



Построение нейросетевых синапсов на основе мемристоров и FeFET-транзисторов

М.С. Тарков,

В.П. Попов, И.Е. Тыщенко

Институт физики полупроводников СО РАН им. А.В. Ржанова,

г. Новосибирск

tarkov@isp.nsc.ru

Характеристики различных типов памяти

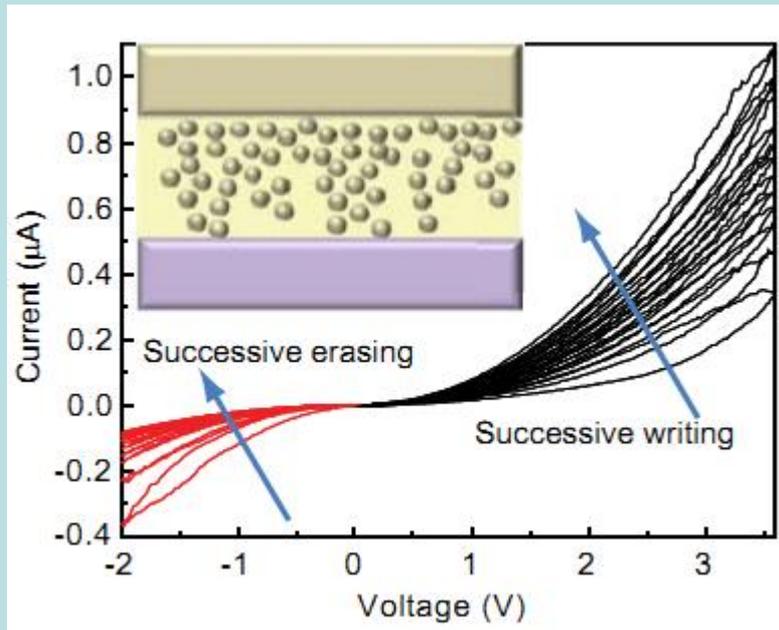
	<i>Мемристор</i>	<i>DRAM</i>	<i>FLASH</i>	<i>HDD</i>
Время чтения, [нс]	10	10 – 50	25 000	$(5-8) \cdot 10^6$
Время записи, [нс]	0,2 – 20	10 – 50	200 000	$(5-8) \cdot 10^6$
Время хранения информации	годы	менее сек.	годы	Годы
Количество циклов записи	10^{12}	10^{16}	$10^3 - 10^6$	10^{15}
Энергия на запись одного бита, [пДж]	0,1 – 3	2	10 000	$(1-10) \cdot 10^9$

МЕМРИСТОР – ПЕРСПЕКТИВНЫЙ КОМПОНЕНТ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

