

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-5-44-67>



УДК 53.06

К 100-летию открытия сегнетоэлектричества

Сегнетоэлектрическая память: современное производство и исследования

Д.А. Абдуллаев^{1,2},
Р.А. Милованов^{1,2},
Р.Л. Волков³,
Н.И. Боргардт³,
А.Н. Ланцев⁴,
К.А. Воротилов^{1,@},
А.С. Сигов¹

¹МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

²Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН, Москва 119991, Россия

³Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Москва, Зеленоград, 124498, Россия

⁴ЗАО Скан, Москва 119330, Россия

@Автор для переписки, e-mail: vorotilov@mirea.ru

Полупроводниковая индустрия остро нуждается в новых видах запоминающих устройств, сочетающих скоростные характеристики оперативной памяти с энергонезависимостью Flash памяти. Такая универсальная память должна обладать неограниченным числом циклов записи/чтения, низким энергопотреблением и стоимостью, обеспечивать высокую плотность записи информации и потенциал к дальнейшему масштабированию. Сегнетоэлектрическая память FRAM уже более 20 лет рассматривается в качестве одного из кандидатов на роль универсальной памяти. Зарядовый принцип записи, основанный на переключении вектора спонтанной поляризации, обеспечивает высокую энергоэффективность, наряду с энергонезависимостью, высокими скоростями, практически неограниченным числом циклов записи/чтения, длительным временем хранения, а также стойкостью к воздействию специальных факторов. Однако, обладая высоким потенциалом,

сегнетоэлектрическая память все еще не заняла значительной доли рынка энергонезависимых запоминающих устройств в связи с проблемами достижения высоких уровней интеграции. В работе представлен анализ современного состояния производства FRAM. Исследована структура сегнетоэлектрических конденсаторов и ячеек памяти основных производителей коммерчески доступных FRAM – компаний Texas Instruments, Cypress Semiconductor, Fujitsu и Lapis Semiconductor, проведено сравнение полученных результатов с данными производителей. Все ячейки памяти используют сегнетоэлектрический конденсатор на основе слоя цирконата-титаната свинца PZT толщиной около 70 нм и электродов из IrO_x/Ir или Pt. Передовым технологическим процессом производства FRAM устройств остается 130 нм КМОП процесс, используемый на фабах Texas Instruments. Обсуждаются возможные пути преодоления проблем скейлинга и дальнейшего развития технологии сегнетоэлектрических устройств, включая ALD-технологии создания бинарных сегнетоэлектриков, пьезоэлектронные транзисторы, структуры на основе двумерных полупроводников и пр. Удастся ли FRAM технологии расширить область применений и разрешить одно из основных противоречий современных вычислительных устройств между быстродействующим процессором и относительно медленной памятью, зависит от решения вопросов интеграции новых технологических решений.

Ключевые слова: энергонезависимая память, сегнетоэлектрические запоминающие устройства, интегральная схема, ячейка памяти, цирконат-титанат свинца, оксид гафния.

Для цитирования: Абдуллаев Д.А., Милованов Р.А., Волков Р.Л., Боргардт Н.И., Ланцев А.Н., Воротилов К.А., Сигов А.С. Сегнетоэлектрическая память: современное производство и исследования. *Российский технологический журнал*. 2020;8(5):44-67. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-5-44-67>

To the 100th anniversary of the discovery of ferroelectricity

Ferroelectric memory: state-of-the-art manufacturing and research

Daniil A. Abdullaev^{1,2},
Roman A. Milovanov^{1,2},
Roman L. Volkov³,
Nikolay I. Borgardt³,
Andrey N. Lantsev⁴,
Konstantin A. Vorotilov^{1,@},
Alexander S. Sigov¹

¹MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

²Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow 119991, Russia

³National Research University of Electronic Technology – MIET, Moscow 124498, Russia

⁴CJSC Scan, Moscow 119330, Russia

@Corresponding author, e-mail: vorotilov@mirea.ru

Semiconductor industry calls for emerging memory, demonstrating high speed (like SRAM or DRAM), nonvolatility (like Flash NAND), high endurance and density, good scalability, reduced energy consumption and reasonable cost. Ferroelectric memory FRAM has been considered as one of the emerging memory technologies for over 20 years. FRAM uses polarization switching that provides low power consumption, nonvolatility, high speed and endurance, robust data retention, and resistance to data corruption via electric, magnetic fields and radiation. Despite the advantages, market share held by FRAM manufacturers is insignificant due to scaling challenges. State-of-the-art FRAM manufacturing is studied in this paper. Ferroelectric capacitors and memory cells made by main commercial FRAM manufacturers (Texas Instruments, Cypress Semiconductor, Fujitsu и Lapis Semiconductor) are explored. All memory cells are based on the lead zirconate titanate PZT capacitor with the thickness of about 70 nm and IrO_x/Ir or Pt electrodes. The leading FRAM technology remains the 130 nm node CMOS process developed at Texas Instruments fabs. New approaches to further scaling and new devices based on ferroelectrics are reviewed, including binary ferroelectrics deposited by ALD techniques, piezoelectronic transistors, ferroelectric/2D-semiconductor transistor structures, and others. Whether FRAM technology will be able to resolve one of the main contradictions between a high-speed processor and a relatively slow nonvolatile memory depends on the success of the new technologies integration.

Keywords: non-volatile memory, ferroelectric memory, integrated circuit, memory cell, lead zirconate titanate, hafnium oxide.

For citation: Abdullaev D.A., Milovanov R.A., Volkov R.L., Borgardt N.I., Lantsev A.N., Vorotilov K.A., Sigov A.S. Ferroelectric memory: state-of-the-art manufacturing and research. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(5):44-67 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-5-44-67>

Введение

Сегнетоэлектрические запоминающие устройства (FRAM или FeRAM – Ferroelectric Random Access Memory, т.е. сегнетоэлектрическая память с произвольной выборкой) рассматриваются микроэлектронной индустрией в качестве одного из перспективных видов энергонезависимых запоминающих устройств (ЗУ), которые могут сменить Flash память, обладающую недостаточной скоростью и ресурсом. Такая универсальная память должна сочетать в себе быстроту динамической памяти DRAM (Dynamic RAM) и энергонезависимость Flash памяти, обладая при этом высокой информационной емкостью, низким энергопотреблением, должна быть дешевой и иметь хорошие предпосылки к скейлингу. Другими рассматриваемыми кандидатами являются резистивная память (RRAM или ReRAM – Resistive RAM), память на основе фазового перехода (PRAM – Phase-change RAM), магниторезистивная память (MRAM – Magnetoresistive RAM), в том числе на переносе спинового момента (STT-RAM – Spin-transfer torque RAM). Основные технические параметры, физические, технологические и конструктивные особенности перспективных энергонезависимых ЗУ, в сравнении с занимающими основную долю рынка DRAM и Flash NAND, представлены в таблице [1–12]. Все они (FRAM, MRAM, RRAM, PRAM) отличаются энергонезависимостью, высокими скоростями записи/считывания и длительным временем хранения информации, однако находятся на различных стадиях освоения промышленного производства.

Большинству требований, предъявляемых к универсальной памяти, соответствует технология FRAM. Отличительной особенностью FRAM является зарядовый принцип записи, основанный на переключении поляризации в сегнетоэлектрическом конденсаторе, что обеспечивает энергонезависимость наряду с высокой энергоэффективностью, скоростями чтения/записи, большим числом циклов перезаписи (10^{12} – 10^{15}) и длительным временем хранения (~ 10 лет) [3–5]. Сегнетоэлектрические материалы отличаются также высокой стойкостью к воздействию специальных факторов, что определяет перспективы их применения в особых условиях эксплуатации [13–15].

Материалы и конструкции

Сегнетоэлектриками называют класс кристаллических диэлектриков, в которых возникает спонтанная поляризация, существующая независимо от наличия внешнего электрического поля и меняющая свое направление при изменении направления внешнего поля [16]. Именно этот факт существования устойчивого состояния спонтанной поляризации и ее переключения внешним электрическим полем используется для записи и хранения информации.

Идея использования сегнетоэлектриков для записи информации появилась еще в 50-е годы прошлого столетия, когда делались попытки использования объёмных кристаллов [17], а в 70-е годы был предложен элемент памяти на основе сегнетоэлектрического транзистора [18]. Эти исследования не привели к созданию промышленных технологий сегнетоэлектрической памяти в силу недостаточной стабильности наблюдаемых эффектов.

Промышленный бум освоения данной технологии приходится на начало 2000-х гг. Интеграцией сегнетоэлектрических материалов занимались ведущие компании и исследовательские центры [2, 19]. Для интеграции использовались классические кислородно-октаэдрические сегнетоэлектрики, среди которых особую роль играют перовскиты [16, 20]. Классическими примерами таких материалов являются твердые растворы цирконата-титаната свинца (PZT – $\text{PbZr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$) и титаната бария-стронция (BST – $\text{BaSr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$). PZT оказался наиболее востребованным для FRAM применений в силу относительно низкой температуры кристаллизации перовскитной фазы (400 – 700 °C) и высокой величины остаточной поляризации (20 – 50 мкКл/см²), при этом наибольшее распространение получили твердые растворы вблизи морфотропной области с примерно равным соотношением циркония и титана [21]. PZT обладает также высоким значением пьезоэлектрического коэффициента, что обеспечивает его, а также релаксорного сегнетоэлектрика $(1-x)[\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3]$ - $x\text{PbTiO}_3$ (PMN-PT), доминирующее положение на рынке пьезоэлектрических микроэлектромеханических систем (MEMS) [22, 23]. Необходимо отметить, что последнее десятилетие в ряде стран ведется кампания по запрету свинецсодержащей керамики в связи с экологическими соображениями, однако, до сих пор не удалось найти приемлемую по параметрам замену [24, 25]. К тому же этот вопрос не стоит перед микроэлектронной индустрией, которая успешно решает вопросы утилизации куда более опасных соединений. Более важным представляется примесное загрязнение технологического оборудования, которое приводит к необходимости создания специализированных участков при изготовлении сегнетоэлектрического конденсатора (FRAM модуля), что увеличивает стоимость производства и сроки проведения ис-

Сравнение основных характеристик различных видов памяти [1–12]

Параметры	DRAM	Flash (NAND)	FRAM	MRAM/ STT-RAM	PRAM	RRAM
Энергозависимость	нет	да	да	да	да	да
Информация	заряд	заряд	заряд	сопротивление	сопротивление	сопротивление
Физический эффект	заряд конденсатора	заряд в плавающем затворе	поляризация конденсатора	туннельное магнитное сопротивление	изменение фазы материала	образование проводящих каналов
Ячейка памяти	1Т1С	1Т	1Т1С	1Т1Р	1Т1Р	1Т1Р
Состояние “1”	заряженный конденсатор	заряд в плавающем затворе	вектор спонтанной поляризации	сонаправленные векторы намагнитченности	кристаллическая фаза	наличие проводящих каналов
Состояние “0”	разряженный конденсатор	отсутствие заряда в плавающем затворе	изменение направления вектора поляризации	противонаправленные векторы намагнитченности	аморфная фаза	отсутствие проводящих каналов
Рабочее напряжение, В	1.5–2	16–20	1.8–3	1–3	1.5–1.8	3.3
Ток записи, мкА	~10 ³	~10 ³	~1	~10–10 ²	~100	~10 ² –10 ³
Время чтения, нс	30	50	20–50	3–20	20	–
Время записи/стирания, нс	50/50	10 ⁴ /10 ³	50/50	20/20	30/20	103/102
Число циклов перезаписи	неограниченно	10 ⁵	10 ¹² –10 ¹⁵	10 ¹⁵	10 ⁹ –10 ¹²	10 ⁶
Размер ячейки (F ²)/техпроцесс (нм)	6–10/18	5/14	20–40/130	16–40/65 (MRAM) 6–20/45 (STT-RAM)	4–19/45	6–10/40
Структура	TE/High-k D/BE	Si/D/FG/D/G	TE/PZT/BE	MTJ (RL/BL/PL)	TE/GST/Heater/BE	TE/Ox/BE
Функциональные материалы	Ta ₂ O ₅ , Al ₂ O ₃ , HfO ₂ , ZrO ₂ /Al ₂ O ₃ /ZrO ₂	λ-Si (FG)	Pb(Zr _{1-x} Ti _x)O ₃	FeNi/Ru/FeNi (RL) AlO или MgO (BL) CoFeB/Ru/CoFeB (PL) FeNi/Ru/FeNi/PtMn (FL)	GexSbyTez (GST) TiN/TiSiN (Heater)	TaO, HfO, TiNiO/TiO, ZrTe/AlO, Ir/TaO/TaN
Основные производители	Samsung, Intel, SK Hynix, Nanay, Elpida, Winbond	Micron, Samsung, Sandisk/Toshiba, SK Hynix, Intel	Texas Instruments, Cypress Semiconductor, Fujitsu, Lapis	Everspin, Sony, Samsung, Avalancheche Technology	Micron/Intel, Samsung	Panasonic, AdestoTechnologies, Fujitsu
Преимущества	низкая цена, высокая плотность, быстроедействие	низкая цена, высокая плотность	малое энергопотребление, быстроедействие	наибольший срок службы, быстроедействие	высокая плотность, быстроедействие	высокая плотность
Недостатки	энергозависима, малое время хранения бита	медленная запись, высокое рабочее напряжение	разрушающее чтение, проблема масштабирования	большой ток записи, низкая плотность	большой ток записи, малый срок службы	большой ток записи, низкая скорость записи

Примечание: F – фактор площади ячейки; 1Т1С – 1 транзистор, 1 конденсатор; 1Т1Р – 1 транзистор, 1 резистор; TE – верхний электрод; BE – нижний электрод; D – диэлектрик; Si – кремний; G – затвор; FG – плавающий затвор; Heater – нагреватель; Ox – оксид; MTJ – magnetic tunnel junction (магнитный туннельный переход); RL – reference layer (фиксированный слой); BL – barrier layer (барьерный слой); FR – free layer (свободный слой); PL – pinned layer (опорный слой).

