УДК 538.911 *Оригинальная статья*

Технологии и перспективы развития ферроэлектрических запоминающих устройств

С.Л. Гафнер, А.А. Череповская, Л.В. Редель, Д.А. Рыжкова, Ж.В. Головенько
ФГБОУ ВО «Хакасский государственный университет имени Н.Ф. Катанова»
655017, Россия, Республика Хакасия, Абакан, просп. Ленина, 90
sgafner@rambler.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.606

Аннотация: Ферроэлектрическая память представляет собой один из наиболее перспективных типов энергонезависимой твердотельной памяти благодаря высокому быстродействию, низкому энергопотреблению и устойчивости к внешним воздействиям. Принцип её действия основан на способности сегнетоэлектрических материалов сохранять направление поляризации после снятия внешнего напряжения. В работе рассмотрены физические принципы функционирования данного вида памяти, особенности архитектур ячеек 1T, 1T-1C, 2T-2C и chain-FRAM. Особое внимание уделено проблеме деструктивного считывания, характерной для большинства ферроэлектрических структур, и современным способам её решения – акустическим, пироэлектрическим, фотоэлектрическим и электрооптическим методам опроса. Кроме того, проведен анализ как ограничений масштабирования, связанных с использованием традиционных сегнетоэлектрических материалов, таких как цирконат-титанат свинца, так и поиска альтернативных материалов, в частности, оксида гафния, обеспечивающего стабильную поляризацию при толщине до 10 нм. Проведён обзор технологических решений, направленных на улучшение масштабируемости и надёжности ферроэлектрической памяти в условиях современных требований к микроэлектронике.

Ключевые слова: энергонезависимая память, ферроэлектрическая память, сегнетоэлектрики, структура ячейки, деструктивное считывание.

Гафнер Светлана Леонидовна – д.ф.-м.н., доцент, профессор кафедры математики, физики и информационных технологий, ФГБОУ ВО «Хакасский государственный университет им. Н.Ф. Катанова»
Череповская Арина Александровна – магистрант направления подготовки «Современные цифровые технологии в образовании», ФГБОУ ВО «Хакасский государственный университет им. Н.Ф. Катанова»
Редель Лариса Витальевна – к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры математики, физики и информационных технологий, ФГБОУ ВО «Хакасский государственный университет им. Н.Ф. Катанова»
Рыжкова Дарья Антоновна – старший преподаватель кафедры математики, физики и информационных технологий, ФГБОУ ВО «Хакасский государственный университет им. Н.Ф. Катанова»
Головенько Жанна Викторовна – к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры математики, физики и информационных технологий, ФГБОУ ВО «Хакасский государственный университет им. Н.Ф. Катанова»

Original paper

Technologies and development prospects of ferroelectric memory devices

S.L. Gafner, A.A. Cherepovskaya, L.V. Redel, D.A. Ryzhkova, Zh.V. Golovenko
Khakass State University, Abakan, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.606

Abstract: Ferroelectric memory is one of the most promising types of non-volatile solid-state memory due to its high speed, low power consumption and resistance to external influences. Its operating principle is based on the ability of ferroelectric materials to maintain the polarization direction after removing the external voltage. The paper considers the physical principles of this type of memory, the features of the 1T, 1T-1C, 2T-2C, and chain-FRAM cell architectures. Particular attention is paid to the problem of destructive reading, typical for most ferroelectric structures, and modern methods for solving it: acoustic, pyroelectric, photoelectric and electro-optical interrogation methods. In addition,

an analysis is made of both the scaling limitations associated with the use of traditional ferroelectric materials, such as lead zirconate titanate, and the search for alternative materials including hafnium oxide, which provides stable polarization at a thickness up to 10 nm. A review of technological solutions aimed at improving the scalability and reliability of ferroelectric memory in the context of modern requirements for microelectronics is conducted.
Keywords: non-volatile memory, ferroelectric memory, ferroelectrics, cell structure, destructive reading.