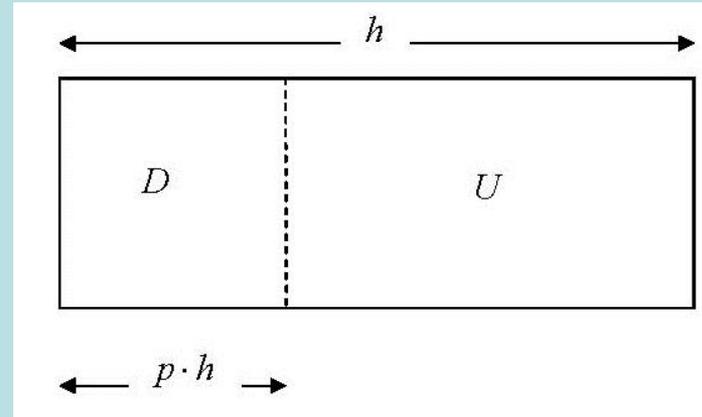
© 2012 г. В.А. ВАСИЛЬЕВ, П.С. ЧЕРНОВ

Пензенский государственный университет

Аналоговый мемристор



Pd/WO₃/W – аналоговый мемристор

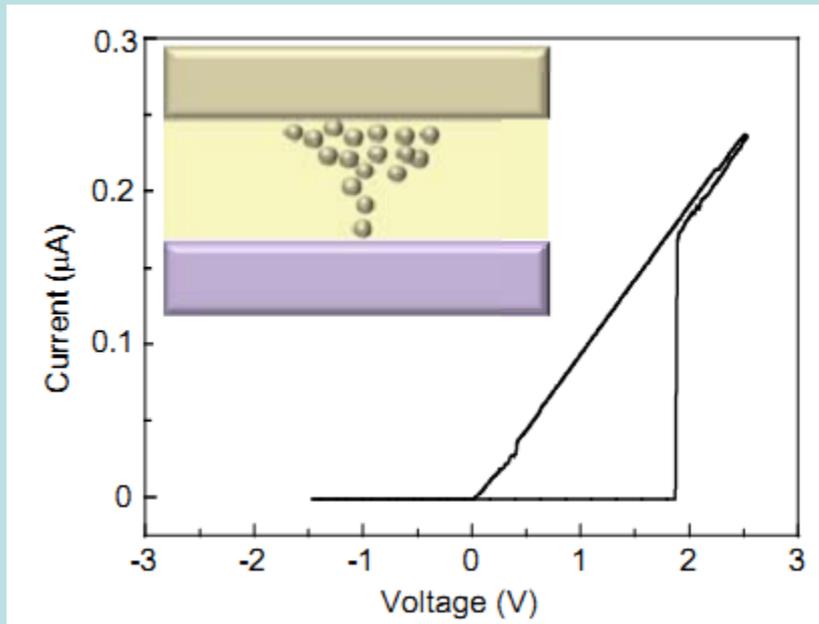


Memristance

$$M(p) = p \cdot R_{on} + (1 - p) \cdot R_{off}$$

$$p \in [0, 1]$$

Бинарный мемристор

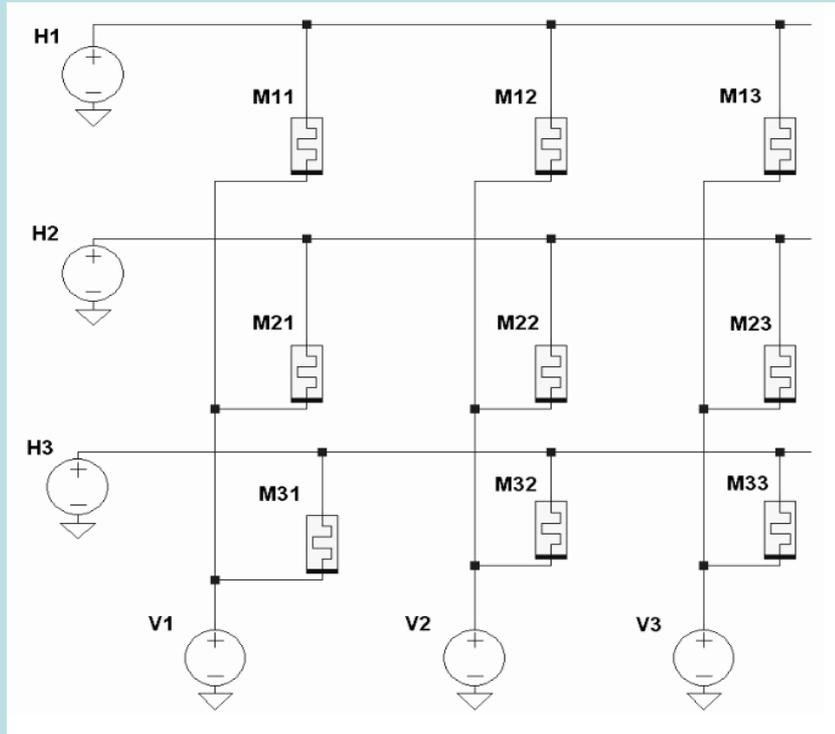


Ag/WO₃/W – Бинарный мемристор

При переключении филамента сопротивление бинарного мемристора изменяется с высокого на низкое и наоборот.

Таким образом мы можем хранить в мемристоре 1 или 0 (-1).

Программирование кроссбара с бинарными мемристорами



Напряжения для установки низкого сопротивления мемристора M11

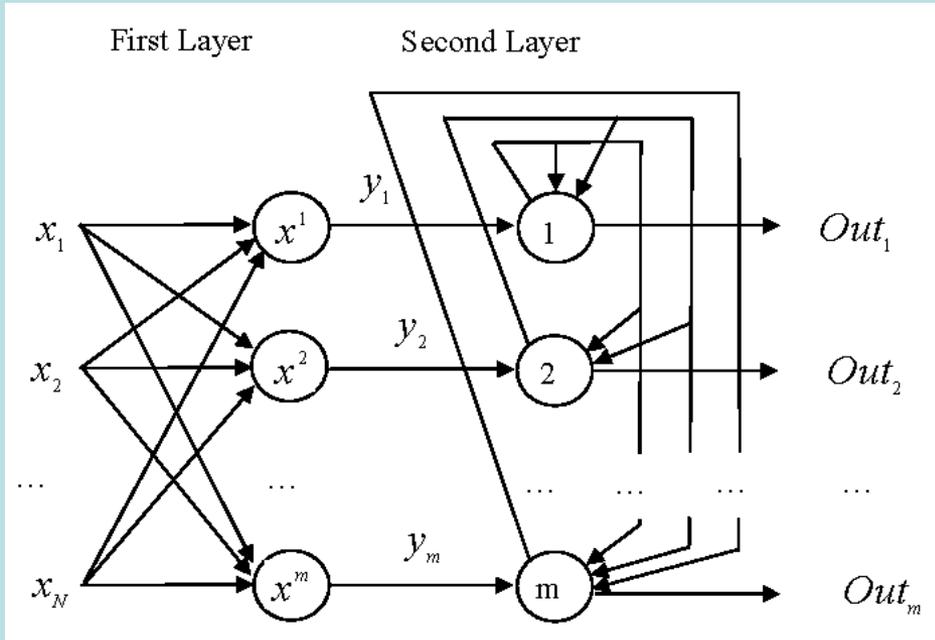
H1	H2	H3	V1	V2	V3
+7	0	0	-7	+7	+7

Yakopcic, C., Taha, T.M., Subramanyam, G., Pino, R.E.:

Memristor SPICE Model and Crossbar Simulation Based on Devices with Nanosecond Switching Time.

Proc. of Int. Joint Conf. on Neural Networks, Dallas, Texas, USA, August 4-9. (2013)

Сеть Хемминга



$$y_i = 1 - \frac{d_H(x^i, x)}{N}$$

$$d_H(x^i, x)$$

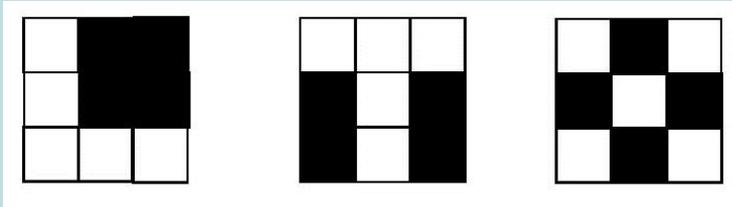
- Расстояние Хемминга

Реализация сети Хемминга на основе мемристорного кроссбара

Вычисления в первом слое сети Хемминга мы реализуем как скалярное произведение входного вектора на эталонный на мемристорном кроссбаре. Максимальная проводимость g_H бинарного мемристора соответствует хранимой компоненте 1 эталонного вектора, а минимальная проводимость g_L соответствует компоненте -1.

$$y_i = (x, w^i) \quad w_j^i = \begin{cases} g_L, & \text{if } x_j^i = -1 \\ g_H, & \text{if } x_j^i = 1 \end{cases} \quad g_L \leq g_H / (N - 1)$$