следовательских работ по интеграции. FRAM устройства на основе PZT разрабатывали фирмы Ramtron, Samsung, Toshiba, Texas Instruments, Fujitsu, IBM, а также зеленоградский Микрон [2, 3, 9, 10, 14, 19, 21].

После открытия Б.М. Вулом в 1944 году сегнетоэлектрических свойств у титаната бария BaTiO_3 данный материал служил одним из базовых модельных материалов кислороднооктаэдрических сегнетоэлектриков и сыграл значительную роль в развитии физики сегнетоэлектриков [16]. Несмотря на хорошо изученные свойства, материалы на основе титаната бария не нашли применения при создании FRAM, что связано с рядом физических и технологических ограничений (наличие в рабочем диапазоне фазовых переходов, высокие температуры кристаллизации и ее особенности и пр.). В то же время пленки твердых растворов титаната бария-стронция BST, находящиеся в парафазе, активно исследуются для использования в качестве материалов с высокой диэлектрической проницаемостью, прежде всего для применений в ячейках оперативной памяти (DRAM) в качестве high- k диэлектрика [26, 27], а также в СВЧ-устройствах с электрически управляемой емкостью [28, 29].

Большой интерес для FRAM применений вызывают так называемые слоистые перовскиты, прежде всего танталаты и ниобаты висмута-стронция $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$ (SBT) и его твердых растворов $\text{SrBi}_2(\text{Ta}_x\text{Nb}_{1-x})_2\text{O}_9$ (SBTN), в которых два перовскитоподобных слоя танталата (ниобата) стронция разделены слоем оксида висмута [20]. В данных материалах сегнетоэлектричество было открыто в 1961 г. Г.А. Смоленским [30], а в середине 90-х гг. фирма Symetrix анонсировала открытие нового материала (название которого было зашифровано аббревиатурой Y1), не обладающего эффектом усталости, состав которого впервые был опубликован в результате независимого исследования М. Клее [31]. Разработкой FRAM с использованием слоистых перовскитов SBT и SBTN занимались фирмы Symetrix, Matsushita, ROHM Semiconductor, а также консорциум IMEC, STMicroelectronics, Applied Materials. Несмотря на демонстрации успешной интеграции (например, [32, 33]), одной из основных проблем использования слоистых перовскитов явилась более высокая, чем у PZT, температура кристаллизации. Другие слоистые перовскиты на основе титаната висмута-лантана $(\text{Bi}_{1-x}\text{La}_x)_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ (BLT) разрабатывала компания Hynix, которая является держателем патентов в данном направлении и производила FRAM объемом до 16 Мб [34].

Наконец в 2011 г. были обнаружены сегнетоэлектрические свойства в ультратонких пленках HfO_2 , легированных Si, сформированных методом ALD (Atomic Layer Deposition) [35], что привело к появлению большого числа исследовательских работ в данном направлении. После этого сегнетоэлектрические свойства были обнаружены в пленках чистого и легированного HfO_2 [36], $\text{Hf}_{1-x}\text{Zr}_x\text{O}_2$ [37, 38] и ZrO_2 [39, 40]. Обычно в данных составах реализуются неполярные фазовые состояния, а возникновение сегнетоэлектрического состояния связывают с существованием при определенных условиях полярной орторомбической фазы Pca_2 [28, 41]. Среди причин, вызывающих анизотропные напряжения, приводящие к стабилизации орторомбической фазы, называют легирование, влияние поверхности, островковую коалесценцию, рассогласование решеток при термическом расширении, влияние кислородных вакансий [42]. Пока материалы на основе бинарных сегнетоэлектриков не внедрены в промышленное производство, но ведутся активные исследования по их интеграции [43].

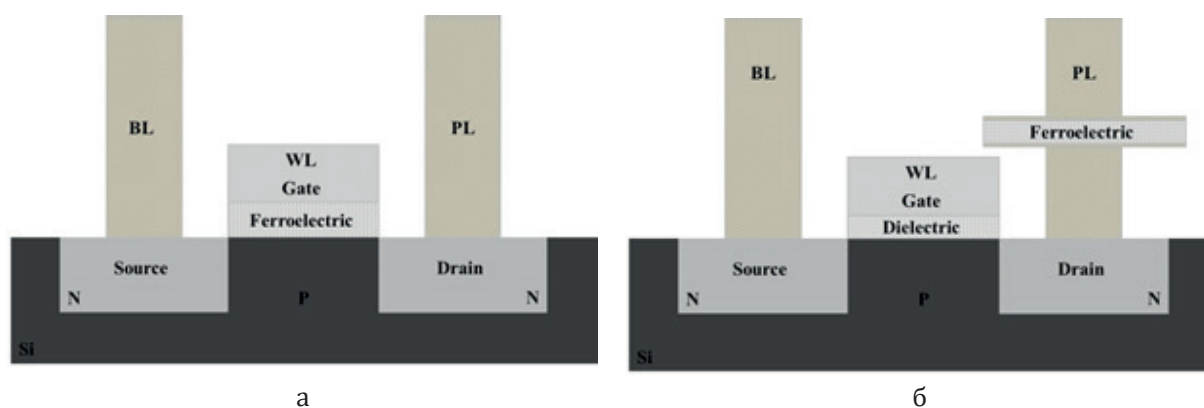


Рис. 1. Структура ячеек памяти FRAM 1Т (а) и 1Т1С (б).
 BL – битовая линия; WL – словарная линия; PL – линия подложки.

В процессе развития технологии FRAM было предложено множество конструкций ячеек памяти (ЯП) [3]. Наибольший интерес с точки зрения возможности масштабирования представляет ячейка 1Т, т.е. транзистор, в котором в качестве подзатворного диэлектрика используется слой сегнетоэлектрика (рис. 1а). Переключение вектора спонтанной поляризации приводит к изменению зарядового состояния на границе раздела сегнетоэлектрик-полупроводник и соответствующей модуляции поверхностного потенциала полупроводника [18]. Таким образом, в данном случае операция считывания не требует переключения поляризации. Сложностью реализации такой ЯП является необходимость максимально близкого расположения сегнетоэлектрика и полупроводника с минимально возможной толщиной подслоя между ними и обеспечение высокого качества границы раздела диэлектрик (сегнетоэлектрик) – полупроводник, включая низкую плотность поверхностных состояний [44]. Данный тип ЯП пока не был реализован в промышленном производстве. Поэтому наибольшее распространение получили ЯП, использующие для считывания информации регистрацию токового отклика при переключении вектора поляризации в сегнетоэлектрическом конденсаторе. Такие ячейки используют аналогичную DRAM и SRAM (Static RAM) архитектуру и состоят из одного или нескольких транзисторов и конденсаторов: 1Т1С, 2Т2С и 6Т4С. На рис. 1б показана типичная ЯП 1Т1С с вертикальным расположением сегнетоэлектрического конденсатора. ЯП 2Т2С и 6Т4С являются вариантом коммутации структур 1Т1С. При создании FRAM емкостью 128 Мб Toshiba использовала так называемую chain архитектуру, аналогичную NAND [45].

Интеграция в полупроводниковые технологии

На рис. 2 показаны прогнозы развития технологии FRAM согласно International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS) [46] и уровень реального производства коммерческих FRAM. Первоначально отрасль чрезвычайно оптимистично смотрела на скейлинг параметров FRAM, как это видно из ITRS редакции 2001–2005 гг. Осознание сложностей интеграции произошло в ITRS редакции 2007 г., согласно которой предполагалось уменьшение топологических норм с 180 нм в 2007 г. до 65 нм к 2019 г. В более поздних редакциях доклада ITRS (2009–2013 гг.) прогноз внедрения меньших технологических норм производства сдвигался на более поздние сроки. Между тем, первые серийные образцы FRAM, выполненные по технологическим нормам 130 нм, появились на

рынке в 2007 году, опередив прогноз на 6 лет. На сегодняшний день коммерчески доступные ИС с FRAM предлагают 4 компании – Texas Instruments (TI), Cypress Semiconductor, Fujitsu Limited и Lapis Semiconductor, при этом наименьшие топологические нормы производства по-прежнему составляют 130 нм, что связано со сложностью освоения 3D технологии сегнетоэлектрического конденсатора.

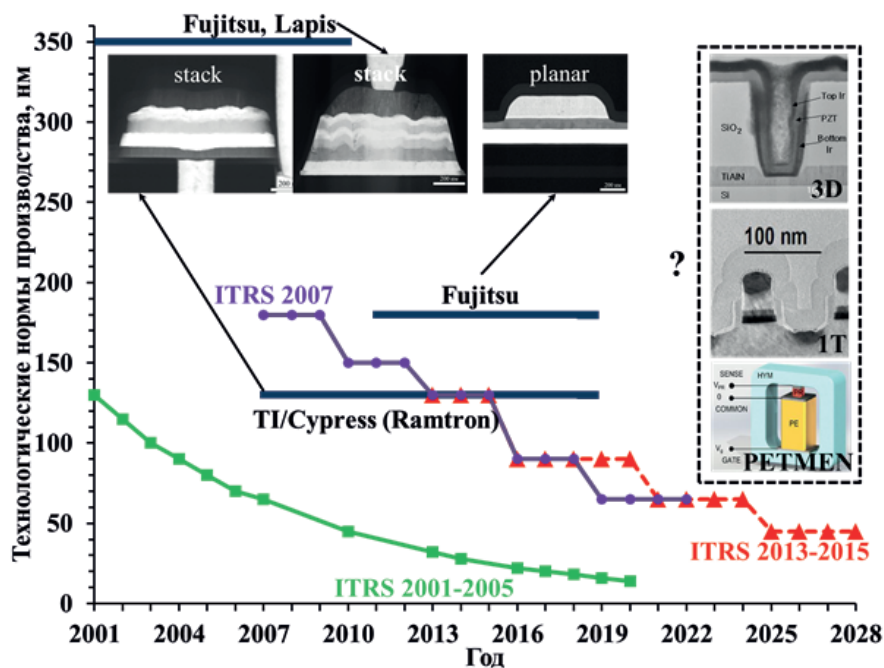


Рис. 2. Перспективные планы ITRS развития технологии FRAM и реальный уровень освоения проектных норм основными игроками на рынке FRAM (Fujitsu, Lapis, TI, Cypress) [3, 6–10, 46–52].

Основным идеологом развития FRAM технологий и держателем патентов являлась фирма Ramtron, которая лицензировала технологию FRAM таким крупным компаниям как Texas Instruments, Infineon, Fujitsu, Hitachi, Toshiba, Rohm, Samsung, Asahi Chemical, NEC.

Компания Fujitsu тесно сотрудничала с Ramtron, и в 1999 году на заводе в г. Ивата (Япония) выпустила серийные образцы 8-битных FRAM микрочипов по технологии 500 нм с объемом памяти 64 и 256 кб. В 2001 году компании Fujitsu и Ramtron разработали 350 нм FRAM техпроцесс, что обеспечило Fujitsu на тот момент лидирующие позиции в данной области. Дальнейшее сотрудничество с Ramtron прекратилось и 180 нм FRAM-техпроцесс фирма разрабатывала совместно с Seiko Epson, запуск производства предполагался в 2006–2007 гг., однако первые упоминания о старте продаж приходятся на 2011 год. В настоящее время Fujitsu предлагает 50 8-битных микрочипов входящих в 6 семейств ИС с FRAM памятью объемом от 4 кб до 8 Мб.