Svetlana L. Gafner – Dr. Sc., Docent, Professor, Department of Mathematics, Physics and Information Technology, Katanov Khakass State University, ORCID: 0000-0001-8181-2497
Arina A. Cherepovskaya – Master of Science of specialty «Modern digital technologies in education», Katanov Khakass State University, ORCID: 0009-0000-3482-2051
Larisa V. Redel – Dr. Sc., Docent, Department of Mathematics, Physics and Information Technology, Katanov Khakass State University
Daria A. Ryzhkova – Senior Lecturer, Department of Mathematics, Physics and Information Technology, Katanov Khakass State University, ORCID: 0000-0002-1986-5165
Zhanna V. Golovenko – Dr. Sc., Docent, Department of Mathematics, Physics and Information Technology, Katanov Khakass State University

Поступила в редакцию/received: 10.07.2025; после рецензирования/revised: 31.07.2025; принята/accepted: 05.08.2025.

1. Введение

В настоящее время прогресс технологий хранения данных напрямую связан с уменьшением размеров и увеличением быстродействия микросхем памяти. Кроме того, хоть развитие интеллектуальных систем и происходит с высокой скоростью, однако, все еще существуют физические ограничения использования их возможностей. Одним из таких ограничений является классическая архитектура фон Неймана, предполагающая раздельное размещение процессоров и элементов памяти [1]. То есть существует необходимость разработки принципиально новых подходов к созданию микросхем для хранения данных. Решение может быть найдено через внедрение нанотехнологий в сферу электроники, что и демонстрирует IEDM (International Electronic Devices Meeting) – Международная конференция по электронным приборам, которая ежегодно проходит в Сан-Франциско. Доклады посвящены значимым открытиям и инновационным решениям в сфере микро-, нано-, опто- и биоэлектроники. Среди множества обсуждаемых тем особое внимание уделяется вопросам развития компьютерных запоминающих устройств.

Микросхемы памяти являются важнейшими компонентами современной микроэлектроники. Сегодня наиболее востребованными являются устройства энергонезависимой памяти, способные сохранять состояние ячеек при отсутствии питания [2]. Тем не менее, переход к нанометровым размерам элементов микросхем связан с серьезными проблемами, обусловленными квантовыми эффектами.

Типы памяти, основанные на хранении электрического заряда, достигли предела уменьшения размера своих компонентов, потому что полупроводниковые технологии ограничены размерами используемых

транзисторов из-за явных квантово-механических эффектов. Например, для кремния минимальный размер транзисторов составляет порядка 3,4 или 6,6 нм (в зависимости от вида проводимости) [3]. Следовательно, возникает необходимость в разработке альтернативных способов создания энергонезависимых накопителей, обеспечивающих быструю обработку и долгосрочное хранение информации одновременно.

Автор работы [3] указывает еще на одно противоречие, которое необходимо разрешить. Ожидания пользователей относительно характеристик микросхем памяти часто оказываются двойственными. Так, потребители требуют высокую скорость обработки и плотность информации, низкий уровень потребления энергии во время операций чтения-записи, минимальные затрат на производство, а также наличие особых свойств, например, устойчивость к радиации и другим внешним факторам.

Сейчас основными типами памяти, интенсивно изучаемыми в наномасштабе и применяющимися в коммерции, выступают ферроэлектрическая память (ferroelectric random-access memory – FRAM), магниторезистивная память (magnetoresistive random-access memory – MRAM), память с изменением фазового состояния (phase-change memory – PCM) и резистивная память (resistive random-access memory – RRAM) [4]. Одновременно существуют перспективные, но пока не внедренные в массовое производство виды памяти, включая Ultra-RAM (основанную на квантовом механическом эффекте резонансного туннелирования) и FlexRAM («жидкая» память).

В соответствии с обзором, представленным в [4], классификацию энергонезависимой твердотельной памяти можно произвести по физической величине определяющей структуру хранения информационного бита (состояние логического «нуля» или «единицы»). Для различных типов полупроводниковой памяти такими величинами выступают: электрическая проводимость (MRAM, PCM, RRAM), электрический заряд (Floating-gate Flash, Flash SONOS), вектор поляризации (FRAM). Ещё одним важным признаком для классификации памяти служит характер физического или физико-химического процесса, вызывающего изменение состояния ячейки при операции записи. К таким процессам относятся, например, туннельный ток (Floating-gate Flash, Flash SONOS), электрическое поле (MRAM, RRAM), магнитное поле (MRAM) и температура (PCM).