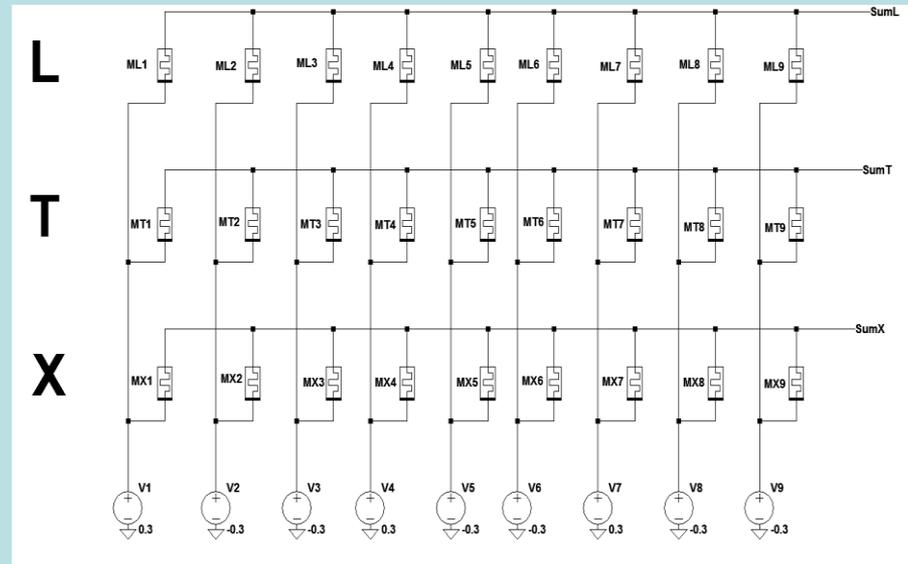
Первый слой сети Хемминга



$$L = (1, -1, -1, 1, -1, -1, 1, 1, 1)$$

$$T = (1, 1, 1, -1, 1, -1, -1, 1, -1)$$

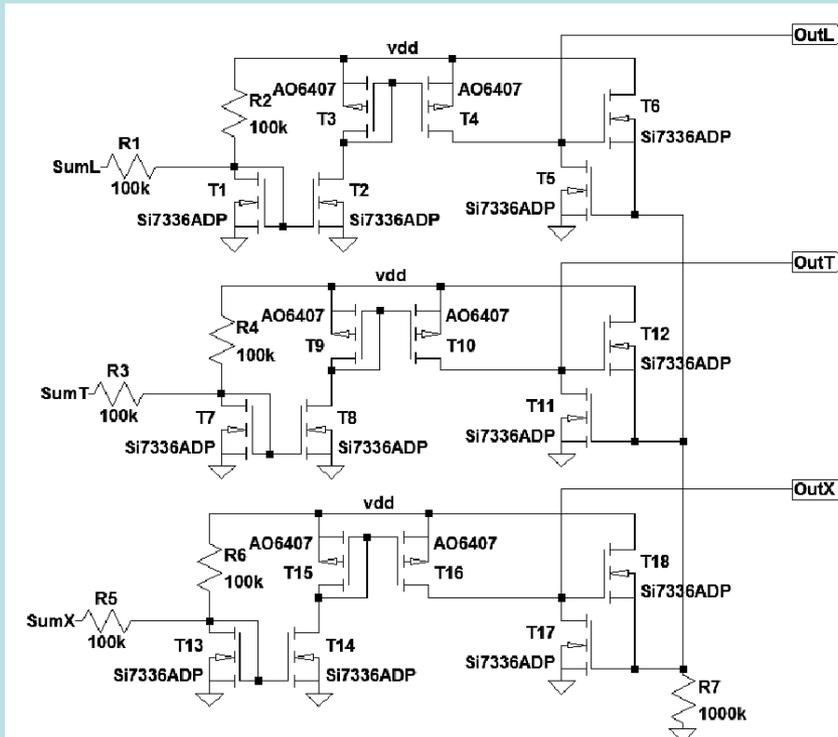
$$X = (1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1)$$



Входные напряжения для изображения T

V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9
0.3	0.3	0.3	-0.3	0.3	-0.3	-0.3	0.3	-0.3

Второй слой сети Хемминга (WTA)



$$SumT > SumL$$

$$SumT > SumX$$

$$OutT \approx 4.5 \text{ volts}$$

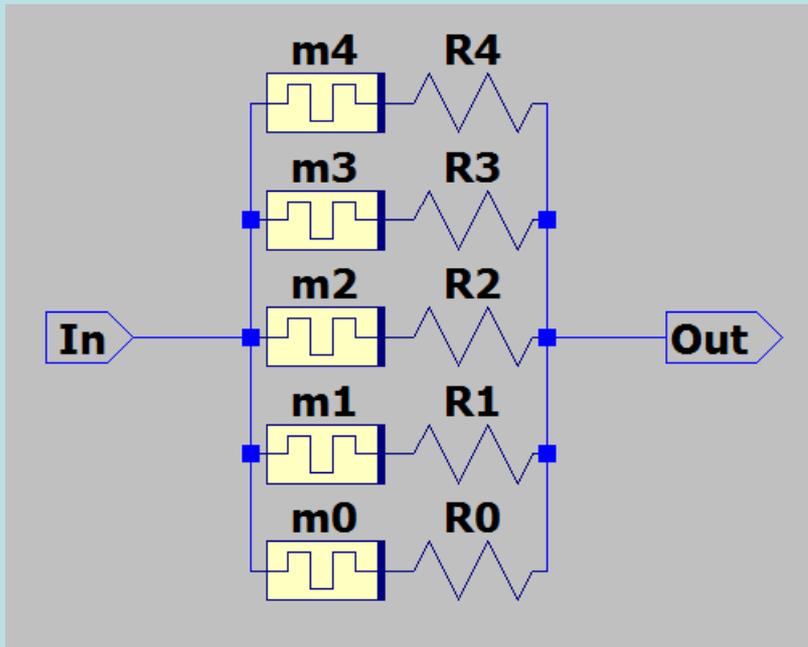
$$OutL = OutX \approx 10^{-4} \text{ ВОЛЬТ}$$

Lazzaro, J., Ryckebusch, S., Mahowald, M.A., Mead, C.A.

