

РАЗДЕЛ 1. ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 669.231

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.03.001

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМОЙ ПАМЯТИ: ФЕРРОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И РЕЗИСТИВНЫЕ ЗАПОМИНАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

Дарья Антоновна Рыжкова¹, Арина Александровна Череповская²,
Максим Николаевич Наразин³, Юрий Яковлевич Гафнер⁴

^{1, 2, 3, 4} Хакасский государственный университет им. Н. Ф. Катанова, 655017 Абакан, Россия

¹ bashkova.daria@yandex.ru (ORCID 0000-0002-1986-5165)

² arina.cherepovskaya@mail.ru (ORCID 0009-0000-3482-2051)

³ wapmb@bk.ru

⁴ ygafner@khsu.ru (ORCID 0002-3057-043X)

Аннотация. Существующие в настоящее время ограничения традиционной микроэлектроники в решении множества сложных технических задач являются одной из причин развития нанотехнологий. К числу таких задач можно отнести потребность в улучшении характеристик долговременных запоминающих устройств. Если рассматривать эволюцию систем хранения информации, то особый интерес вызывают электрические, магнитные, оптические и фазово-структурные свойства материалов, применяемых для записи данных. Мы рассмотрим два способа из перечисленных, а именно метод хранения информации с использованием систем, принцип действия которых основан на поляризации сегнетоэлектрического слоя (FRAM) и управлении электрическим сопротивлением рабочего слоя с помощью электрического поля (RRAM). Во FRAM запись данных осуществляется путем приложения электрического поля, которое меняет направление вектора поляризации определяющего состояние бита. Затем информация может многократно считываться без разрушения состояния ячейки, а также восстанавливаться путем обратного переключения поляризационного состояния. Работа RRAM предполагает, что изменяется сопротивление материала, тем самым происходит быстрая запись и считывание информации. Оба метода демонстрируют значительные преимущества перед традиционными видами энергонезависимыми запоминающими устройствами, однако существует необходимость дальнейших исследований, которые позволят снизить потребляемую мощность, повысить надежность и соответствовать требованиям технических задач настоящего времени.

Ключевые слова: энергонезависимая память, ферроэлектрическая память, резистивная память, конструкция ячейки памяти, перспективные материалы.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 25-22-20029, <https://rscf.ru/project/25-22-20029/>) при паритетной финансовой поддержке Правительства Республики Хакасия.

Для цитирования: Рыжкова Д.А., Череповская А.А., Наразин М.Н., Гафнер Ю.Я. Перспективные технологии энергонезависимой памяти: ферроэлектрические и резистивные запоминающие устройства // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2025. Т. 22, № 3. С. 253-261. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.03.001.

Original article

ADVANCED NON-VOLATILE MEMORY TECHNOLOGIES: FERROELECTRIC AND RESISTIVE STORAGE DEVICES**Daria A. Ryzhkova¹, Arina. A. Cherepovskaya², Maxim N. Narazin³, Yuri Ya. Gafner⁴**^{1, 2, 3, 4} Khakass State University, Abakan, 655017, Russia¹ bashkova.daria@yandex.ru (ORCID 0000-0002-1986-5165)² arina.cherepovskaya@mail.ru (ORCID 0009-0000-3482-2051)³ wapmb@bk.ru⁴ ygafner@khsu.ru (ORCID 0002-3057-043X)

Abstract. The current limitations of traditional microelectronics in solving many complex technical problems are one of the reasons for the development of nanotechnology. Such problems include the need to improve the characteristics of long-term memory devices. If we consider the evolution of information storage systems, then electrical, magnetic, optical and phase-structural properties of materials used for data recording are of particular interest. We will consider two of the listed methods, namely, a method of storing information using systems whose operating principle is based on the polarization of the ferroelectric layer (FRAM) and control of the electrical resistance of the working layer using an electric field (RRAM). In FRAM, data is written by applying an electric field that changes the direction of the polarization vector that determines the state of the bit. Then the information can be repeatedly read without destroying the cell state, and also restored by reverse switching of the polarization state. RRAM operation assumes that the resistance of the material changes, thereby quickly writing and reading information. Both methods demonstrate significant advantages over traditional types of non-volatile memory devices, but further research is needed to reduce power consumption, improve reliability, and meet the technical challenges of today.

Keywords: non-volatile memory, ferroelectric memory, resistive memory, memory cell design, advanced materials.

Acknowledgements: The study was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation (project No. 25-22-20029, <https://rscf.ru/project/25-22-20029/>) with the equal financial support of the Government of the Republic of Khakassia.