Кроме того, различные виды памяти можно разделить по конструкции самой ячейки, включающей элемент хранения данных и один или несколько управляющих транзисторов. Например, ячейка типа 1T-1C состоит из одного транзистора и одного ёмкостного компонента хранения,

а ячейка 1T-1R включает один транзистор и один резистивный элемент. Если же элемент хранения и управляющий транзистор расположены топологически совместно, такая конструкция обозначается как 1T.

Более подробно устройство и принцип действия РСМ энергонезависимой твердотельной памяти были рассмотрены нами в [5-7]. В настоящей статье рассмотрим только основы работы ферроэлектрической (сегнетоэлектрической) памяти.

2. Ферроэлектрическая (сегнетоэлектрическая) память

Ферроэлектрическая память – это интегральное энергонезависимое запоминающее устройство, принцип действия которого основан на поляризации в ту или иную сторону сегнетоэлектрического слоя в структуре плоского конденсатора, а также на длительном хранении и последующем распознавании направления вектора поляризации [8].

Концепция применения сегнетоэлектрических материалов для создания запоминающих устройств возникла еще в середине прошлого столетия – в 50-е годы XX века [9]. Прототипы FRAM были созданы фирмой Ramtron International в 1984 году, а массовое производство коммерческих образцов было запущено японской корпорацией Fujitsu в 1999 году [10]. Ферроэлектрическая память получили широкое распространение в промышленной электронике во всем мире, демонстрируя стремительный рост объемов выпуска. Так, одним из ключевых направлений ее применения стала автомобильная электроника, где она используется в различных мониторинговых и охранных системах.

Разработка конструкций ячеек памяти FRAM представлена двумя вариантами: 1T и 1T-1C. В первой конфигурации элемент хранения располагается аналогично устройству Flash-памяти, непосредственно в зоне затвора транзистора выборки [3]. Второй подход схож со структурой динамического оперативного запоминающего устройства (ДОЗУ), где ячейка памяти состоит из одного транзистора выборки и одного конденсатора, однако, вместо обычного диэлектрика здесь применяются сегнетоэлектрический материал (например, $PbZr_{1-x}Ti_xO_3$, и $SrBi_2Ta_2O_3$ или цирконат-титаната свинца PZT [10, 11]), что обеспечивает возможность длительного сохранения данных даже при отсутствии внешнего питания.

Сегодня наиболее востребованными являются ячейки памяти FRAM типа 1T-1C, 2T-2C, 6T-4C, а также особая конфигурация chain-FRAM, представляющая собой цепь параллельных соединений транзисторов и конденсаторов [12]. Типичная конфигурация ячейки памяти FRAM формата 1T-1C показана на рис. 1.

В режиме записи на обкладки конденсатора подается постоянное напряжение, при этом электрическое поле проникает сквозь

сегнетоэлектрический слой, вызывая его поляризацию (время записи примерно 1 нс). После прекращения подачи напряжения электрические диполи материала остаются ориентированными в прежнем направлении достаточно продолжительное время, фиксируя состояние логических «0» или «1». Направление ориентации диполей определяется знаком приложенного напряжения: положительное означает запись единицы, отрицательное – нуля. Во время считывания на все опрашиваемые ячейки одновременно подают напряжение полярности соответствующей «0» с амплитудой порядка амплитуды записи. Ячейка с нулём остаётся пассивной, тогда как единичный бит вызывает изменение направления поляризации, порождая кратковременный импульс ёмкостного тока. Из-за такого механизма после каждой процедуры чтения потерянная информация должна восстанавливаться автоматически путём перезаписи.