[Winner-take-all networks of O \(n\) complexity.](#)

Advances in neural information processing systems. 703-711 (1989)

Перестраиваемая многоуровневая ячейка памяти на основе бинарных мемристоров

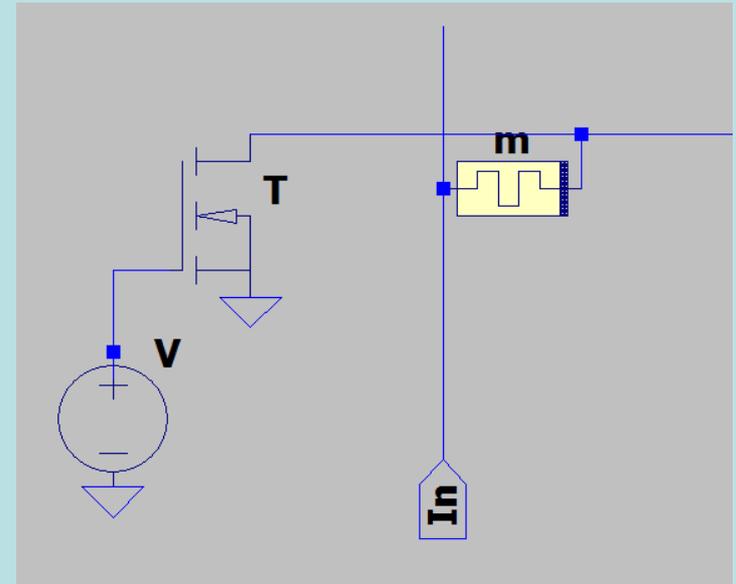
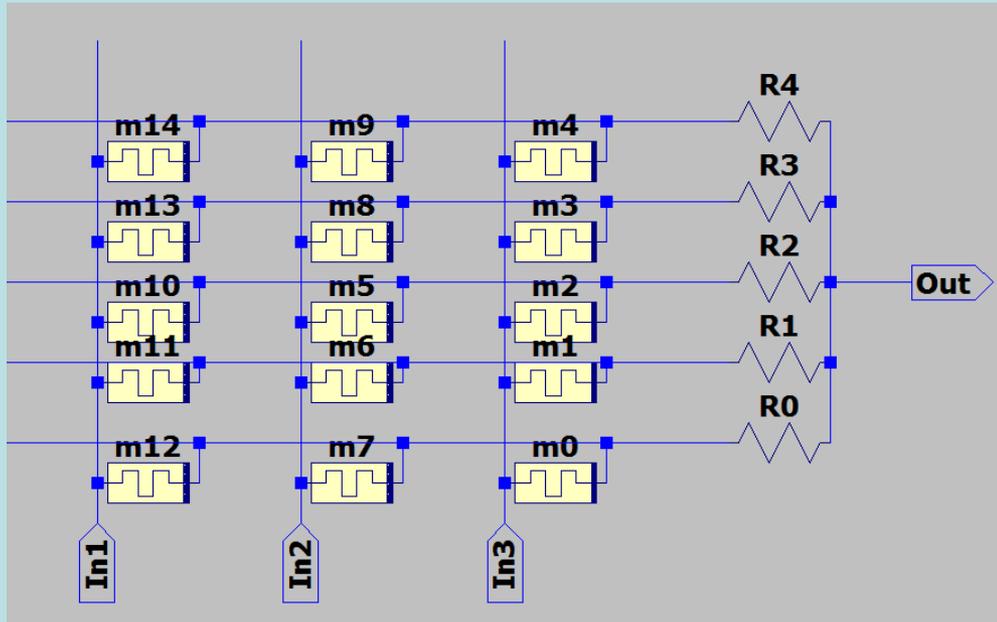


$$R_i = R / 2^i, i = 0, 1, \dots, n - 1$$

$$m \ll R / 2^n$$

$$R \ll M / n$$

Задание массива весовых коэффициентов



Определение числа разрядов на основе набора весов слоя нейронной сети

1. Среди весовых коэффициентов слоя нейронов w_1, w_2, \dots, w_L , L — число весовых коэффициентов слоя выбрать коэффициент $w_{\min} \neq 0$ такой, что $|w_{\min}| \leq |w_i|$ для всех $i = 1, \dots, L$. Коэффициенту w_{\min} поставим в соответствие резистор с проводимостью $\frac{1}{R}$, $R \gg m$.
2. Произвести нормировку весовых коэффициентов слоя: $w_i \leftarrow w_i / |w_{\min}|$.
3. Задать число разрядов $n = 1$.
4. Для нормированных весов $w_i, i = 1, 2, \dots, L$ подобрать набор коэффициентов $k_j^i \in \{0, 1\}$, обеспечивающих минимум суммы

$$S_n = \sum_{i=0}^L (|w_i| - \sum_{j=0}^{n-1} k_j^i \cdot 2^j)^2.$$

5. Если $S_n > \varepsilon$, где ε — допустимая величина погрешности, увеличить число разрядов ($n \leftarrow n + 1$) и идти на 4.
6. Конец