Компания TI начала активную работу в области FRAM в 2001 году после заключения соглашения с Ramtron. В 2004 году Ramtron и TI представили прототип 4 Мб FRAM, выполненную по технологии 130 нм, серийное производство кристаллов началось в 2007 году, значительно опередив, как уже отмечалось выше, планы отрасли. В настоящее время фирма TI обладает двумя специализированными фабрами DMOS5 и DMOS6 в Далласе (США), реализующими 130 нм КМОП процесс с 5-ти уровневой медной металлизацией

и изолирующим диэлектриком из фторсиликатного стекла. Компания предлагает 4 семейства из 138 наименований FRAM объемом от 0.5 кб до 256 кб с архитектурой 1Т1С.

В 2012 году компания Cypress Semiconductor поглотила фирму Ramtron с переходом прав производства на мощностях TI. На сегодняшний день компания Cypress Semiconductor занимает лидирующие позиции среди производителей FRAM и предлагает 244 наименования ИС объемом от 4 кб до 4 Мб с различной организацией памяти и интерфейсами, в том числе с 2017 г. – с архитектурой ЯП 2Т2С.

Lapis Semiconductor, являющаяся дочерней компанией ROHM Semiconductor, занимает особую нишу на рынке микрочипов для смарт-карт, RFID (Radio Frequency Identification) и UHF (ultra high frequency) меток благодаря малому энергопотреблению FRAM. Компания производит 10 ИС объемом от 32 кб до 1 Мб с рабочими частотами от 3.4 до 40 МГц. Отметим, что в группе компаний ROHM разработкой FRAM технологий занималась компания Oki Electric Industry, которая совместно с Symetrix разрабатывала FRAM память на SBT и анонсировала производство в 2011 году [2].

Анализ современного производства FRAM

Анализ современного производственного уровня проводился на примере коммерчески доступных схем различных производителей. Исследование вертикальных сечений выполняли методами растровой ионной (РИМ, Quanta 200 3D фирмы FEI) и электронной (РЭМ) микроскопии (Nova NanoSEM 230 фирмы FEI), просвечивающей растровой электронной микроскопии (ПРЭМ) с использованием локального рентгеноспектрального анализа (ЛРСА) – Titan Themis 200 фирмы FEI.

Для исследования конструктивно-технологического строения FRAM памяти компании Fujitsu был выбран программируемый микроконтроллер (МК) MB85R4M2T. На рис. 3а приведено РЭМ изображение вертикального сечения кристалла в области расположения ЯП FRAM, а на рис. 3б – изображение сегнетоэлектрических конденсаторов после удаления вышележащих слоёв проводников и диэлектрика. На них хорошо различимы сегнетоэлектрические конденсаторы (FCap), контактные столбики (plug) от транзисторов и верхних обкладок конденсаторов (top electrode) к вышележащим слоям проводников (M1).

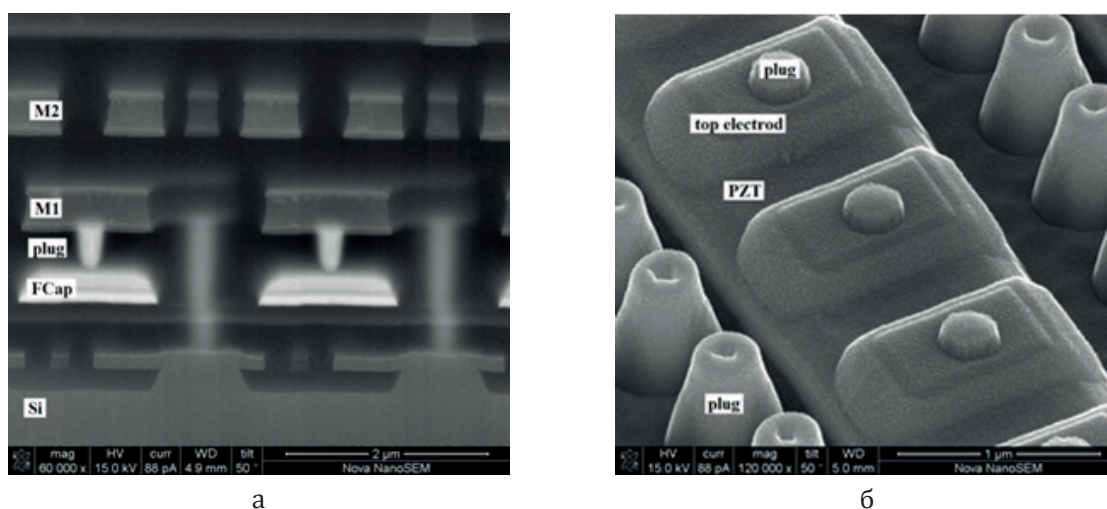


Рис. 3. РЭМ изображения вертикального сечения (а) и слоя сегнетоэлектрических конденсаторов (б) кристалла МК MB85R4M2T компании Fujitsu в области ЯП FRAM.

ЯП FRAM выполнены по архитектуре 1Т1С и имеют планарную структуру, в которой конденсатор смещен в сторону относительно транзистора и коммутирует с ним через первый уровень проводников (М1) (рис. 3а). Подобное расположение элементов соответствует технологическим процессам с топологическими нормами 500 и 350 нм [7]. Но учитывая результаты проведенных исследований (рис. 3), можно утверждать, что данная конструкция была распространена на нормы 180 нм, используемые в производстве ИС MB85R4M2T.

На рис. 4 приведены ПРЭМ изображение и результаты ЛРСА с распределением элементов в области расположения сегнетоэлектрического конденсатора. Нижний электрод выполнен в виде сплошной платиновой (Pt) балки с нанесенным на неё слоем PZT. В качестве верхней обкладки конденсатора используется слой IrO_x , а для диффузионно-барьерного слоя – оксид алюминия, покрывающий весь конденсатор и препятствующий диффузии свинца и водорода.

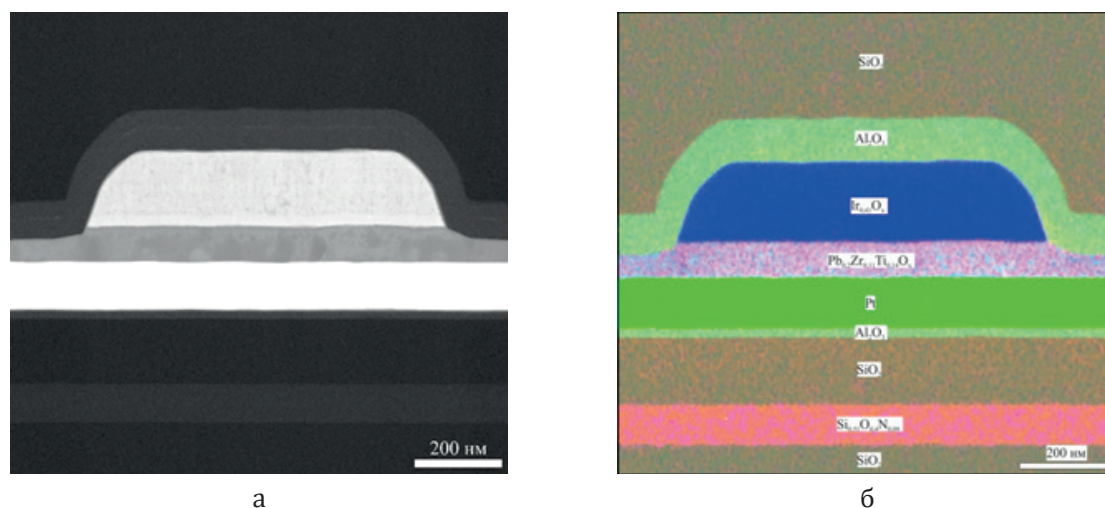


Рис. 4. ПРЭМ изображение структуры (а) и результаты ЛРСА (б) области сегнетоэлектрического конденсатора ИС MB85R4M2T компании Fujitsu.

На рис. 5 приведены РИМ и РЭМ изображения ортогональных вертикальных сечений кристалла ИС MSP430FR5988 фирмы TI в области расположения ЯП FRAM, созданных по архитектуре 1Т1С с вертикальной конструкцией ячейки. На рис. 6 показаны ПРЭМ изображение и результаты ЛРСА, демонстрирующие структуру и размеры сегнетоэлектрического конденсатора. Конденсатор имеет многослойную структуру и выполнен в форме усеченной пирамиды. Результаты ЛРСА (рис. 6б) соответствуют приведенным в литературе данным о его строении [3, 6, 49].

Производство кристаллов ИС с FRAM компании TI основано на стандартной 130 нм медной КМОП-технологии, а создание слоя сегнетоэлектрических конденсаторов требует дополнительного использования двух масок – для создания конденсатора и межуровневых контактов. После создания переходных вольфрамовых (W) контактов от транзисторов на поверхности кристалла создается диффузионно-барьерный слой из TiAlN и осаждаются Ir электроды. Далее методом металлоорганического химического осаждения из газовой фазы создается сегнетоэлектрический слой PZT толщиной 70 нм, позволяющий работать при низких напряжениях и токах переключения [6]. Пленка формируется

в поликристаллическом состоянии со столбчатой структурой зерен перовскита размером ~80 нм. Затем на сегнетоэлектрик осаждаются слои верхнего электрода IrO_x/Ir и слой TiAlN в качестве барьера и жесткой маски. Для создания нижнего барьера TiAlN , нижнего Ir электрода, PZT, верхнего IrO_x/Ir электрода и жесткой маски TiAlN используется одна литографическая маска. Конечная толщина всей структуры сегнетоэлектрического конденсатора составляет 250 нм. Боковые стенки конденсатора покрываются барьерным слоем AlO_x , препятствующим диффузии водорода в ходе последующих технологических операций. Завершающими операциями являются нанесение стоп-слоя Si_xN_y и межслойного SiO_2 . Дальнейшие операции проводят по стандартной технологии медной (Cu) металлизации [6, 49, 53]. Технология производства FRAM микрочипов под маркой компании Cypress не отличается от рассмотренной выше.

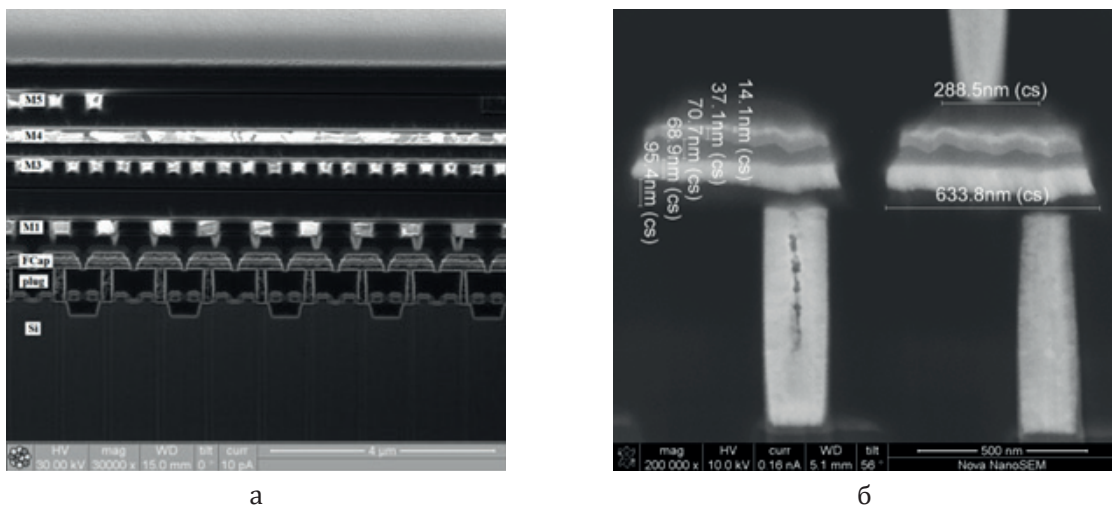


Рис. 5. РИМ (а) и РЭМ (б) изображения ортогональных вертикальных сечений кристалла ИС MSP430FR5988 фирмы TI в области ЯП FRAM (cs – поправка измерений на угол наклона образца).
Si – кремниевая подложка; plug – контактные столбики;
FCap – сегнетоэлектрические конденсаторы; M1 – M5 – слои проводников.