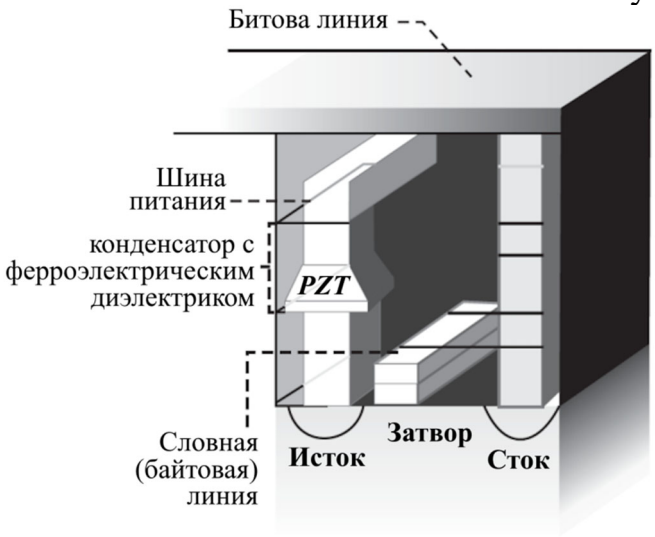

Рис. 1. Элемент хранения FRAM [13].

Одной из ключевых проблем традиционной памяти FRAM типа 1T-1C является явление деструктивного считывания, преодолимое путем совершенствования структуры транзисторов или разработки инновационных методов чтения информации [14]. Альтернативным решением становится использование акустического метода опроса ячеек посредством волн, генерируемых встроенными в микросхему пьезоэлектрического генератора [3].

В обзоре [3] предлагается один из вариантов реализации FRAM-памяти с недеструктивным считыванием, основанный на двухслойной сегнетоэлектрической конструкции с одним внутренним и двумя внешними электродами. Нижний слой изначально фиксируется в заданной поляризационной ориентации во время производства и сохраняет свое положение на весь срок эксплуатации устройства. Верхний слой способен изменять вектор своей поляризации при записи значений «1» или «0». Это приводит к формированию однонаправленной или разнонаправленной

поляризации. Такие различия позволяют различать реакцию многослойных структур на проходящую акустическую волну, распространяющуюся вдоль поверхности подложки или внутри специального канала, предусмотренного в кристалле. Необходимо отметить, что данная акустическая волна должна иметь строго продольную или поперечную направленность.

Кроме того предлагаются следующие методы считывания [15]: электрооптический, фотоэлектрический, пироэлектрический. Электрооптический способ считывания основывается на ряде фотосегнетоэлектрических явлений, позволяющих определить наличие и ориентацию поляризации в тонкопленочных сегнетоэлектриках. Важнейшим среди них выступает эффект изменения двойного лучепреломления. Тем не менее, выявление указанных изменений требует сложных и дорогостоящих лабораторных установок [16].

Фотоэлектрический метод считывания заключается в следующем. При воздействии интенсивного светового потока на поляризованный сегнетоэлектрик индуцируется фототок, чья полярность зависит от направления внутреннего вектора поляризации. Этот подход потенциально обеспечивает быстрое чтение данных, однако серьезным ограничением служит потребность в мощном источнике освещения и применение схемы с удвоенной плотностью запоминания для каждого процесса считывания [17]. Метод пироэлектрического считывания базируется на уникальных пироэлектрических свойствах сегнетоэлектриков. Применение инфракрасного лазера для нагрева существенно упрощает конструкцию системы памяти, повышает её технологичность и снижает затраты на производство [15].

Кроме того, проблема деструктивного считывания решается путем комбинирования различных материалов и их архитектуры. К примеру, предлагается создать память на основе полевого транзистора, применяя ферроэлектрическую пленку в качестве затвора. Информация из такой структуры считывается благодаря изменению тока между стоком и истоком, регулируемым состоянием сегнетоэлектрической поляризации в области затвора. Подобная схема характеризуется крайне низким уровнем потребления энергии [18]. Еще один существенный недостаток ферроэлектрической памяти состоит в трудностях её масштабирования до атомарных размеров. Так, в работе [3] подчеркивается, что минимальный допустимый размер ячейки хранения на основе цирконата-титаната свинца (PZT) ограничен величиной около 50 нм из-за ухудшения сегнетоэлектрических свойств пленок. Причина состоит в том, что в PZT достаточно большие домены, обусловленные его термодинамическими особенностями. Поэтому в настоящее время активно изучаются новые

материалы, способные заменить традиционные составы. Например, в исследовании [19] показано, что перспективной альтернативой является оксид гафнии HfO_2, обладающий устойчивостью остаточной поляризации даже при толщине пленки 10 нм и химической совместимостью с основными материалами кремниевых интегральных схем.