Пример нейрона на основе бинарных мемристоров

$\{ x^1 = (1,1,1), x^2 = (1,1,0), x^3 = (1,0,0) \}$ – класс 1

$\{ x^4 = (0,0,0), x^5 = (0,0,1), x^6 = (0,1,1) \}$ – класс 2

$$w = \sum_{i=1}^3 x^i - \sum_{i=4}^6 x^i = (3,1,-1);$$

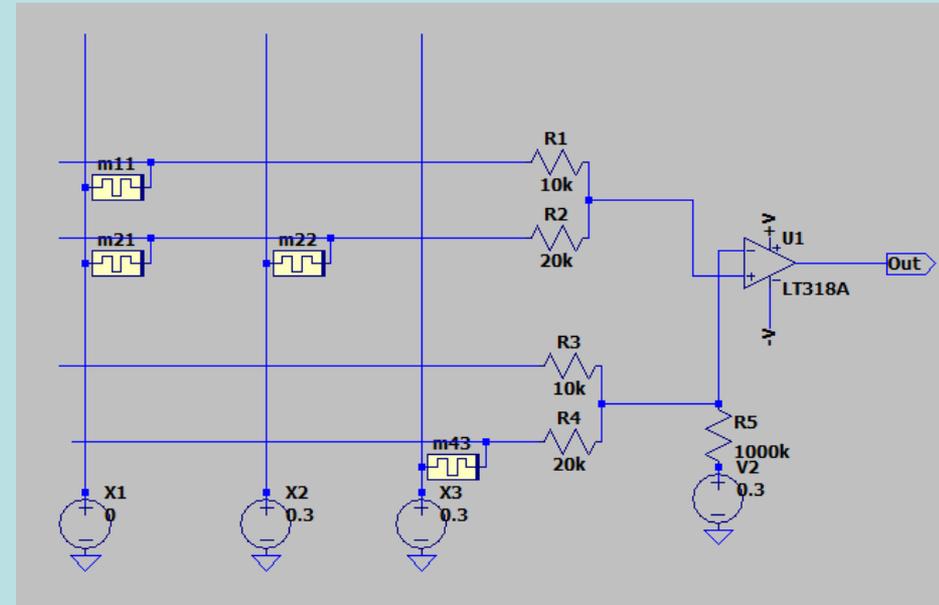
$$w_1 = 2 + 1 \rightarrow g_1 = \frac{2}{R} + \frac{1}{R};$$

$$w_2 = 1 \rightarrow g_2 = \frac{1}{R};$$

$$w_3 = -1 \rightarrow g_3 = \frac{1}{R} \text{ на отрицательном входе ОУ}$$

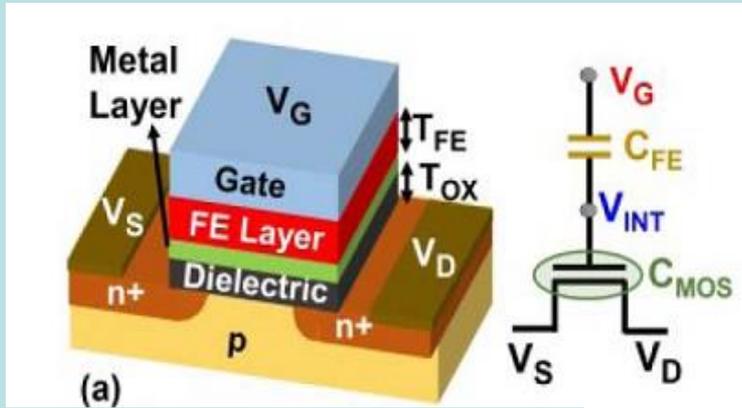
$$R = 2 \cdot 10^4 \gg m = 10^2 \text{ ом}$$

$$f(a) = \begin{cases} 1, & a > 0, \\ -1, & a \leq 0. \end{cases}$$

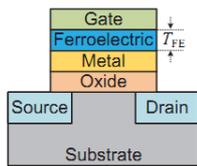


Вход	x^1	x^2	x^3	x^4	x^5	x^6
Выход, ВОЛЬТ	3,2	3,2	3,2	-3,2	-3,2	-3,2

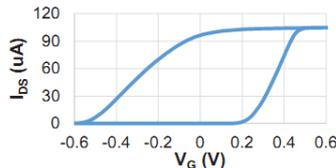
FeFET транзистор и кроссбар



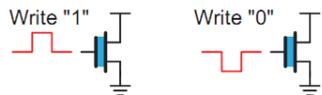
Ahmedullah Aziz, Swapnadip Ghosh, Suman Datta, Fellow, Sumeet Kumar Gupta. **Physics-Based Circuit-Compatible SPICE Model for Ferroelectric Transistors** // IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS, VOL. 37, NO. 6, JUNE 2016



(a) FeFET structure.

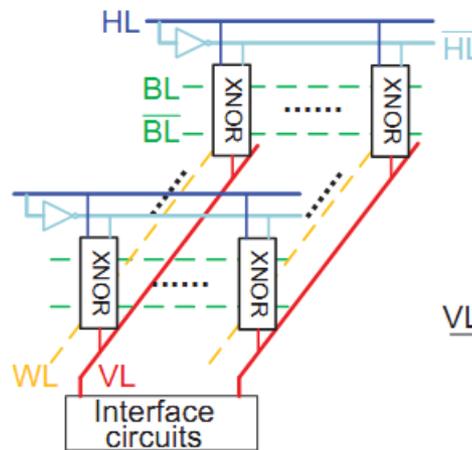


(b) Simulated $I_{DS}-V_G$ hysteresis curve.

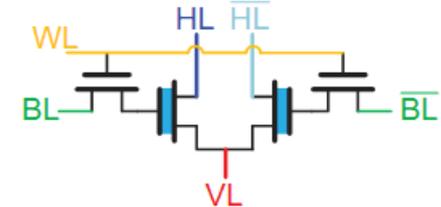


(c) Programming an FeFET.

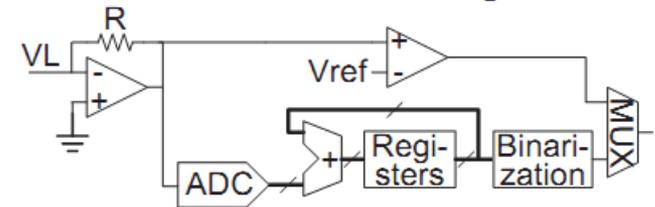
Fig. 1: Background of FeFETs.



(a) Crossbar design.



(b) XNOR cell design.



(c) Interface circuit for one column.

Xiaoming Chen, Xunzhao Yin, Michael Niemier, Xiaobo Sharon Hu. **Design and Optimization of FeFET-based Crossbars for Binary Convolution Neural Networks** // [2018 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition](#)

Преимущества FeFET кроссбара

- Малое потребление энергии и площади кристалла
- Возможность объединить кроссбары положительных и отрицательных весов в один FeFET кроссбар
- При программировании FeFET кроссбара не возникает проблемы ложных (шунтирующих) путей, что дополнительно снижает потребляемую энергию

Логические элементы и архитектура микросхем хранения и обработки информации с искусственным интеллектом на основе двухзатворных сегнетоэлектрических транзисторов (Проект РФФИ 19-29-03031, Рук. Тыщенко И. Е.)