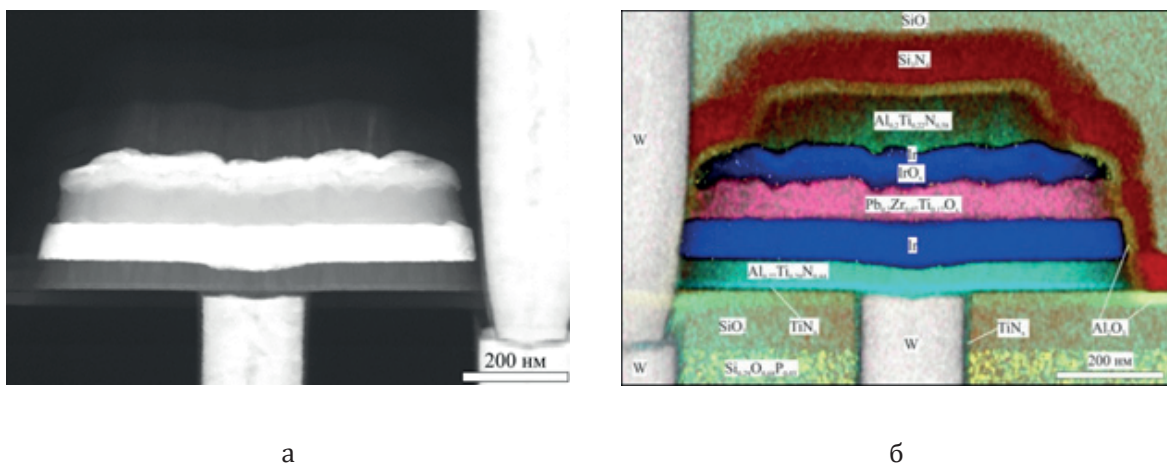


Рис. 6. ПРЭМ изображение структуры (а) и результаты ЛРСА (б) области сегнетоэлектрического конденсатора ИС MSP430FR5988 фирмы TI.

Для исследования конструктивно-технологического строения FRAM кристаллов компании Laris был выбран программируемый МК MR45V256A. На рис. 7 приведены РЭМ и ПРЭМ изображения с результатами ЛРСА, показывающие структуру сегнетоэлектрического конденсатора и применяемые материалы.

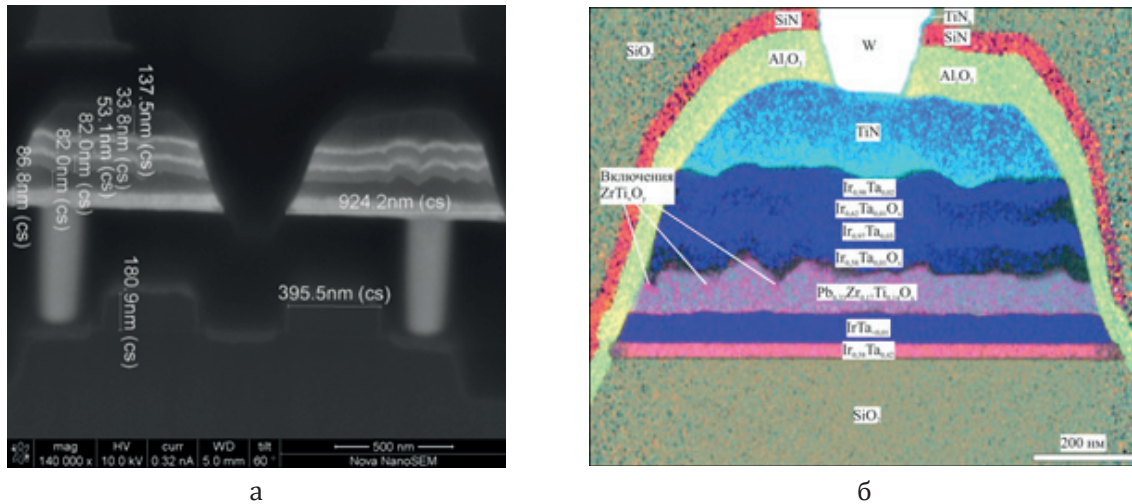


Рис. 7. РЭМ изображение структуры сегнетоэлектрического конденсатора (а) ИС MR45V256A компании Laris (cs – поправка измерений на угол наклона образца), результаты ЛРСА сегнетоэлектрического конденсатора (б).

ИС MR45V256A с FRAM произведена с технологическими нормами 180 нм, ЯП выполнена по архитектуре 1Т1С с вертикальной конструкцией. Сегнетоэлектрические конденсаторы имеют многослойную структуру, схожую со строением конденсаторов производства TI с характерной формой усеченной пирамиды, свидетельствующей о процессе травления с использованием одной маски [54]. В качестве сегнетоэлектрика, как и у большинства остальных производителей, используется PZT, что опровергает имеющуюся в литературе информацию о возможном использовании SBT. В отличие от TI, многослойная структура конденсаторов Laris включает слои Ir_xTa_y и $\text{Ir}_x\text{Ta}_y\text{O}_z$.

Исследования

С точки зрения современного уровня производства устройств памяти (NAND и DRAM) основной проблемой технологии FRAM является большой размер ЯП ($>20 F^2$) [10, 12, 52]. Проблема масштабируемости связана с уменьшением токового сигнала (переключаемого заряда) при уменьшении площади сегнетоэлектрического конденсатора. Переход на технологические нормы 90 нм и ниже связан с необходимостью использования 3D конструкций ЯП [3, 4, 46, 52, 54–56]. Одним из вариантов может стать технология создания щелевых конденсаторов по типу DRAM: в этом случае в слое диэлектрика, расположенного над транзисторными структурами, создаются отверстия (щели), на стенках которого послойным нанесением создаётся структура конденсатора с электродами и сегнетоэлектриком между ними, как это показано на рис. 8а [52]. На рис. 8б приведено ПРЭМ изображение щелевого конденсатора диаметром 180 нм с сегнетоэлектрическим слоем PZT (60 нм) и обкладками из иридия (20 нм). При данных параметрах конденсатора размер FRAM ЯП составит $8 F_2$ и позволит использовать технологические нормы производства 90 нм, а при увеличении глубины щели можно добиться минимального значения диа-

метра конденсатора (~100 нм) и достичь размера ЯП $6 F^2$ при технологических нормах производства 65 нм [52, 55, 56].

Сложностью осаждения тонкого сегнетоэлектрического слоя является не только конформность осаждения, но и обеспечение однородной кристаллической структуры. Так MOCVD слоев PZT зачастую приводит к потере столбчатой структуры перовскитных зерен на боковых стенках и проблемам роста слоя верхнего Ig электрода на поверхности поликристаллической пленки [54]. Интересным вариантом получения высокотекстурированных пленок на 3D рельефе может стать технология гидротермального синтеза, продемонстрированная недавно для титаната бария [57].

Однако наибольшим потенциалом скейлинга могут обладать упомянутые выше бинарные сегнетоэлектрики на основе оксида гафния. Технология ALD обеспечивает рост тонких нанометровых пленок с возможностью осаждения на рельефы с высоким аспектным соотношением, при этом технологии формирования оксидов гафния и циркония уже много лет используются в FEOL процессе.

Müller и др. продемонстрировали возможность формирования 3D конденсаторных структур в 1T1C FRAM ячейках путем осаждения 10 нм пленок HfO_2 , легированных Al, в щели с аспектным соотношением 13:1 [58–60] (рис. 8в). Важным обстоятельством является также то, что в качестве материала электродов используется хорошо отработанный в массовом производстве TiN [60, 61]. Компания IMEC продемонстрировала первые результаты по созданию вертикально интегрированных структур с пленками $HfO_2:Al$ для создания энергонезависимых массивов с аналогичной NAND архитектурой [62, 63] (рис. 8г).

Совместимость ALD процесса осаждения оксида гафния с FEOL транзисторным циклом открыла возможность создания 1T ЯП. GlobalFoundries, FMC, NaMLab и Fraunhofer продемонстрировали интеграцию сегнетоэлектрического транзистора по технологии 28 нм [60, 64, 65].

Несмотря на отличный потенциал к скейлингу и 3D-интеграции, технология создания FRAM памяти на основе бинарных сегнетоэлектриков пока находится на стадии исследований и перспективы ее внедрения зависят от решения вопросов надежного долговременного хранения информации в таких ЯП. Если FRAM на PZT обеспечивает практически неограниченное число циклов переключений 10^{16} , то переключение поляризации в HfO_2 -сегнетоэлектриках ограничено $\sim 10^9$ циклами [66]. При этом процесс переключения имеет ряд особенностей, в частности он сопровождается эффектами «пробуждения» (wake-up) – увеличения переключаемой поляризации на начальных циклах переключений, усталости (fatigue) – деградации поляризации при увеличении числа циклов переключений, «запечатления» (imprint) – наличия «встроенного» поля, не переключаемого внешним полем [66–68]. В отличие от PZT, HfO_2 -сегнетоэлектрики обладают на порядок более высоким коэрцитивным полем (~ 1 МВ/см), поэтому переключение поляризации происходит при напряжениях близких к пробивному, что может приводить к его деградации и пробую [66, 69]. В работе Черниковой и др. [70] продемонстрирована возможность увеличения числа циклов до 10^{11} при легировании $HfZrO_2$ лантаном, однако проблема флуктуации переключаемого заряда остается.

Среди возможных причин нестабильности называют существование на границах раздела повышенной концентрации несегнетоэлектрической тетрагональной фазы (пассивный deadlayer, вызывающий перераспределение поля внутри конденсаторной структуры),

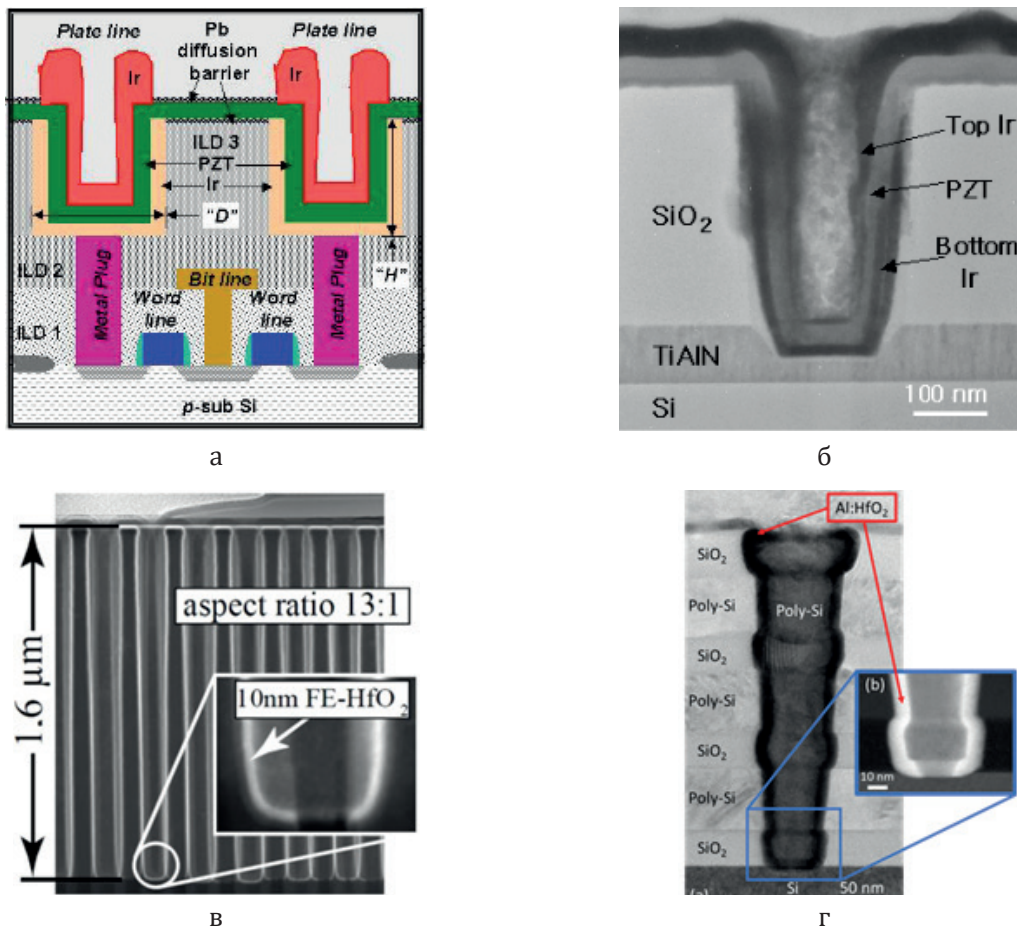


Рис. 8. 3D конструкции сегнетоэлектрического конденсатора в 1Т1С ЯП FRAM: на основе MOCVD PZT-слоя – конструкция ЯП (а) и ПРЭМ изображение щелевого конденсатора (б) [52]; щелевой конденсатор на основе ALD $\text{HfO}_2:\text{Al}$ (в) [58], вертикально интегрированная структура IMEC (г) [62].

неравномерное распределение дефектов и кислородных вакансий, проводимость по границам зерен кристаллитов и пр. (см. напр. [68]).

