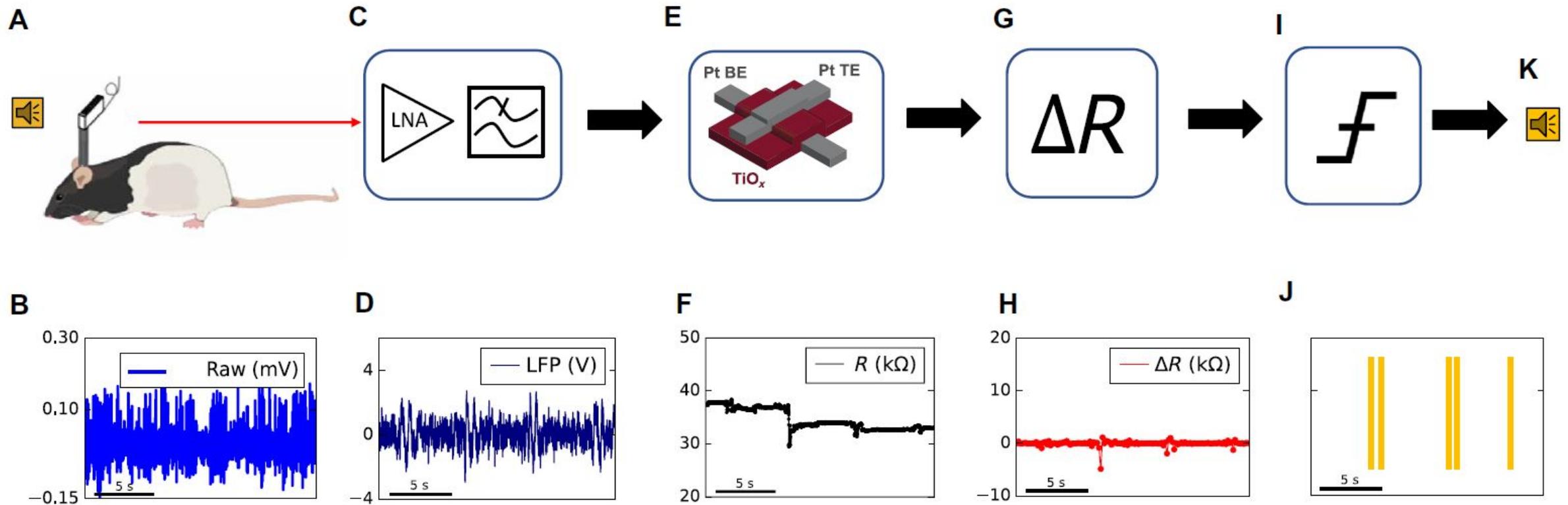


### Реакция мемристора





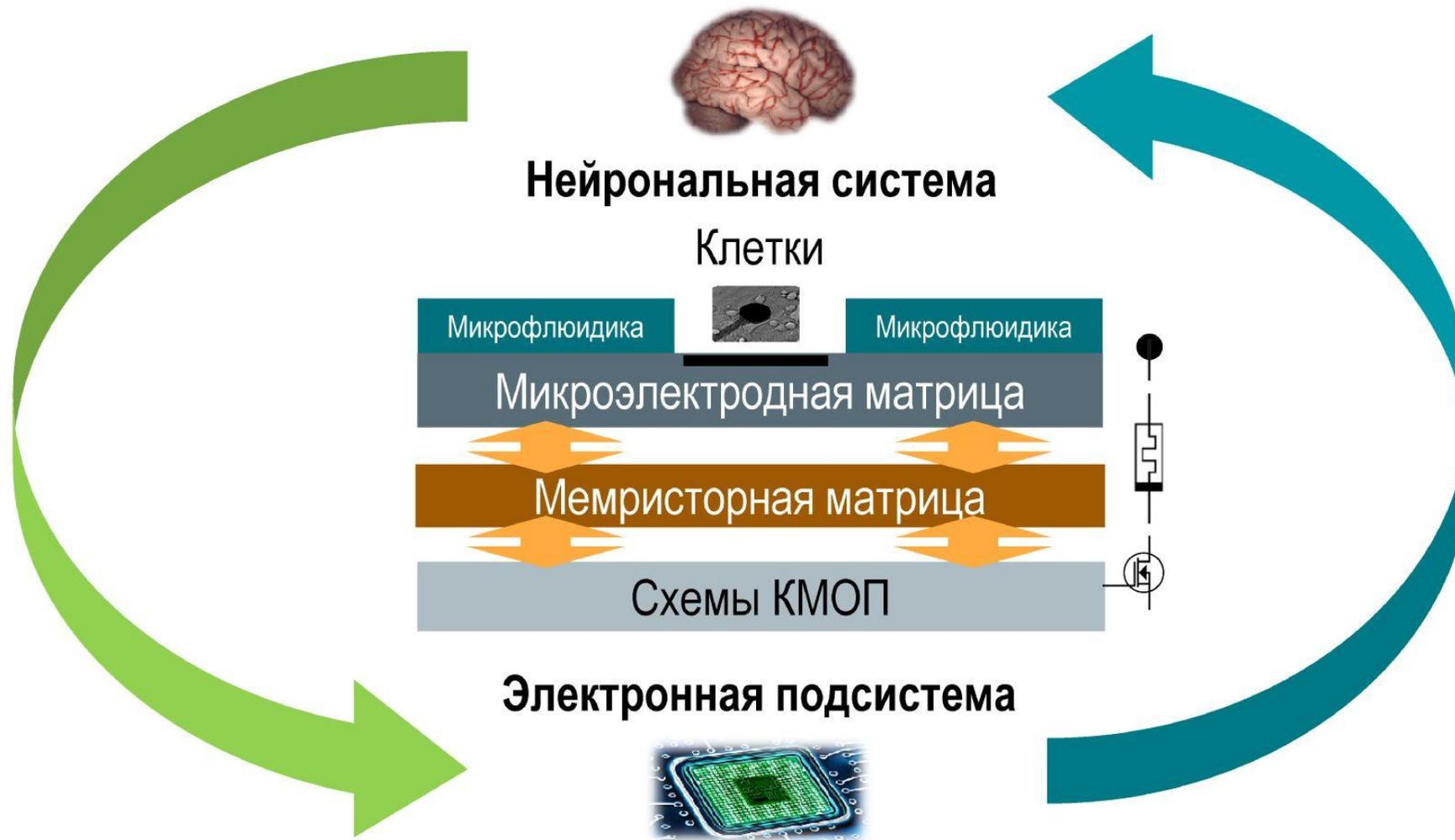
The efficacy of the memristor-based system capabilities to process real-time *in vivo* neural data paves the way for low-power chronic neural activity monitoring and biomedical implants