- Коллектив в ИФП СО РАН обладает экспериментальной линейкой, размещенной в чистых комнатах класса ISO4, и запатентованными технологиями изготовления пластин кремния-на-изоляторе (КНИ) и кремния-на-сапфире (КНС), известной в России и за рубежом под названием DeleCut.
- Отличительная особенность технологии - получение и исследование транспортных и квантово-размерных эффектов в сверхтонких слоях кремния до единиц нанометров, что особенно важно при переходе к субдесятинанометровым проектным нормам и к частотам переключений до единиц терагерц.
- Авторами проекта рассчитаны и изготовлены матрицы базовых матричных кристаллов (БМК) размерностью до 100x100 ячеек с напряжением блокирования 20 В на КНИ транзисторах с частичным обеднением.



МА8 Mask Aligner с модулем активации
(Dielectric Barrier Discharge Plasma)

а)



SB8 бондер для КНИ, КНС и п/п гетеропар,
оптико- и биохимических чипов

б)

Рисунок. 1 – Процесс сращивания пластин кремния и сапфира: а) плазменная активация поверхности пластин в DBD-плазме (вставка); б) «горячее» соединение пластин и перенос 0.5 мкм слоя кремния на 100 мм сапфировую подложку(вставка) на установке бондинга с держателем пластин диаметром до 200 мм на участке сращивания гетеропар (ISO4) с полупромышленным оборудованием Suss Microtech

500nm Si: on 20 nm Al_2O_3 ; on 20 nm $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{HfO}_2$; on 20 nm $\text{HfO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{HfO}_2$



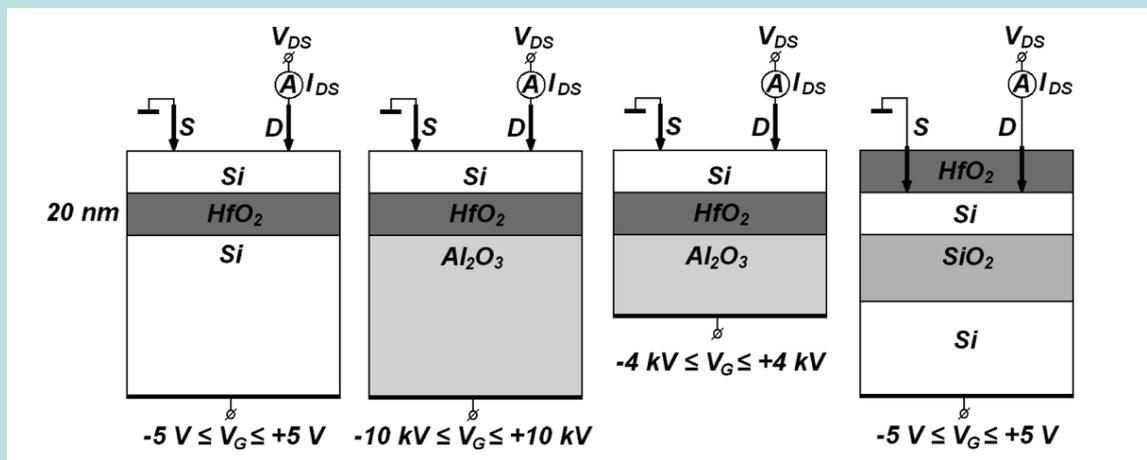
Рисунок 9. Фотографии 100 мм КНИ пластин, созданных методом водородного переноса 0.5 мкм слоев Si на кремний с PEALD HfO_2 и Al_2O_3 стеками одинаковой толщины, но с разным чередованием слоев: 20 нм Al_2O_3 под слоем (100) Si 500 нм (а); 20 нм $\text{HfO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ под слоем (100) Si 500 нм (б); 20 нм $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{HfO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ под слоем (100) Si 500 нм (в).

Диэлектрические слои на основе оксида гафния в КНИ и КНС пластинах открывают новые пути создания многофункциональных СБИС, включающих встроенную энергонезависимую память, возможность переключения между высокопроизводительным и энергосберегающим режимами, автоматической компенсации накопленного заряда и восстановления диэлектриков после их повреждения тяжелыми заряженными частицами благодаря сегнетоэлектрическим свойствам оксида гафния.

Наибольшее применение подобные структуры найдут при создании терабитных СБИС FRAM памяти на основе двухзатворных КНИ FeFET транзисторов, а также нейронных сетей для хранения и обработки больших массивов информации. Это направление считается сегодня наиболее продвинутым для создания встроенной энергонезависимой памяти и новой логической элементной базы, полностью совместимой с текущими технологическими нормами.

Сегнетоэлектрические свойства псевдо-MOSFET со слоями HfO₂

Сегнетоэлектрические свойства в случае SOS псевдо-MOSFETs с гафнием задают новое направление для построения гетероструктур и FeFET транзисторов, используемых в сегнетоэлектрической памяти. SOI- и SOS-структуры со слоями гафния являются перспективными материалами для следующего поколения многофункциональных FET и нового поколения интегральных схем с многофункциональными транзисторами как FeFET, NCFET, ISFET и подобными им, используемыми в приложениях искусственного интеллекта.



- Разработан маршрут проектирования на полностью обедняемых двухзатворных КНИ транзисторах с двумя разными толщинами high-k диэлектриков. Это обеспечит **четкое многоуровневое переключение** за счет разного электрического поля в диэлектриках под разными, но зарядово связанными затворами, а значит **несколько порогов переключений**.
- Цель проекта - не только разрабатывать модели и элементную базу, но и **изготовить демонстратор - матрицу 100x100 ячеек для проверки нейронных сетей в реальных задачах.**



План исследований по проекту РФФИ 19-29-03031 включает в себя три этапа:

1 Этап 2019 г.