Вместе с этим продолжаются работы по поиску новых путей интеграции классических сегнетоэлектриков. Так, в работе [71] продемонстрирован новый способ кристаллизации PZT с использованием подслоя с дефицитом свинца, формирование перовскитных зерен с практически единственной текстурой в направлении (111), оптимальном для ЯП FRAM. Большой интерес представляют работы по созданию ячеек с 1Т архитектурой. Так, в работах [72, 73] была продемонстрирована мультибитовая ЯП на основе полевого транзистора с квазиэпитаксиальным слоем PZT в качестве подзатворного диэлектрика. Авторами был предложен метод обратной кристаллизации: на поверхности кремния формировали барьерный слой ZrTiO_4 толщиной 2 нм, на который наносили аморфный слой PZT и верхний Pt электрод, который служил затравкой в процессе кристаллизации сегнетоэлектрика. Изменения локальной поляризации обеспечивают различные пороговые напряжения, что позволяет хранить до 5 бит информации в одной ЯП. В связи с этим интерес представляют работы группы В.М. Мухортова по возможности осаждения сегнетоэлектрических пленок непосредственно на кремниевые подложки при особых режимах плазменного разряда в рабочей камере [74, 75].

Другим активно развивающимся направлением является использование пьезоэлектрических свойств сегнетоэлектрика для индуцирования изменения свойств прилежащих слоёв, например, намагниченности или проводимости (см. напр. [76, 77]). Особый интерес вызывает проект создания пьезоэлектронного транзистора PET (PiezoElectronic Transistor), продвигаемого фирмой IBM и проект создания соответствующих устройств пьезоэлектронной памяти PETMEM (Piezoelectronic Transduction Memory Device), выполняемый консорциумом европейских университетов и компаний при участии исследовательских отделов IBM в рамках европейской программы Horizon 2020 [77–82]. Принцип действия устройств основан на использовании фазового перехода диэлектрик-металл в пьезорезисторе в результате давления, создаваемого пьезоэлектриком. В качестве пьезоэлектрика используются сегнетоэлектрические материалы, обладающие наибольшим пьезокоэффициентом: PZT или релаксор PMN-PT, в качестве пьезорезистора могут быть использованы редкоземельные халькогениды типа моносulfида самария SmS [83], сплавы Гейслера типа LiMnAs [84], испытывающие фазовый переход при малых величинах внешнего давления. Расширение пьезоэлектрического слоя приводит к немедленной модуляции проводимости канала транзистора (рис. 9а). По оценкам при технологических нормах 5 нм PET обеспечит в 20 раз меньшее энергопотребление при напряжении $V_{DD} = 0.14$ В и в 50 раз меньшее – при $V_{DD} = 0.1$ В по сравнению с FinFET, работающим при напряжении 0.8 В [85]. Интеграция PET была продемонстрирована IBM с использованием PZT в качестве сегнетоэлектрика и SmSe в качестве пьезорезистора, при этом конструкция прибора подразумевает формирование воздушного зазора между ними (рис. 9б) [78]. Устройства памяти PETMEM и схемы обработки на PET являются, по мнению IBM, перспективным потенциальным решением в области создания нового поколения элементной базы с низким энергопотреблением и высоким быстродействием [82].

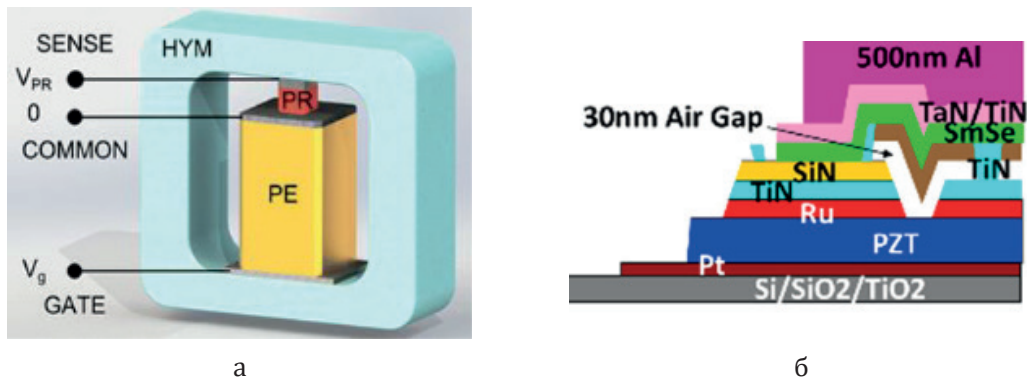


Рис. 9. Пьезоэлектронный транзистор IBM(а) [81] и пример технологической реализации (б) [78]. PE – пьезоэлектрик, PR – пьезорезистор

В последние годы получили развитие решения на основе интеграции сегнетоэлектрического слоя и двумерных полупроводников. Первые работы были выполнены с использованием органического сегнетоэлектрика и графена [86, 87]. Ясно, что использование органических сегнетоэлектриков и методов эксфолиации для осаждения 2D-полупроводника способно продемонстрировать лишь основные физические принципы работы модельного устройства и достаточно далеки от реальной интеграции. Однако впоследствии для создания гетероструктур сегнетоэлектрик/2D-полупроводник были исследованы различные комбинации неорганических сегнетоэлектриков на основе перовскитов и окси-

да гафния с использованием графена, черного фосфора (BP), дихалькогенидов металлов (см. напр. [88–91]). Примером такого решения является фотоэлектрическая память (с активацией считывания облучением), которую рассматривают в качестве элементов оптических систем, основанная на многослойной конструкции с использованием оксидного проводника LaNiO_3 , выращенного на нем слоя PZT и нескольких монослоев черного фосфора (BP, метод эксфолиации) [88]. В работе [89] при создании гетероструктуры $\text{HfZrO}_x/\text{MoS}_2$ для формирования наноразмерного слоя дихалькогенида применен CVD метод.

Интересно отметить, что подобная гетероструктура была использована для успешной демонстрации эффекта отрицательной емкости (NC-FET) [90]. Это явление активно обсуждается в последние годы в качестве возможного преодоления физических ограничений на пути скейлинга транзисторных элементов (так называемая «Больцмановская тирания» – ограничение переключения тепловым пределом) [91]. Экспериментальные работы по созданию подзатворных структур диэлектрик-сегнетоэлектрик выполнены с использованием различных материалов: титаната бария [92], PZT [93, 94], $\text{P}(\text{VDF}-\text{TrFE})$ [95], HfO [65, 96]. Исследование эффекта отрицательной емкости является интересной физической задачей, однако возможность приборной реализации данного явления остается предметом дискуссий [91].

Как уже отмечалось выше, важным параметром ЗУ является возможность реализации мультибитовой ячейки. Примером такой структуры может являться мультибитовая ячейка FRAM на основе PZT с использованием промежуточных слоев CoFeO_4 [97]. Отметим также совершенно неожиданную идею построения памяти на основе обратимого растрескивания в $\text{MnPt}/\text{PMN}-\text{PT}$ гетероструктурах [98]. Эффект многоуровневого энергонезависимого хранения информации позволяет рассматривать сегнетоэлектрические материалы в качестве кандидатов для создания синаптических элементов искусственных нейронных сетей [99]. Согласно известной модели переключения Ishibashi [100], приложение импульса с длительностью меньшей, чем время полного переключения домена, приводит к его частичному переключению. Основываясь на этом факте, Ishiwara исследовал процессы частичного переключения PZT в терминах адаптивного машинного обучения [101]. В настоящее время продемонстрирована реализация синаптических элементов с использованием как однобитовых элементов памяти, так и многобитовых ячеек на основе конденсаторных или транзисторных FRAM структур (см. напр. [102–104]). При этом показана возможность реализации процессов, регулирующих степень соединения, основываясь на относительной синхронизации выходных и входных потенциалов конкретного нейрона (STDP – spiketiming-dependent plasticity – биологический процесс, который регулирует силу связей между нейронами в мозге) [105]. Однако, как и в случае традиционных FRAM-применений, существующие в настоящее время ограничения связаны с проблемами трехмерной интеграции сегнетоэлектрических элементов при надежном хранении информации.

Помимо отмеченных выше потенциальных решений в области устройств памяти на сегнетоэлектриках, которые могут явиться магистральными для IT-индустрии, существует множество нишевых применений для решения определенного класса задач. В данной статье мы не рассматривали другие известные области применения интегрированных сегнетоэлектриков, такие как пьезоэлектрические МЭМС, устройства энергосбережения, пироприемники, фазовращатели, фильтры и другие устройства СВЧ диапазона, оптоэлектронные устройства, и многие другие, в основе которых лежит многообразие

нелинейных свойств этих материалов [3, 22, 23]. Так или иначе, активные диэлектрики все еще продолжают искать пути интеграции с технологиями микро- и нанoeлектроники.

Заключение

Сегнетоэлектрическая память FRAM использует зарядовый принцип записи, что обеспечивает высокую энергоэффективность, наряду с энергонезависимостью, высокими скоростями, большим числом циклов перезаписи (10^{12} – 10^{15}), длительным временем хранения (~10 лет), а также стойкостью к воздействию специальных факторов. Однако обладая высоким потенциалом, сегнетоэлектрическая память все еще не заняла значительной доли рынка энергонезависимых запоминающих устройств в связи с проблемами достижения высоких уровней интеграции.

На сегодняшний день коммерчески доступные FRAM микрочипы предлагают компании Texas Instruments, Cypress Semiconductor, Fujitsu Limited и Lapis Semiconductor. При этом компания Cypress производит свои FRAM на мощностях Texas Instruments, что подтверждается анализом литературы и конструктивно-технологического строения ИС данных производителей. ЯП FRAM всех производителей выполнены по архитектуре 1T1C, при этом Fujitsu использует конструкцию с планарным расположением сегнетоэлектрического конденсатора, а остальные производители реализуют более прогрессивную вертикальную структуру. Сам конденсатор представляет из себя многослойную структуру, в которой используется сегнетоэлектрический слой на основе PZT с толщиной около 70 нм, а электроды выполнены из IrO_x/Ir или Pt (нижний электрод у ИС Fujitsu). Передовым технологическим процессом производства FRAM устройств пока остается 130 нм КМОП процесс с пятиуровневой медной металлизацией, используемый на фабах Texas Instruments.

Для увеличения степени интеграции необходимо использование 3D-конструкций сегнетоэлектрического конденсатора. Большой потенциальный интерес представляют решения на основе бинарных сегнетоэлектриков в связи с возможностью осаждения сверхтонких слоев на рельефы с высоким аспектным соотношением методом ALD. Первые результаты по созданию вертикально интегрированных структур с пленками $\text{HfO}_2:\text{Al}$ для создания энергонезависимых NAND массивов продемонстрированы IMEC, а GlobalFoundries использовала конструкцию, в которой сегнетоэлектрик является подзатворным диэлектриком. Несмотря на хороший потенциал к скейлингу, технология создания FRAM памяти на основе оксида гафния пока не коммерциализирована в связи с нерешенными проблемами надежного хранения информации.

Среди новых направлений интеграции классических сегнетоэлектрических перовскитов необходимо отметить работы по созданию мультибитовой ЯП на основе полевого транзистора с квазиэпитаксиальным слоем PZT в качестве подзатворного диэлектрика, а также проект IBM по созданию пьезоэлектронного транзистора PET и устройств пьезоэлектронной памяти PETMEM, в которых пьезоэлектрик оказывает давление на канал транзистора, выполненного из материала, испытывающего фазовый переход диэлектрик-металл. Такое решение позволило бы повысить энергоэффективность до 50 раз по сравнению с 5 нм FinFET технологией. Реализация устройств памяти PETMEM и схем обработки на PET является потенциальным решением по созданию новой элементной базы с низким энергопотреблением и высоким быстродействием.

Среди поисковых работ, которые могли бы обеспечить прорывные FEOL-решения в эпоху пост-Мура, следует отметить работы по интеграции сегнетоэлектриков и двумерных полупроводников, а также исследование эффекта отрицательной емкости. Ячейки сегнетоэлектрических ЗУ могут быть использованы для создания синаптических элементов искусственных нейронных сетей, однако для этого предстоит преодолеть существующие ограничения их трехмерной интеграции и надежного хранения информации.

Так или иначе, прогресс в области исследований новых материалов и конструкций покажет, способна ли сегнетоэлектрическая память стать той универсальной памятью, поиск которой активно ведет IT-индустрия, стремящаяся преодолеть существующий барьер, обусловленный различиями в производительности быстрого процессора и относительно медленной памяти.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований грант № 19-29-03058 (Абдуллаев Д.А., Воротилов К.А., Сигов А.С.), а также Министерства науки и высшего образования РФ (0706-2020-0022).