Отрасль FRAM довольно долго сталкивалась с проблемой достижения технологического минимума в размере сегнетоэлектрических элементов, оставаясь на уроне 180 нм, что объяснялось сложностями интеграции новых материалов в существующие технологии полупроводникового производства [20]. Несмотря на это, ферроэлектрическая память считается многообещающим типом энергонезависимой памяти благодаря следующим преимуществам: высокое быстродействие (порядка нескольких наносекунд); низкий уровень энергопотребления (энергия расходуется преимущественно в режимах записи и чтения); значительно большой информационный запас по сравнению с Flash-накопителями; невысокое рабочее напряжение (2,0-3,6 В); большое количество возможных циклов перезаписи ($\sim 10^{14}$); устойчивость к радиационному и другим видам излучения.

3. Заключение

Таким образом, можно утверждать, что ферроэлектрическая память является одним из наиболее перспективных типов энергонезависимой твердотельной памяти, сочетающим высокое быстродействие, устойчивость к внешним воздействиям и низкое энергопотребление. Несмотря на достижения в области интеграции сегнетоэлектрических материалов в микросхемы, масштабирование этой технологии сталкивается с рядом физических и технологических ограничений, таких как ухудшение свойств тонкоплёночных структур и эффект деструктивного считывания. Решение данных проблем возможно за счёт совершенствования архитектуры ячеек, внедрения новых методов опроса и использования альтернативных материалов. Тем не менее, FRAM сохраняет потенциал для дальнейшего развития и внедрения в передовые области микроэлектроники.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-12-20003, https://rscf.ru/project/23-12-20003/) при паритетной финансовой поддержке Правительства Республики Хакасия.

Библиографический список:

1. **Керниган, Б.** Основы информационных технологий для неспециалистов: что происходит внутри машин / Б. Керниган; перевод с английского Е.В. Жевлаковой. – М.: Эксмо, 2024. – 622 с.
2. Nonvolatile memory technologies with emphasis on Flash. A comprehensive guide to understanding and using