- 1.1 Для разработки энергонезависимой FRAM памяти с ячейкой на одном двухзатворном транзисторе типа FeFET будут применены изготовленные нами структуры КНИ с ультратонкими слоями кремния и встроенного СЭ high-k диэлектрического стека на основе нанослоев оксидов гафния (И.Е. Тыщенко, Г.Ю Сидоров, Г.К. Кривякин).
- 1.2 Выбор оптимальных структур high-k стеков будет осуществляться с помощью C-V и I-V измерений на тестовых мезоструктурах металл-диэлектрик- металл (МДМ), металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) и полупроводник-диэлектрик-полупроводник (ПДП) по СЭ гистерезису поляризации (С.М. Тарков),
- 1.3 Измерения СЭ переключения туннельного электросопротивления (TER) [Choupruk et al. Microelectronic Engineering 178 (2017) 250] (А.А. Зарубанов), и по анализу методом Y-функций вольт-амперных характеристик (ВАХ) КНИ псевдо-МОП транзисторов [Cristoloveanu, et al. ECS Trans., 50 (2012) 249] (В.А. Антонов, Ф.В. Тихоненко).

1 Этап 2019 г.

1.4 На этих структурах будут созданы и исследованы характеристики резистивных элементов с токовым переключением для матриц типа ReRAM и сегнетоэлектрическим туннельным переключением типа TER на основе ячейки из МДМ структуры и КНИ МОП транзистора (М.С. Тарков), а также СЭ псевдо-МОП транзисторы с полевым переключением (В.П. Попов, Ф.В. Тихоненко).

Основным риском этого этапа работ являются:

слабо изученные высокотемпературные процессы кристаллизации стеков high-k нанослоев оксидов гафния, обеспечивающих СЭ поляризацию, как в низкотемпературном HZO слое, что необходимо для переноса технологии изготовления 2G FeFET транзисторов в стандартный КНИ КМОП процесс на следующих этапах (А.А. Зарубанов, Ф.В. Тихоненко).

2 Этап 2020 г.

2.1 Будут изготовлены и измерены характеристики двухзатворных КНИ транзисторов типа 2G FeFET и 23 ССТ. Будут определены термодинамические (барьеры) и кинетические (скорости) характеристики процессов зарождения и переключения СЭ доменов в high-k стеках методами атомно-силовой микроскопии (АСМ), в том числе в поляризационно-амплитудной моде (ПАМ), в высокоразрешающей электронной микроскопии (ВРЭМ), сканирующей микроскопии импульсной проводимости (positive-up-negative-down - PUND) [O. Kwon et al. Adv. Mater. 30 (2018) 1703675].

2.2 Будет определена величина спин-орбитальной связи (СОС) с помощью двухзатворного КНИ СЭ транзистора (2G FeFET), работающего в ассиметричной моде. На основе проведенных исследований мемристоров и FEFET транзисторов будут разработаны модели механизмов многоуровневых переключений и компактные модели синаптических двухзатворных сегнетоэлектрических транзисторов 23 ССТ, необходимые для эмуляции работы нейронных сетей.

Риски второго этапа связаны с совместимостью КМОП технологии на стандартных КНИ пластинах с нашими КНИ пластинами с ультратонкими слоями кремния и high-k встроенными диэлектриками.

3 Этап 2021 г.

3.1 Будут изготовлены и измерены характеристики матриц с размерностью ячеек до 100x100, состоящие из двухзатворных КНИ транзисторов типа FeFET для демонстрации многоуровневых переключений.

3.2 На основе полученных характеристик будут промоделированы свойства рекуррентных нейронных сетей и определены требования к параметрам двухзатворных синаптических транзисторов типа 23 ССТ для полномасштабных матриц, а также способности реальных матриц 23 ССТ транзисторов по распознаванию зашумленных изображений видеоряда искомых образов в реальном времени.

Основным риском третьего этапа будет выход годных БМК кристаллов с двухзатворными синаптическими сегнетоэлектрическими транзисторами .

- 1. Патент № 2538352 (РФ). Оpubл. в БИ № 1 10.01.2015. «Способ изготовления структур кремний-на-сапфире». Попов В.П., Жанаев Э.Д., Дудченко Н.В., Антонов В.А., Попов А.И. <http://www.freepatent.ru/patents/2538352>.
-
- 2. . I.E. Tyschenko, V.P. Popov. Silicon-on-insulator structures produced by ion-beam synthesis and hydrogen transfer. In: Advances in semiconductor nanostructures. Ed. by Alexander V. Latyshev, Anatoliy V. Dvurechenskii, Alexander L. Aseev. Elsevier, 552 p., 2017, 409-436. ISBN: 978-0-12-810512-2. <https://www.elsevier.com/books/advances-in-semiconductor-nanostructures/latyshev/978-0-12-810512-2>.
-
- 3. И.Е. Тыщенко, Э.Д. Жанаев, В.П. Попов. Энергия связи пластин кремния и сапфира при повышенных температурах соединения. Физика и техника полупроводников, 2019, том 53, вып. 1, с.65-69. <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/46989>.
-
- 4. И.Е. Тыщенко, И.В. Попов, Е.В. Спесивцев. Анодное окисление слоев кремний-на-изоляторе, созданных методом водородного переноса. Физика и техника полупроводников, 2019, том 53, вып. 2, с.253-257. <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/47109>.
-
- 5. K. A. Malsagova, T.O. Pleshakova, A.F. Kozlov, I, D. Shumov, M.A. Ilitskii, A,V. Miakonkikh, V,P. Popov, K.V. Rudenko, A.V. Glukhov, I.N. Kupriyanov, N.D. Ivanova, A.E. Rogozhin, A.I. Archakov, and Y.D. Ivanov. Micro-Raman Spectroscopy for Monitoring of Deposition Quality of High-k Stack Protective Layer onto Nanowire FET Chips for Highly Sensitive miRNA Detection. Biosensors V. 8, N. 3, P. 72(10), 2018. <https://doi.org/10.3390/bios8030072>