Литература: / References:

1. Милованов Р.А., Келм Е.А. Структура ячеек энергонезависимой памяти типа EEPROM и Flash. *Нано- и Микросистемная техника*. 2015;4(177):45-59.
[Milovanov R.A., Kelm E.A. Structure of EEPROM and FLASH Memory Cells. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika = J. NANO- and MICROSYSTEM Technique*. 2015;4(177):45-59 (in Russ.).]
2. Defay E. Ferroelectric dielectrics integrated on silicon. N.Y.: John Wiley & Sons, 2013. 448 p.
3. Воротилов К.А., Мухортов В.М., Сигов А.С. Интегрированные сегнетоэлектрические устройства. М.: Энергоатомиздат, 2011. 175 с. ISBN 978-5-283-00872-1
[Vorotilov K.A., Mukhortov V.M., Sigov A.S. *Integrirovannye segnetoelektricheskie ustroystva* (Integrated ferroelectric devices). (Ed.) A.S. Sigov. Moscow: Energoatomizdat; 2011. 175 p. (in Russ.). ISBN 978-5-283-00872-1]
4. Воротилов К.А., Сигов А.С. Сегнетоэлектрические запоминающие устройства. *Физика твердого тела*. 2012;54(5):843-848.
[Vorotilov K.A., Sigov A.S. Ferroelectric memory. *Phys. Solid State*. 2012;54(5):894-899.
<https://doi.org/10.1134/S1063783412050460>]
5. Воротилов К.А., Сигов А.С. Сегнетоэлектрические запоминающие устройства: перспективные технологии и материалы. *Нано- и Микросистемная техника*. 2008;10(99):30-42.
[Vorotilov K. A., Sigov A. S. Ferroelectric Random Access Memory: Prospect Technology and Materials. *Physics of the Solid State*. 2008;10(99):30-42 (in Russ.).]
6. Rodriguez J., Remack, K., Gertas, J., Wang L., Zhou C., Boku K., Rodriguez-Latorre J., Udayakuma, K.R., Summerfelt S., Moise T., Kim D., Groat J., Eliason J., Depner M., Chu F. Reliability of Ferroelectric Random Access memory embedded within 130nm CMOS. In: 2010 IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS). 2010. P. 750-758.
<https://doi.org/10.1109/IRPS.2010.5488738>
7. FRAM Guide Book. 5th Edition. Fujitsu Lmted. Electronic Devices. 2005. 57 p.
8. Meena J.S., Sze S.M., Chand U.Ch., Tseng T.-Y. Overview of emerging nonvolatile memory technologies. *Nanoscale research letters*. 2014;9(526):1-33.
<https://doi.org/10.1186/1556-276X-9-526>
9. Emerging Non-Volatile Memories. Yole Developpement SARL. 2013. 16 p.
10. Emerging Memory (STT-MRAM, PCRAM, ReRAM, 3D XPoint™) Technology/Products Roadmap. TechInsights Inc. 2017. 12 p.
11. Handbook of Nanomagnetism: Applications and Tools, R.A. Lukaszew (Ed.), New York, Taylor and Francis, 2015. 304 p.
<https://doi.org/10.1201/b18942>
12. DRAM Technology/Products Roadmap. TechInsights Inc. 2017. 15 p.
13. Non-Volatile Ferroelectric Random Access Memory (FRAM). Fujitsu Lmted. 2015. 5 p.
https://www.fujitsu.com/us/Images/SPBG_FRAM_Overview_BR.pdf (дата обращения 18.08.2020)
14. Sayyah R., Macleod T.C., Ho F.D. Radiation-hardened electronics and ferroelectric memory for space flight systems. *Ferroelectrics*. 2011;413(1):170-175.
<https://doi.org/10.1080/00150193.2011.554145>
15. Brewer S.J., Williams S.C., Griffin L.A., Cress C.D., Rivas M., Rudy R.Q., Polcawich R.G., Glaser E.R., Bassiri-Gharb N. Enhanced radiation tolerance in Mn-doped ferroelectric thin films. *Appl. Phys. Lett.* 2017;111(2):022906.
<https://doi.org/10.1063/1.4992791>

16. Лайнс М., Гласс А. Сегнетоэлектрики и родственные материалы: пер. с англ.; под ред. В.В. Леманова и Г.А. Смоленского. М.: Мир, 1981. 736 с.
[Lains M., Glass A. *Segnetoelektriki i rodstvennyye materialy: per. s angl.; pod red. V.V. Lemanova i G.A. Smolenskogo* (Ferroelectrics and related materials: trans. from Engl.; (Eds.) V.V. Lemanov and G.A. Smolensky). Moscow: Mir; 1981. 736 p. (in Russ.).
[Lines M.E., Glass A.M. Principles and application of ferroelectrics and related materials. Oxford: Clarendon Press; 1977. 680 p.]
17. Барфут Дж., Тейлор Дж. Полярные диэлектрики и их применения: пер. с англ.; под ред. Л.А. Шувалова. М.: Мир, 1970. 526 с.
[Burfoot J., Taylor J. *Polyarnye dielektriki i ikh primeneniya: per. s angl.; pod red. L.A. Shuvalova* (Polar dielectrics and their applications: trans. from English; (Ed.) L.A. Shuvalov. Moscow: Mir; 1981. 526 p. (in Russ.).
[Burfoot J., Taylor J. Polar dielectrics and their applications. London: Macmillan Press; 1979. 480 p.]
18. Wu S.Y. A new ferroelectric memory device, metal-ferroelectric-semiconductor transistor. *IEEE Trans. Electron Devices*. 1974;21(8):499-504.
<https://doi.org/10.1109/T-ED.1974.17955>
19. Zhang K. Embedded memories for nano-scale VLSIs. N.Y.: Springer; 2009. 400 p. ISBN 978-0-387-88497-4
20. Izyumskaya N., Alivov Ya., Morkoç H. Oxides, oxides, and more oxides: high-κ oxides, ferroelectrics, ferromagnetics, and multiferroics. *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.* 2009;34(3-4):89-179.
<https://doi.org/10.1080/10408430903368401>
21. Izyumskaya N., Alivov Y-I., Cho S.-J., Morkoç H., Lee H., Kang Y.-S. Processing, Structure, Properties, and Applications of PZT Thin Films. *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.* 2007;32(3):111-202.
<https://doi.org/10.1080/10408430701707347>
22. Setter N., Damjanovic D., Eng L., Fox G., Gevorgian S., Hong S., Kingon A., Kohlstedt H., Park N.Y., Stephenson G.B., Stolitchnov I., Taganstev A.K., Taylor D.V., Yamada T., Streiffer S. Ferroelectric thin films: Review of materials, properties, and applications. *J. Appl. Phys.* 2006;100(5):051606.
<https://doi.org/10.1063/1.2336999>
23. Eom C.B., Trolier-McKinstry S. Thin-film piezoelectric MEMS. *MRS Bulletin*. 2012;37(11):1007-1021.
24. Panda P.K., Sahoo B. PZT to Lead Free Piezo Ceramics: A Review. *Ferroelectrics*. 2015;474(1):128-143.
<https://doi.org/10.1080/00150193.2015.997146>
25. Mousharraf A. Is PZT an environment friendly piezoelectric material? *Materials Today*;2012.
<https://www.materialstoday.com/characterization/comment/is-pzt-an-environment-friendly-piezoelectric-mater/>
26. Siddiqi M.A. Dynamic RAM: Technology Advancements. N.Y.: CRC Press; 2012. 382 p. ISBN 9781138077058
27. Kim S.K., Lee S.W., Han J.H., Lee B., Han S.W., Hwang C.S. Capacitors with an equivalent oxide thickness of <0.5 nm for nanoscale electronic semiconductor memory. *Adv. Funct. Mater.* 2010;20(18):2989-3003.
<https://doi.org/10.1002/adfm.201000599>
28. Мироненко И.Г., Иванов А.А., Карманенко С.Ф., Семенов А.А., Назаров И.А. Сегнетоэлектрические пленки и устройства на сверх- и крайне высоких частотах. СПб.: Элмор., 2007. 162 с.
[Mironenko I.G., Ivanov A.A., Karmanenko S.F., Semenov A.A., Nazarov I.A. *Segnetoelektricheskie plenki i ustroystva na sverkh- i kraine vysokikh chastotakh* (Ferroelectric Films and Devices at Super- and Extremely High Frequencies). Sankt-Peterburg: Elmor; 2007. 162 p. (in Russ.).]
29. Мухортов В.М., Масычев С.И., Головки Ю.И., Чуб А.В., Мухортов Вл.М. Фазовращатель на щелевой линии, нагруженной варакторами на основе наноразмерных пленок титаната бария-стронция. *Радиотехника и электроника*. 2007;52(11):1402-1406.
[Mukhortov Vas.M., Masychev S.I., Golovko Yu.I., Chub A.V., Mukhortov Vl.M. A phase shifter on a slot line loaded with varactors designed on the basis on nanodimensional films of barium-strontium titanate. *J. Commun. Technol. El.* 2007;52(11):1300-1304.
<https://doi.org/10.1134/S1064226907110150>
30. Смоленский Г.А., Исупов В.А., Аграновская А.И. Новая группа сегнетоэлектриков (со слоистой структурой) I. *Физика твердого тела*. 1959;1(1):169-170.
[Smolensky G.A., Isupov V.A., Agranovskaya A.I. New group of ferroelectrics (with layered structure) Part I. *Fizika Tverdogo Tela = Solid state physics*. 1959;1(1):169-170. (in Russ.).]
31. Klee M., Mackens U., Pankert J., Brand W., Klee W. Science and technology of electroceramic thin films. O. Auciello and R. Waser (Eds.). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers; 1995. 99 p.
32. Fujii E.; Uchiyama K. First 0.18 μm SBT-based embedded FeRAM technology with hydrogen damage free stacked cell structure. *Integr. Ferroelectr.* 2003;53(1):317-323.
<https://doi.org/10.1080/10584580390258246>
33. Wouters D. J., Maes D., Goux L., Lisoni J. G., Paraschiv V., Johnson J. A., Schwitters M., Everaert J.-L., Boullart W., Schaekers M., Willekens M., Vander Meeren H., Haspelslagh L., Artoni C., Caputa C., Casella P., Corallo G., Russo G., Zambrano R., Monchoix H., Vecchio G., Van Auytryve L. Integration of SrBi₂Ta₂O₉ thin films for high density ferroelectric random access memory. *J. Appl. Phys.* 2006;100:051603.
<https://doi.org/10.1063/1.2337359>