For citation: Ryzhkova D. A., Cherepovskaya A. A., Narazin M. N. & Gafner Yu.Ya. (2025). Advanced non-volatile memory technologies: ferroelectric and resistive storage devices. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 22(3), 253-261. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.03.001.

Введение

В настоящее время одним из популярных направлений использования достижений нанополитики является их применение в электронике, так как развитие технологий хранения данных требует уменьшения размеров и увеличения быстродействия микросхем. Кроме того, развитие алгоритмов искусственного интеллекта также ставит новые проблемы перед исследователями. С одной стороны способность выполнять сложные задачи дает искусственному интеллекту большую область возможностей. А с другой стороны, его использование ограничено физической реализацией чипов, которые все еще привязаны к исторической архитектуре фон Неймана с процессорными блоками и аппаратными средствами памяти разделенными пространственно. Таким образом, существует явная необходимость поиска новых решений,

которые позволят разрешить все противоречия.

Ежегодно в Сан-Франциско проводится Международная конференция по электронным приборам IEDM (*International Electronic Devices Meeting*), на которой традиционно освещаются крупнейшие научные и технологические достижения в области микроэлектроники, нанотехнологий, опто- и биоэлектроники. Несколько секций конференции обычно посвящены технологиям компьютерной памяти, на которых мы остановимся более подробно.

Микросхемы памяти – одни из базовых элементов современной микроэлектроники. В настоящее время высокий спрос наблюдается на энергонезависимую память, особенностью которой является сохранение технологического состояния ячеек при отключенном питании [1]. Однако при смещении размеров элементов микросхем памяти в нанометровую область, современные технологии сталкиваются с боль-

шим количеством серьезных проблем, связанных с квантовыми эффектами.

Традиционные виды памяти, работа которых основана на хранении электрического заряда, в настоящее время подошли к естественному пределу уменьшения размера структурных элементов, так как полупроводниковые технологии ограничены размерами используемых транзисторов из-за квантово-механических эффектов. Например, для кремния минимальный размер транзисторов составляет 3,4 или 6,6 нм (в зависимости от вида проводимости) [2]. Таким образом, необходимы новые подходы к созданию энергонезависимой памяти, в которой будут сочетаться оперативное и долговременное хранение данных.

Кроме того, авторы работы [2] отмечают, что требования потребителей, выдвигаемые к микросхемам энергонезависимой памяти, могут быть достаточно противоречивыми. Например, высокое быстродействие и информационная плотность, малое энергопотребление в режимах записи и считывания информации и при этом низкая стоимость, а также ряд специфических запросов, таких как стойкость к радиационным воздействиям и др.

В настоящее время одними из основных видов памяти, которые детально исследуются в нанометровом диапазоне и находят коммерческое применение, являются: сегнетоэлектрическая память (*Ferroelectric Random Access Memory, FRAM*), магниторезистивная память (*Magnetoresistive Random Access Memory, MRAM*), память с изменением фазового состояния (*Phase Charge Memory, PCM*) и резистивная память (*Resistive Random Access Memory, RRAM*) [3]. Помимо этого прорывными, но пока не реализованными для применения в коммерческих целях являются такие виды памяти, как: UltraRAM (в основе лежит квантово-механический эффект резонансного туннелирования) и FlexRAM («жидкая» память).

В соответствии с обзором, представленным в [3], классификацию энергонезависимой твердотельной памяти можно произвести по физическому фактору, определяющему структуру хранения информационного бита (состояние логического «нуля» или «единицы»). Такими факторами во всех видах полупроводниковой памяти являются либо электрическая проводимость (MRAM, PCM, RRAM), либо электрический заряд (Floating-gate Flash, Flash SONOS), либо вектор поляризации (FRAM).

Ещё одним критерием для классификации является вид конечного физического или физико-химического воздействия, которое приводит к изменению информационного состояния элемента хранения в режиме записи. Примерами такого воздействия являются туннельный ток ((Floating-gate Flash, Flash SONOS), электрическое поле (MRAM, RRAM), магнитное поле (MRAM) и температура (PCM).

Также все виды памяти можно классифицировать по структуре ячейки памяти, которая включает в себя элемент хранения и один или несколько транзисторов доступа. Ячейки типа 1Т-1С или 1Т-1R включают один транзистор и один элемент хранения емкостного или резистивного типа соответственно. Также элемент хранения и транзистор могут быть топологически совмещены, и тогда тип ячейки имеет обозначение 1Т.

Более подробно устройство и принцип действия PCM энергонезависимой твердотельной памяти были рассмотрены нами в [4,5]. В настоящей статье рассмотрим ферроэлектрическую (сегнетоэлектрическую) и резистивную память.