- 6. В.П. Попов Неизоструктурные гетеропары кремния и сапфира для высококачественной электроники. / В.П. Попов и др. // Тезисы докладов XIII Российской конференции «Физика полупроводников». - Екатеринбург, 2-6 октября 2017 г., с. 143.
- http://semicond2017.imp.uran.ru/sites/default/files/docs/Сборник_тезисов_РКФП-2017.pdf – устный.
- 7 В.П. Попов, В.А. Антонов, В.И. Вдовин. Положительный заряд в КНС-гетероструктурах с межслойным оксидом кремния. Физика и техника полупроводников, 2018, том 52, вып. 10, с.1220-1227. <http://journals.ioffe.ru/articles/46465>.
- 8. В.П. Попов, В.А. Антонов, И.Е. Тыщенко. Нитридизация сапфира ионно-плазменными обработками для снижения положительного заряда КНС структур после водородного переноса кремния. Тезисы докладов VII Всероссийской конференции «Физические и физико–химические основы ионной имплантации» (ФФХОИИ-2018), Нижний Новгород, 07-09 ноября 2018, с.70. – устный.
- 9.V.P. Popov, V.A. Antonov, M.A. Ilitskii, V.I. Vdovin, I.E. Tyschenko, A.V. Miakonkikh, K.V. Rudenko. Ferroelectric properties of HfO₂ interlayers in SOI and SOS pseudo-MOSFETs.// Proceedings of 2018 Joint International EUROSOSI Workshop and International Conference on Ultimate Integration on Silicon (EUROSOSI-ULIS). IEEE Xplore Digital Library. (устный).
- <https://ieeexplore.ieee.org/document/8354731> .
- 10. V.P.Popov. "Ferroelectric properties of SOS and SOI pseudo-MOSFETs with HfO₂ interlayers". International Conference on Micro- and Nanoelectronics, Zvenigorod, Moscow Region, Russia. October 1-5, 2018. <http://www.icmne.ftian.ru/scient.shtml>

- 11. В.П. Попов, В.А. Антонов, М.А. Ильницкий, А.А. Гисматулин. КНИ структуры с ультратонкими слоями диоксида гафния. Тезисы докладов XII Международной конференции «Кремний-2018», 22-26 октября 2018, Черноголовка, с. 27. - устный.
- 12. В.П. Попов, К.В. Руденко «КНИ-структуры с ультратонкими слоями оксидов гафния и алюминия». Научная сессия ОНИТ РАН «Новые материалы с заданными функциями и высокочистые наноматериалы для создания элементной базы информационно-вычислительных и управляющих систем», 26 ноября 2018 г., г. Москва. Труды научного совета том 2 (2) v2.pdf https://yadi.sk/d/q2uQkEp5u23u_Q - приглашенный.
- 13. М.А. Ильницкий, В.П. Попов, А.А. Егоркин, А.А. Зарубанов, А.В. Глухов. Постимплантационные дефекты в транзисторах на кремнии и КНИ: расчеты и эксперимент. Тезисы докладов VII Всероссийской конференции «Физические и физико-химические основы ионной имплантации» (ФФХОИИ-2018), Нижний Новгород, 07-09 ноября 2018, с.27. – устный.
- 14. M.S. Tarkov. Mapping weight matrix of a neural network's layer onto memristor crossbar. *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*, 2015, Vol. 24, No. 2, pp.109-115. RG Journal Impact: 0.79 <https://link.springer.com/article/10.3103/S1060992X15020125>.
- 15. M.S. Tarkov. Hopfield Network with Interneuronal Connections Based on Memristor Bridges // *Proc. of the 13th International Symposium on Neural Networks (Advances in Neural Networks – ISNN 2016)*, Saint Petersburg, Russia, July 6-8, 2016, LNCS 9719, pp. 196-203. (приглашенный доклад). https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-40663-3_23.
- 16. М.С. Тарков. Редукция связей автоассоциативной памяти Хопфилда. Прикладная дискретная математика, 2017, №37, с. 107-113. Импакт-фактор РИНЦ 2017: 0,417. http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=pdm&paperid=596&option_lang=rus.

- 17. В. П. Попов, М. А. Ильницкий, Е.Д. Жанаев, А.В. Мяконьких, К.В. Руденко, А.В. Глухов. Биосенсорные свойства КНИ нанопроволочных транзисторов с защитным слоем диэлектрика Al₂O₃, нанесенным методом плазменно-стимулированного атомно-слоевого осаждения. ФТП, 2016, том 50, №5, с. 643-649. <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/43104>.
- 18. Ivanov, Yu., Pleshakova, T., Malsagova, K., Kozlov, A., Kaysheva, A., Shumov, I., Galiullin, R., Kurbatov, L., Popov, V., Naumova, O., Fomin, B., Nasimov, D., Aseev, A., Alferov, A., Kushlinsky, N., Lisitsa, A., Archakov, A., Detection of marker miRNAs in plasma using SOI-NW biosensor. Sens. Actuat. B., 261, 566–571. DOI: 10.1016/j.snb.2018.01.153. 2018a. Q1 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400518301692>.
- 19. K. A. Malsagova, T.O. Pleshakova , R.A. Galiullin, I.D. Shumov, M.A. Ilitskii, A.V. Glukhov, V.P. Popov, A.I. Archakov, Yu.D. Ivanov. Ultrasensitive detection of HCVcoreAg by means of a nanowire aptasensor conjugated to a microwave generator. Anal. Methods, 2018, 10, 2740-2749, Q1 <http://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2018/ay/c8ay00495a#!divAbstract>.
- 20. V. Popov, M. Ilitsky, V. Antonov, V. Vdovin, I. Tyschenko, A. Miakonkikh, K. Rudenko. "Ferroelectric properties of SOS and SOI pseudo-MOSFETs with HfO₂ interlayers", Solid-State Electronics, vol. 159, pp. 63-70, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.sse.2019.03.036>

Спасибо за внимание!