34. Lee S.-S., Noh K.-H., Kang H.-B., Hong S.-K., Yeom S.-J., Park Y.-J. Characterization of Hynix 16M FERAM adopted novel sensing scheme. *Integr. Ferroelectr.* 2003;53(1):343-351.
<https://doi.org/10.1080/10584580390258264>
35. Bösccke T.S., Müller J., Bräuhaus D., Schröder U., Böttger U. Ferroelectricity in hafnium oxide thin films. *Appl. Phys. Lett.* 2011;99:102903.
<https://doi.org/10.1063/1.3634052>
36. Polakowski P., Müller J. Ferroelectricity in undoped hafnium oxide. *Appl. Phys. Lett.* 2015;106(23):232905.
<https://doi.org/10.1063/1.4922272>
37. Mueller S., Mueller J., Singh A., Riedel S., Sundqvist J., Schroeder U., Mikolajick T. Incipient ferroelectricity in Al-doped HfO₂ thin films. *Adv. Funct. Mater.* 2012;22(11):2412-2417.
<https://doi.org/10.1002/adfm.201103119>
38. Chernikova A.G., Kuzmichev D.S., Negrov D.V., Kozodaev M.G., Polyakov S.N., Markeev A.M. Ferroelectric properties of full plasma-enhanced ALD TiN/La: HfO₂/TiN stacks. *Appl. Phys. Lett.* 2016;108(24):242905.
<https://doi.org/10.1063/1.4953787>
39. Müller J., Bösccke T.S., Bräuhaus D., Schröder U., Böttger U., Sundqvist J., Kücher P., Mikolajick T., Frey L. Ferroelectric Zr_{0.5}Hf_{0.5}O₂ thin films for nonvolatile memory applications. *Appl. Phys. Lett.* 2011;99(11):112901.
<https://doi.org/10.1063/1.3636417>
40. Starschich S., Schenk T., Schroeder U., Boettger U. Ferroelectric and piezoelectric properties of Hf_{1-x}Zr_xO₂ and pure ZrO₂ films. *Appl. Phys. Lett.* 2017;110(18):182905.
<https://doi.org/10.1063/1.4983031>
41. Sang X., Grimley E.D., Schenk T., Schroeder U., LeBeau J.M. On the structural origins of ferroelectricity in HfO₂ thin films. *Appl. Phys. Lett.* 2015;106(16):162905.
<https://doi.org/10.1063/1.4919135>
42. Fan Z., Chen J., Wang J. Ferroelectric HfO₂-based materials for next-generation ferroelectric memories. *J. Adv. Dielectrics.* 2016;6(2):1630003-11.
<https://doi.org/10.1142/S2010135X16300036>
43. Park M.H., Lee Y.H., Kim H.J., Kim Y.J., Moon T., Kim K.D., Müller J., Kerch A., Schroeder U., Mikolajick T., Hwang, C.S. Ferroelectricity and Antiferroelectricity of Doped Thin HfO₂-Based Films. *Adv. Mater.* 2015;27(11):1811-1831.
<https://doi.org/10.1002/adma.201404531>
44. Petrovsky V.I., Sigov A.S., Vorotilov K.A. Microelectronic applications of ferroelectric films. *Integr. Ferroelectr.* 1993;3(1):59-68.
<https://doi.org/10.1080/10584589308216700>
45. Kawashima S., Cross J.S. FeRAM. In: (Ed.) K. Zhang. *Embedded Memories for Nano-Scale VLSIs*. N.Y.: Springer; 2009. P. 279-328.
https://doi.org/10.1007/978-0-387-88497-4_8
46. ITRS Reports – International Technology Roadmap for Semiconductors.
 URL: https://www.semiconductors.org/wp-content/uploads/2018/06/0_2015-ITRS-2.0-Executive-Report-1.pdf (date of the application 18.08.2020).
47. Arimoto Y., Ishiwara H. Current status of ferroelectric random-access memory. *MRS Bulletin.* 2004;29(11):823-828.
<https://doi.org/10.1557/mrs2004.235>
48. McAdams H.P., Acklin R., Blake T., Du X. H., Eliason J., Fong J., Kraus W.F., Liu D., Madan S., Moise T., Natarajan S., Qian N., Qiu Y., Ramack K.A., Rodriguez J., Roscher J., Seshadri A., Summerfelt S.R. A 64-Mb embedded FRAM utilizing a 130-nm 5LM Cu/FSG logic process. *IEEE J. Solid-State Circ.* 2004;39(4):667-677.
<https://doi.org/10.1109/JSSC.2004.825241>
49. Moise T.S., Summerfelt S.R., McAdams H., Aggarwal S., Udayakumar K.R., Celii F.G., Martin J.S., Xing G., Hall L., Taylor K.J., Hurd T., Rodriguez J., Remack K., Khan M.D., Boku K., Stacey G., Yao M., Albrecht M.G., Zielinski E., Thakre M., Kuchimanchi S., Thomas A., McKee B., Rickes J., Wang A., Grace J., Fong J., Lee D., Pietrzyk C., Lanham R., Gilbert S.R., Taylor D., Amano J., Bailey R., Chu F., Fox G., Sun S., Davenport T. Demonstration of a 4 Mb, high density ferroelectric memory embedded within a 130 nm, 5 LM Cu/FSG logic process. In: *International Electron Devices Meeting (IEDM'02)*. 2002. P. 535-538.
<https://doi.org/10.1109/IEDM.2002.1175897>
50. Müller J., Polakowski P., Mueller S., Mikolajick T. Ferroelectric hafnium oxide based materials and devices: Assessment of current status and future prospects. *J. Solid State Sci. Technol.* 2015;4(5):N30-N35.
<http://dx.doi.org/10.1149/2.0081505jss>
51. Muller J., Boscke T. S., Muller S., Yurchuk E., Polakowski P., Paul J., Martin D., Schenk T., Khullar K., Kersch A., Weinreich W., Riedel S., Seidel K., Kumar A., Arruda T. M., Kalinin S. V., Schlosser T., Boschke R., van Bentum R., Schroder U., Mikolajick T. Ferroelectric hafnium oxide: A CMOS-compatible and highly scalable approach to future ferroelectric memories. In: *Electron Devices Meeting (IEDM)*. 2013 IEEE International. 2013. P. 10.8.1-10.8.4.
<https://doi.org/10.1109/IEDM.2013.6724605>

52. Koo J.M., Seo B.S., Kim S., Shin S., Lee J.H., Baik H., Lee J.H., Lee J.H., Bae B.J., Lim J.E., Yoo D. Ch., Park S.O., Kim H.S., Han H., Baik S., Choi Y.J., Park Y.J., Park Y. Fabrication of 3D trench PZT capacitors for 256Mbit FRAM device application. In: IEEE International Electron Devices Meeting-2005. IEDM Technical Digest. 4 p. <https://doi.org/10.1109/IEDM.2005.1609345>
53. Rodriguez J.A., Remack K., Boku K., Udayakumar K.R., Aggarwal S., Summerfelt S.R., Celii F.G., Martin S., Hall L., Taylor K., Moise T., McAdams H., McPherson J., Bailey R., Fox G., Depner M. Reliability properties of low-voltage ferroelectric capacitors and memory arrays. *IEEE T. Device Mat. Re.* 2004;4(3):436-449. <https://doi.org/10.1109/TDMR.2004.837210>
54. Kim K., Lee S. Integration of lead zirconium titanate thin films for high density ferroelectric random access memory. *J. Appl. Phys.* 2006;100(5):051604. <https://doi.org/10.1063/1.2337361>
55. Park Y., Lee J.H., Koo J.M., Kim S.P., Shin S., Cho Ch. R., Lee J.K. Preparation of $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$ films on trench structure for high-density ferroelectric random access memory. *Integr. Ferroelectr.* 2004;66(1):85-95. <https://doi.org/10.1080/10584580490894771>
56. Shin S., Han H., Park Y.J., Choi J.Y., Park Y., Baik S. Characterization of 3D Trench PZT Capacitors for High Density FRAM Devices by Synchrotron X-ray Micro-diffraction. In: AIP Conference Proceedings. 2007;879(1):1554-1556. <https://doi.org/10.1063/1.2436361>
57. Zhou Z., Bowland C.C., Patterson B.A., Malakooti M.H., Sodano H.A. Conformal BaTiO₃ films with high piezoelectric coupling through an optimized hydrothermal synthesis. *ACS Appl. Mater. Inter.* 2016;8(33):21446-21453. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b05700>
58. Polakowski P., Riedel S., Weinreich W., Rudolf M., Sundqvist J., Seidel K., Muller J. Ferroelectric deep trench capacitors based on Al:HfO₂ for 3D nonvolatile memory applications. In: 2014 IEEE 6th International Memory Workshop (IMW). 2014. 4 p. <https://doi.org/10.1109/IMW.2014.6849367>
59. Müller J., Böske T. S., Schröder U., Mueller S., Bräuhaus D., Böttger U., Frey L., Mikolajick T. Ferroelectricity in simple binary ZrO₂ and HfO₂. *Nano Lett.* 2012;12(8):4318-4323. <https://doi.org/10.1021/nl302049k>
60. Schroeder U., Yurchuk E., Müller J., Martin D., Schenk T., Polakowski P., Adelman C., Popovici M.I., Kalinin S.V., Mikolajick T. Impact of different dopants on the switching properties of ferroelectric hafniumoxide. *Jpn. J. Appl. Phys.* 2014;53(8S1):08LE02. <http://dx.doi.org/10.7567/JJAP.53.08LE02>
61. Zarubin S., Suvorova E., Spiridonov M., Negrov D., Chernikova A., Markeev A., Zenkevich A. Fully ALD-grown TiN/Hf_{0.5}Zr_{0.5}O₂/TiN stacks: Ferroelectric and structural properties. *Appl. Phys. Lett.* 2016;109(19):192903. <https://doi.org/10.1063/1.4966219>
62. IMEC demonstrates breakthrough in CMOS-compatible Ferroelectric Memory. URL: <https://www.imec-int.com/en/articles/imec-demonstrates-breakthrough-in-cmos-compatible-ferroelectric-memory> (date of the application 03.05.2020).
63. Lapedus M. A New Memory Contender? Semiconductor Engineering. URL: <https://semiengineering.com/a-new-memory-contender/> (date of the application 16.05.2020).
64. Müller J., Yurchuk E., Schlösser T., Paul J., Hoffmann R., Müller S., Martin D., Slesazek S., Polakowski P., Sundqvist J., Czernohorsky M. Ferroelectricity in HfO₂ enables nonvolatile data storage in 28 nm HKMG. In: VLSI Technology (VLSIT) Symposium on IEEE. 2012. P. 25-26. <https://doi.org/10.1109/VLSIT.2012.6242443>
65. Yurchuk E., Müller J., Paul J., Schlösser T., Martin D., Hoffmann R., Müller S., Slesazek S., Schröder U., Boschke R., van Bentum R. Impact of scaling on the performance of HfO₂-based ferroelectric field effect transistors. *IEEE Transactions on Electron Devices.* 2014;61(11):3699-3706. <https://doi.org/10.1109/TED.2014.2354833>
66. Pešić M., Schroeder U., Mikolajick T. Ferroelectric One Transistor/One Capacitor Memory Cell. In book: (Eds.). Schroeder U., Hwang C., Funakubo H. Ferroelectricity in Doped Hafnium Oxide: Materials, Properties and Devices. Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, 2019. P. 413-424. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102430-0.00019-X>
67. Zhou D., Xu J., Li Q., Guan Y., Cao F., Dong X., Müller J., Schenk T., Schröder U. Wake-up effects in Si-doped hafnium oxide ferroelectric thin films. *Appl. Phys. Lett.* 2013;103(19):192904. <https://doi.org/10.1063/1.4829064>
68. Park M., Lee Y., Mikolajick T., Schroeder U., Hwang C. Review and perspective on ferroelectric HfO₂-based thin films for memory applications. *MRS Communications.* 2018;8(3):795-808. <https://doi.org/10.1557/mrc.2018.175>
69. Pešić M., Fengler F.P., Slesazek S., Schroeder U., Mikolajick T., Larcher L., Padovani A. Root cause of degradation in novel HfO₂-based ferroelectric memories. In: IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS). 2016. P. MY-3-1-MY-3-5. <https://doi.org/10.1109/IRPS.2016.7574619>
-