NVM devices / ed by. J.E. Brewer, M. Gill. – New Jersey: A John Wiley & Sons Inc., 2008. – 759 p.
3. **Красников, Г.Я.** Энергонезависимая твердотельная память в современной микроэлектронике / Г.Я. Красников // Нанотехнологии в электронике. – М.: Техносфера, 2015. – С. 461-476.
4. **Романова, И.** Новые виды памяти – разработки и перспективы применения / И. Романова // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2010. – № 2. – С. 26-33.
5. **Гафнер, Ю.Я.** Оценка применимости нанокластеров сплава меди и золота в качестве активного слоя ячеек фазоинверсной памяти / Ю.Я. Гафнер, Д.А. Рыжкова, И.С. Замулин // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2019. – Вып. 11. – С. 443-448. DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.443.
6. **Гафнер, Ю.Я.** Наноструктуры как материал для фазо-инверсной памяти / Ю.Я. Гафнер, С.Л. Гафнер, Л.В. Редель // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2018. – Вып. 10. – С. 210-218. DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.210.
7. **Гафнер, Ю.Я.** Оценка применимости малых наночастиц серебра в качестве ячеек РСМ памяти / Ю.Я. Гафнер, Д.А. Башкова, С.Л. Гафнер и др. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2018. – Вып. 10. – С. 219-225. DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.219.
8. **Takashima, D.** Overview of FeRAMs: Trends and Perspectives / D. Takashima // IEEE 11-th Annual Non-Volatile Memory Technology Symposium, 7-9 November 2011, Shanghai, China. – Shanghai: IEEE Publ., 2011. – P. 36-41. DOI: 10.1109/NVMTS.2011.6137107.
9. **Абдуллаев, Д.А.** Сегнетоэлектрическая память: современное производство и исследования / Д.А. Абдуллаев, Р.А. Милованов, Р.Л. Волков и др. // Российский технологический журнал. – 2020. – Т. 8. – № 5. – С. 44-67. DOI: 10.32362/2500-316X-2020-8-5-44-67.
10. **Шурыгина, В.** Энергонезависимая память. Кто победит в гонке? Часть 2 / В. Шурыгина // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2008. – № 6. – С. 36-47.
11. **Лукичев, В.Ф.** Современная элементная база запоминающих устройств / В.Ф. Лукичев, Ю.Л. Шиколенко // Нано- и микросистемная техника. – 2015. – № 11 (184). – С. 40-49.
12. **Zhang, K.** Embedded memories for nano-scale VLSIs / Zhang R. – New-York: Springer Science & Business Media Inc., 2009. – 279 p. DOI: 10.1007/978-0-387-88497-4.
13. **Зайцев, И.** Сравнение новых технологий энергонезависимой памяти / И. Зайцев // Компоненты и технологии. – 2004. – № 4 (39). – С. 66-70.
14. **Ali, Z.** FeRAM: a paradigm of advanced data storage technology / Z. Ali, S. Paul, S. Mukhopadhyaya et. al. // International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology. – 2023. – V. 11. – I. 12. – P. 1684-1691. DOI: 10.22214/ijraset.2023.57682.
15. **Iuga, A.R.** Ultrafast nondestructive pyroelectric reading of FeRAM memories / A.R. Iuga, I. Lindfors-Vrejoiu, G.A. Boni // Infrared Physics & Technology. – 2021. – No. 116. – Art. no. 103766. – 5 p. DOI: 10.1016/j.infrared.2021.103766.
16. **Mikolajick, T.** FeRAM technology for high density applications / T. Mikolajick, C. Dehm, W. Hartner et. al. // Microelectronics Reliability. – 2001. – V. 47. – I. 7. – P. 947-950. DOI: 10.1016/S0026-2714(01)00049-X.
17. **Ishiwara, H.** Ferroelectric random access memories / H. Ishiwara // Journal of Nanoscience and Nanotechnology. – 2012. – V. 12. – № 10. – P. 7619-7627. DOI: 10.1166/jnn.2012.6651.
18. **Yao, K.**, Enabling distributed intelligence with ferroelectric multifunctionalities / K. Yao, S. Chen, S.C. Lai et.al. // Advance Science. – 2022. – V. 9. – I. 1. – Art. no. 2103842. – 30 p. DOI: 10.1002/advs.202103842.
19. **Mueller, S.** Ten-nanometer ferroelectric Si:HfO_2 films for next-generation FRAM capacitors / S. Mueller, S.R. Summerfelt, J. Muller et al. // Electron Device Letters. – 2012. – V. 33. – I. 9. – P. 1300-1302. DOI: 10.1109/LED.2012.2204856.
20. **Воротилов, К.А.** Сегнетоэлектрические запоминающие устройства / К.А. Воротилов, А.С. Сигов // Физика твердого тела. – 2012. – Т. 54. – Вып. 5. – С. 843-848.

References:

1. Kernighan B.W. *Understanding the digital world: what you need to know about computers, the internet, privacy, and security.* Princeton, Princeton University Press, 2017, 256 p. DOI: 10.2307/j.ctvc775pg.
2. *Nonvolatile memory technologies with emphasis on Flash. A comprehensive guide to understanding and using NVM devices*, ed. by. J.E. Brewer, M. Gill. New Jersey. A John Wiley & Sons Inc., 2008, 759 p.
3. Krasnikov G.Ya. Ehnergonezavisimaya tverdotel'naya pamyat' v sovremennoi mikroehlektronike [Non-volatile solid-state memory in modern microelectronics], *Nanotekhnologii v ehlektronike [Nanotechnology in electronics]*. M., Tekhnosfera, 2015, pp. 461-476. (In Russian).
4. Romanova I. Novye vidy pamyati – razrabotki i perspektivy primeneniya [New types of memory –