**Fig. 1. Signal processing flow in auditory cue detection using memristor devices.** (A and B) We recorded neuronal activity with a microwire rendering extracellular activity of the VTA; the microwire is fully described in (35). (C and D) Signal from one channel is amplified and filtered via a low noise amplifier (LNA), resulting in LFP activity. (E and F) Signal is then applied to a memristive device, eliciting changes in its resistive state (38). (G and H) System captures these resistive changes in the memristor. (I and J) Appropriate thresholds are set to flag each detected auditory cue. (K) Last, the system classifies the detected signals based on the set threshold.



Нейрогибридный чип совмещает на одном кристалле упорядоченную культуру нейронов в микрофлюидном чипе, микроэлектродную матрицу, интегрированную с массивами мемристорных устройств в верхних слоях металлизации приборного слоя КМОП с управляющими схемами

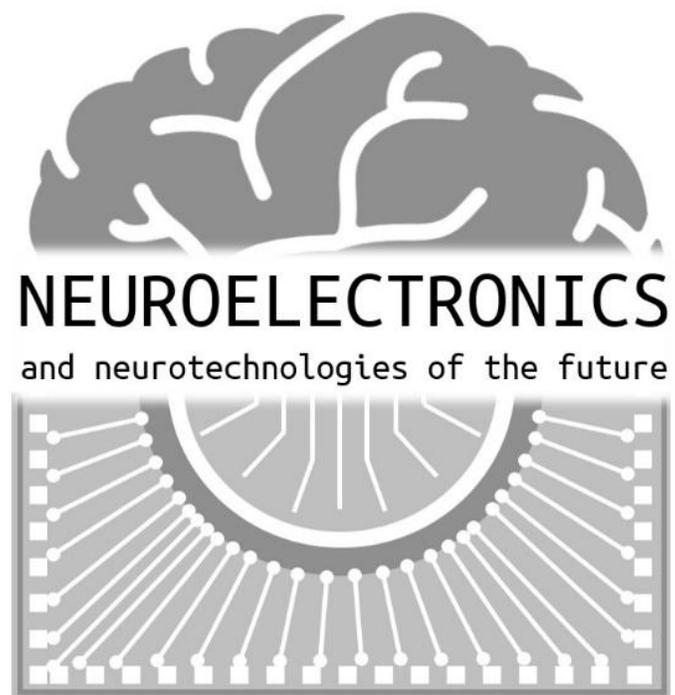




- Введение - мемристивные системы и их применения
- Дорожные карты в области мемристивных систем
- Технология мемристивных устройств
- Микроскопические механизмы
- Мемристор как сложная макроскопическая система
- Применения в технологиях ИИ



- ✓ Мемристоры – это очень простые устройства и в то же время очень сложные нелинейные системы, обещающие широкий спектр приложений от микросхем памяти и нейроморфных вычислительных систем в памяти до адаптивных нейроинтерфейсов
- ✓ Существенный задел в области физики и технологии мемристивных устройств позволяет аппаратно реализовать энергоэффективные нейроморфные вычислительные системы на основе интеграции мемристоров в традиционный КМОП-процесс
- ✓ Универсальное описание мемристивного эффекта несет в себе множество полезных эффектов с точки зрения создания мозгоподобных систем в полном согласии с законами нелинейной динамики и статистической радиофизики
- ✓ Индуцированные шумом явления очень важны для понимания мемристивного эффекта и управления откликом мемристивного устройства как сложной нелинейной системы с точки зрения нейроморфных и нейрогибридных приложений
- ✓ Наибольшие перспективы связаны с созданием нейрогибридных систем для решения задач более высокого функционального уровня, связанных с адаптивными нейроинтерфейсами и системами «мозг-на-чипе» нового поколения
- ✓ Разработаны и последовательно реализуются концепции нейрогибридных систем на основе разных комбинаций



**I школа-конференция с международным участием  
«Нейроэлектроника и нейротехнологии будущего»  
Нижний Новгород, 25-29 ноября 2024**

<https://neuroelectronicsnn.unn.ru/>

Спасибо за внимание!

Алексей Михайлов  
[mian@nifti.unn.ru](mailto:mian@nifti.unn.ru)