70. Chernikova A.G., Kozodaev M.G., Negrov D.V., Korostylev E.V., Park M.H., Schroeder U., Hwang Ch.S., Markeev A.M. Improved ferroelectric switching endurance of La-doped Hf_{0.5}Zr_{0.5}O₂ thin films. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2018;10(3):2701-2708.
<https://doi.org/10.1021/acsami.7b15110>
71. Delimova L., Guschina E., Zaitseva N., Pavlov S., Seregin D., Vorotilov K., Sigov A. Effect of seed layer with low lead content on electrical properties of PZT thin films. *J. Mater. Res.* 2017;32(9):1618-1627.
<https://doi.org/10.1557/jmr.2017.156>
72. Park J.H., Kim H.Y., Seok K.H., Kiaee Z., Lee S.K., Joo S.K. Multibit ferroelectric field-effect transistor with epitaxial-like Pb(Zr, Ti)O₃. *J. Appl. Phys.* 2016;119(12):124108.
<https://doi.org/10.1063/1.4945002>
73. Park J.H., Joo S.K. A Novel Metal-Ferroelectric-Insulator-Silicon FET With Selectively Nucleated Lateral Crystallized Pb (Zr,Ti)O₃ and ZrTiO₄ Buffer for Long Retention and Good Fatigue. *IEEE Electron Device Letters*. 2015;36(10):1033-1036.
<https://doi.org/10.1109/LED.2015.2472987>
74. Pavlenko A.V., Stryukov D.V., Mukhortov V.M., Biryukov S.V. Structure and Polarization Relaxation of Ba_{0.5}Sr_{0.5}Nb₂O₆/(001)Si Films. *Tech. Phys. = Russ. J. Appl. Phys.* 2018;63(3):407-410.
<https://doi.org/10.1134/S1063784218030179>
75. Стрюков Д.В., Мухортов В.М., Бирюков С.В., Головки Ю.И. Эффект поля в структуре металл – сегнетоэлектрик – полупроводник с использованием многослойного сегнетоэлектрика. *Наука Юга России*. 2017;13(1):18-24.
<https://doi.org/10.23885/2500-0640-2017-13-1-18-24>
[Stryukov D.V., Mukhortov V.M., Biryukov S.V., Golovko Yu. I. Field effect in metal-ferroelectric-semiconductor structure with multilayer ferroelectric. *Nauka Yuga Rossii = Science in the South of Russia*. 2017;13(1):18-24 (in Russ.).
<https://doi.org/10.23885/2500-0640-2017-13-1-18-24>]
76. Hu J. M., Chen L. Q., Nan C.W. Multiferroic heterostructures integrating ferroelectric and magnetic materials. *Adv. Mater.* 2016;28(1):15-39.
<https://doi.org/10.1002/adma.201502824>
77. Magdău I.B., Liu X.-H., Kuroda M.A., Shaw T.M., Crain J., Solomon P.M., Newns D.M., Martyna G.J. The piezoelectronic stress transduction switch for very large-scale integration, low voltage sensor computation, and radio frequency applications. *Appl. Phys. Lett.* 2015;107(7):073505.
<https://doi.org/10.1063/1.4928681>
78. Chang J.B., Miyazoe H., Copel M., Solomon P.M., Liu X.-H., Shaw T.M., Schrott A.G., Gignac L.M., Martyna G.J., Newns D.M. First realization of the piezoelectronic stress-based transduction device. *Nanotechnology*. 2015;26(37):375201.
<https://doi.org/10.1088/0957-4484/26/37/375201>
79. Newns D., Elmegreen B., Liu X.H., Martyna G. A low-voltage high-speed electronic switch based on piezoelectric transduction. *J. Appl. Phys.* 2012;111(8):084509.
<https://doi.org/10.1063/1.4704391>
80. Newns D.M., Elmegreen B.G., Liu X.H., Martyna G.J. High response piezoelectric and piezoresistive materials for fast, low voltage switching: simulation and theory of transduction physics at the nanometer-scale. *Adv. Mater.* 2012;24(27):3672-3677.
<https://doi.org/10.1002/adma.201104617>
81. Newns D.M., Elmegreen B.G., Liu X.H., Martyna G.J. The piezoelectronic transistor: a nanoactuator-based post-CMOS digital switch with high speed and low power. *MRS Bull.* 2012;37(11):1071-1076.
<https://doi.org/10.1557/mrs.2012.267>
82. Demonstrating a new low-voltage memory element.
URL: <https://www.petmem.eu/the-technology> (date of the application 17.05.2020).
83. Sousanis A., Smet P.F., Poelman D. Samarium Monosulfide (SmS): Reviewing Properties and Applications. *Materials*. 2017;10(8):953.
<https://doi.org/10.3390/ma10080953>
84. Beleanu A., Kiss J., Kreiner G., Köhler C., Mühler L., Schnelle W., Burkhardt U., Chadov S., Medvediev S., Ebke D., Felser C., Cordier G., Albert B., Hoser A., Bernardi F., Larkin T.I., Pröpper D., Boris A.V., Keimer B. Large resistivity change and phase transition in the antiferromagnetic semiconductors LiMnAs and LaOMnAs. *Phys. Rev. B*. 2013;88(18):184429.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.88.184429>
85. Solomon P.M., Bryce B., Keech R., Shaw T.M., Copel M., Hung L. W., Schrott A., Theis T.N., Haensch W., Rossangel S.M., Miyazone H., Shetty S. The PiezoElectronic switch: A path to low energy electronics. In: 2013 Third Berkeley Symposium on Energy Efficient Electronic Systems (E3S). *IEEE*. 2013. P. 1-2.
<https://doi.org/10.1109/E3S.2013.6705880>
86. Zheng Y., Ni G.X., Toh C.T., Zeng M.G., Chen S.T., Yao, K., Özyilmaz B. Gate-controlled nonvolatile graphene-ferroelectric memory. *Appl. Phys. Lett.* 2009;94(16):163505.
<https://doi.org/10.1063/1.3119215>

87. Doh Y.J., Yi G.C. Nonvolatile memory devices based on few-layer graphene films. *Nanotechnology*. 2010;21(10):105204.
<https://doi.org/10.1088/0957-4484/21/10/105204>
88. Xie L., Chen X., Dong Z., Yu Q., Zhao X., Yuan G., Zeng Zh., Wang Y., Zhang, K. Nonvolatile Photoelectric Memory Induced by Interfacial Charge at a Ferroelectric PZT-Gated Black Phosphorus Transistor. *Adv. Electron. Mater.* 2019;5(8):1900458.
<https://doi.org/10.1002/aelm.201900458>
89. Shen P.C., Lin C., Wang H., Teo K.H., Kong J. Ferroelectric memory field-effect transistors using CVD monolayer MoS₂ as resistive switching channel. *Appl. Phys. Lett.* 2020;116(3):033501.
<https://doi.org/10.1063/1.5129963>
90. McGuire F.A., Lin Y.C., Price K., Rayner G.B., Khandelwal S., Salahuddin S., Franklin A.D. Sustained sub-60 mV/decade switching via the negative capacitance effect in MoS₂ transistors. *Nano Lett.* 2017;17(8):4801-4806.
<https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.7b01584>
91. Alam M.A., Si M., Ye P.D. A critical review of recent progress on negative capacitance field-effect transistors. *Appl. Phys. Lett.* 2019;114(9):090401.
<https://doi.org/10.1063/1.5092684>
92. Stadler H.L. Ferroelectric switching time of BaTiO₃ crystals at high voltages. *J. App. Phys.* 1958;29(10):1485-1487.
<https://doi.org/10.1063/1.1722973>
93. Scott J.F., McMillan L.D., Araujo C.A. Switching kinetics of lead zirconate titanate sub-micron thin-film memories. *Ferroelectrics*. 1989;93(1):31-36.
<https://doi.org/10.1080/00150198908017317>
94. Li J., Nagaraj B., Liang H., Cao W., Lee C.H., Ramesh R. Ultrafast polarization switching in thin-film ferroelectrics. *Appl. Phys. Lett.* 2004;84(7):1174-1176.
<https://doi.org/10.1063/1.1644917>
95. Ishii H., Nakajima T., Takahashi Y., Furukawa T. Ultrafast polarization switching in ferroelectric polymer thin films at extremely high electric fields. *Appl. Phys. Express*. 2011;4(3):031501.
<https://doi.org/10.1143/APEX.4.031501>
96. Mulaosmanovic H., Ocker J., Müller S., Schroeder U., Müller J., Polakowski P., Slesazeck S. Switching kinetics in nanoscale hafnium oxide based ferroelectric field-effect transistors. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2017;9(4):3792-3798.
<https://doi.org/10.1021/acsami.6b13866>
97. Boni A.G., Chirila C., Pasuk I., Negrea R., Pintilie I., Pintilie L. Steplike Switching in Symmetric PbZr_{0.2}Ti_{0.8}O₃/CoFeO₄/PbZr_{0.2}Ti_{0.8}O₃ Heterostructures for Multistate Ferroelectric Memory. *Phys. Rev. Applied*. 2017;8(3):034035.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.8.034035>
98. Liu Z.Q., Liu J.H., Biegalski M.D., Hu J. M., Shang S.L., Ji Y., Wang J.M., Hsu S.L., Wong A.T., Cordill M.J., Gludovatz B. Electrically reversible cracks in an intermetallic film controlled by an electric field. *Nat. Commun*. 2018;9(1):41.
<https://doi.org/10.1038/s41467-017-02454-8>
99. Oh S., Hwang H., Yoo I. K. Ferroelectric materials for neuromorphic computing. *APL Materials*. 2019;7(9):091109-091109-14.
<https://doi.org/10.1063/1.5108562>
100. Ishibashi Y., Takagi Y. Note on ferroelectric domain switching. *J. Phys. Soc. JPN*. 1971;31(2):506-510.
<https://doi.org/10.1143/JPSJ.31.506>
101. Ishiwara H. Proposal of adaptive-learning neuron circuits with ferroelectric analog-memory weights. *JPN. J. Appl. Phys.* 1993;32(1S):442-446.
<https://doi.org/10.1143/JJAP.32.442>
102. Jerry M., Dutta S., Kazemi A., Ni K., Zhang J., Chen, P. Y., Datta, S. A ferroelectric field effect transistor based synaptic weight cell. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2018;51(43):434001.
<https://doi.org/10.1088/1361-6463/aad6f8>
103. Seo M., Kang M.H., Jeon S.B., Bae H., Hur J., Jang B.C., Hwang K.M. First demonstration of a logic-process compatible junctionless ferroelectric FinFET synapse for neuromorphic applications. *IEEE Electr. Device Letters*. 2018;39(9):1445-1448.
<https://doi.org/10.1109/LED.2018.2852698>
104. Kim M.K., Lee J.S. Ferroelectric analog synaptic transistors. *Nano Lett.* 2019;19(3):2044-2050.
<https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.9b00180>
105. Boyn S., Grollier J., Lecerf G., Xu B., Locatelli N., Fusil S., Girod S., Carretero C., Garcia K., Xavier S., Tomas J., Bellaiche L., Bibes M., Barthelemy A., Saïghi S., Garcia V. Learning through ferroelectric domain dynamics in solid-state synapses. *Nat. Commun*. 2017;8(1):1-7.
<https://doi.org/10.1038/ncomms14736>

Об авторах:

Абдуллаев Даниил Анатольевич, кандидат технических наук, младший научный сотрудник Института нанотехнологий микроэлектроники РАН (119991, Россия, Москва, Ленинский проспект, д. 32А); стажер-исследователь НОЦ «Технологический центр» ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). ResearcherID: ААО-5932-2020; Scopus Author ID: 56741027200

Милованов Роман Александрович, кандидат технических наук, заместитель начальника физико-технологического отдела Института нанотехнологий микроэлектроники РАН (119991, Россия, Москва, Ленинский проспект, д. 32А); старший научный сотрудник УНО «Электроника» ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Scopus Author ID: 55794840600

Волков Роман Леонидович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории электронной микроскопии, старший преподаватель кафедры общей физики Национального исследовательского университета «МИЭТ» (124498, Россия, Москва, Зеленоград, Площадь Шокина, д. 1). ResearcherID: С-8431-2017; Scopus Author ID: 52564796300

Боргардт Николай Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, начальник научно-исследовательской лаборатории электронной микроскопии, руководитель Центра коллективного пользования «Диагностика и модификация микроструктур и нанобъектов», заведующий кафедрой общей физики Национального исследовательского университета «МИЭТ» (124498, Россия, Москва, Зеленоград, Площадь Шокина, д. 1). ResearcherID: I-7869-2014; Scopus Author ID: 6603557021

Ланцев Андрей Николаевич, генеральный директор ЗАО «Скан» (119330, Россия, Москва, ул. Дружбы, д. 10Б).

Воротилов Константин Анатольевич, доктор технических наук, профессор, директор НОЦ «Технологический центр» ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). ResearcherID А-3331-2011; Scopus Author ID: 7004711340; orcid.org/0000-0003-4675-2067. https://www.researchgate.net/profile/Konstantin_Vorotilov.

Сигов Александр Сергеевич, академик РАН, президент ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). ResearcherID L-4103-2017; Scopus Author ID: 35557510600. https://www.researchgate.net/profile/A_Sigov

About the authors:

Daniil A. Abdullaev, Cand. Sci. (Engineering), Researcher of the Institute of Nanotechnology of Microelectronics RAS (32A, Leninsky pr., Moscow 119991, Russia), Researcher of REC “Technological Center”, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). ResearcherID: ААО-5932-2020; Scopus Author ID: 56741027200

Roman A. Milovanov, Cand. Sci. (Engineering), Deputy Head of Physics and Technology Department Institute of Nanotechnology of Microelectronics RAS (32A, Leninsky pr., Moscow 119991, Russia), Senior Researcher ESU “Electronics”, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). Scopus Author ID: 55794840600

Roman L. Volkov, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Senior Researcher of Electron Microscopy Laboratory, Senior Lecturer of General Physics Chair of National Research University of Electronic Technology – MIET (1, Shokin pl., Zelenograd, Moscow 124498, Russia). ResearcherID: С-8431-2017; Scopus Author ID: 52564796300

Nikolay I. Borgardt, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Head of Electron Microscopy Laboratory, Head of the Center for Collective Use “Diagnostics and Modification of Microstructures and Nano-Objects”, Head of General Physics Chair of National Research University of Electronic Technology – MIET (1, Shokin pl., Zelenograd, Moscow 124498, Russia). ResearcherID: I-7869-2014; Scopus Author ID: 6603557021

Andrey N. Lantsev, General Director of CJSC «Scan» (10B, Druzhby ul., Moscow 119330, Russia).

Konstantin A. Vorotilov, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Director of REC “Technological Center”, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). ResearcherID А-3331-2011; Scopus Author ID: 7004711340; orcid.org/0000-0003-4675-2067. https://www.researchgate.net/profile/Konstantin_Vorotilov.

Alexander S. Sigov, Academician of RAS, President, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). ResearcherID L-4103-2017; Scopus Author ID: 35557510600. https://www.researchgate.net/profile/A_Sigov

Поступила: 22.06.2020; получена после доработки: 02.07.2020; принята к опубликованию: 31.07.2020.