developments and application prospects], *Ehlektronika: nauka, tekhnologiya, biznes, [Electronics: Science, Technology, Business]*, 2010, no. 2, pp. 26-33. (In Russian).
5. Gafner Yu.Ya., Ryzhkova D.A., Zamulin I.S. Otsenka primenimosti nanoklasterov splava medi i zolota v kachestve aktivnogo sloya yacheek fazoinversnoi pamyati [Evaluation of the applicability of copper-gold alloy nanoclusters as an active layer of phase-inversion memory cells], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2019, issue 11, pp. 443-448. DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.443. (In Russian).
6. Gafner Yu.Ya., Gafner S.L., Redel L.V. Nanostruktury kak material dlya fazo-inversnoi pamyati [Nanostructures as a material for phase-inversion memory], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2018, issue 10, pp. 210-218. DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.210. (In Russian).
7. Gafner Yu.Ya., Bashkova D.A., Gafner S.L. Otsenka primenimosti malykh nanochastits serebra v kachestve yacheek PCM pamyati [Evaluation of the applicability of small silver nanoparticles as PCM memory cells], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2018, issue 10, pp. 219-225. DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.219. (In Russian).
8. Takashima, D. Overview of FeRAMs: Trends and Perspectives, *IEEE 11-th Annual Non-Volatile Memory Technology Symposium*, 7-9 November 2011, Shanghai, China. Shanghai, IEEE Publ., 2011, pp. 36-41. DOI: 10.1109/NVMTS.2011.6137107.
9. Abdullaev D.A., Milovanov R.A., Volkov R.L. et. al. Segnetoehlektricheskaya pamyat': sovremennoe proizvodstvo i issledovaniya [Ferroelectric memory: state-of-the-art manufacturing and research], *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal [Russian Technological Journal]*, vol. 8, no. 5, pp. 44-67. DOI: 10.32362/2500-316X-2020-8-5-44-67. (In Russian).
10. Shurygina V. Ehnergonezavisimaya pamyat'. Kto pobedit v gonke? Chast' 2 [Non-volatile memory. Who will win the race? Part 2], *Ehlektronika: nauka, tekhnologiya, biznes, [Electronics: Science, Technology, Business]*, 2008, no. 6, pp. 36-47. (In Russian).
11. Lukichev V.F., Shikolenko Yu.L. Sovremennaya ehlementnaya baza zapominayushchikh ustroistv [Modern element base of storage devices], *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika [Nano- and microsystems technology]*, 2015, no. 11 (184), pp. 40-49. (In Russian).
12. Zhang, K. *Embedded memories for nano-scale* VLSIs. NewYork, Springer Science & Business Media Inc., 2009, 279 p. DOI: 10.1007/978-0-387-88497-4.
13. Zaitsev I. Sravnenie novykh tekhnologii ehnergonezavisimoi pamyati [Comparison of new non-volatile memory technologies], *Komponenty i tekhnologii [Components and technologies]*, 2004, no. 4 (39), pp. 66-70. (In Russian).
14. Ali Z., Paul S., Mukhopadhyaya S. et. al. FeRAM: a paradigm of advanced data storage technology, *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*,2023, vol. 11, issue 12, pp. 1684-1691. DOI: 10.22214/ijraset.2023.57682.
15. Iuga A.R., Lindfors-Vrejoiu I., Boni G.A. Ultrafast nondestructive pyroelectric reading of FeRAM memories, *Infrared Physics & Technology*, 2021, no. 116, art. no. 103766, 5 p. DOI: 10.1016/j.infrared.2021.103766.
16. Mikolajick T., Dehm C., Hartner W.et. al. FeRAM technology for high density applications, *Microelectronics Reliability*, 2001, vol. 47, issue 7, pp. 947-950. DOI: 10.1016/S0026-2714(01)00049-X.
17. Ishiwara, H. Ferroelectric random access memories, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2012, vol. 12, no. 10, pp. 7619-7627. DOI: 10.1166/jnn.2012.6651.
18. Yao K., Chen S., Lai S.C. et.al Enabling distributed intelligence with ferroelectric multifunctionalities, *Advance Science*, 2022, vol. 9, issue 1, art. no. 2103842, 30 p. DOI: 10.1002/advs.202103842.
19. Mueller S., Summerfelt S.R., Muller J. et al. Ten-nanometer ferroelectric Si:HfO_2 films for next-generation FRAM capacitors, *Electron Device Letters*, 2012, vol. 33, issue 9, pp. 1300-1302. DOI: 10.1109/LED.2012.2204856.
20. Vorotilov K.A., Sigov A.S. Ferroelectric memory, *Physics of the Solid State*, 2012, vol. 54, issue 5, pp. 894-899. DOI: 10.1134/S1063783412050460.