Ферроэлектрическая (сегнетоэлектрическая) память (FRAM)

FRAM – 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 [6].

Идея использования сегнетоэлектриков в качестве запоминающих устройств была впервые представлена в 50-х гг. XX века [7]. Первые образцы FRAM были созданы компанией Ramtron International еще в 1984 году, а первые коммерческие образцы выпущены компанией Fujitsu в 1999-м [8]. Ферроэлектрическая память приобрела широкую известность в мировой промышленной электронике, и объем ее производства продолжает нарастать быстрыми темпами. Например, ферроэлектрическую память применяют в автомобильной электронике – в системах мониторинга, безопасности и в автомобильных комплексах.

Разрабатываются два варианта конструкции FRAM – ячейки памяти: 1Т и 1Т-1С. В первом случае по аналогии с Flash элемент хране-

ния расположен в области затвора транзистора выборки [2]. Во втором – подобно динамической оперативной памяти (ДОЗУ) FRAM – память выполняется на основе одного транзистора выборки и одного конденсатора, но вместо диэлектрического слоя конденсатора используется слой сегнетоэлектрика (согласно [9] его роль играют такие соединения, как $PbZr_{1-x}Ti_xO_3$ и $SrBi_2Ta_2O_3$ или цирконат-титанат свинца PZT [8]), что и приводит к энергонезависимости.

Наибольшее распространение в настоящее время получили ячейки 1Т-1С типа, а также 2Т-2С, 6Т-4С и так называемая chain-FRAM ячейка, которая представляет собой цепочку параллельно соединенных транзисторов и конденсаторов [10].

Типовая структура ячейка FRAM типа 1Т-1С представлена на рисунке 1.

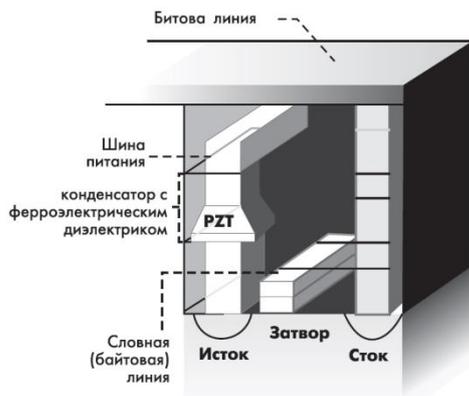


Рис. 1. Элемент хранения FRAM [11].

Fig.1. The FRAM storage element [11].

При подаче в режиме записи на обкладку конденсатора постоянного напряжения электрическое поле проникает через сегнетоэлектрический слой, поляризуя сегнетоэлектрик (процесс протекает порядка 1 нс). Электрические диполи, присутствующие в материале сегнетоэлектрика, и после снятия напряжения сохраняют свою полярность длительное время. Направление вектора остаточной поляризации определяет записанный в память разряд – «0» или «1» и зависит от полярности приложенного напряжения (положительное, записывается «1», отрицательное – «0»). В режиме считывания на все опрашиваемые ячейки подают напряжение полярности, соответствующей «0», с амплитудой порядка амплитуды записи. Если в элементе хранения был записан «0», то сигнал на выход не поступает. В случае обращения к ячейке

с записанной «1», происходит переполяризация и появляется импульс в емкостной структуре тока. При этом хранимая в ячейке информация пропадает и ее необходимо восстанавливать после каждого цикла считывания. Поэтому после идентификации данных автоматически включается механизм регенерации.

Деструктивное считывание – одна из главных проблем классической FRAM – памяти 1Т-1С конфигурации, которая решается либо в рамках 1Т-структуры FRAM, либо на пути поиска новых принципов опроса ячеек в цикле считывания информации. В качестве таких новых принципов предлагается проводить опрос элементов хранения не с помощью электрических цепей и электрических сигналов, а с помощью акустической волны, создаваемой встроенным в чип пьезоэлектрическим генератором [2,12].

Один из вариантов FRAM с неdestructивным считыванием рассмотрен в обзоре [2]. Элемент хранения здесь представляет собой двухслойную сегнетоэлектрическую структуру с внутренним и двумя внешними электродами. Нижний слой поляризован на стадии изготовления микросхемы и направление этой поляризации не изменяется на всем протяжении службы микросхемы. Направление же поляризации верхнего слоя изменяется в режиме записи «1» или «0». В итоге двухслойные элементы оказываются поляризованы либо однонаправленно, либо разнонаправленно. Можно показать, что такие структуры будут по-разному реагировать на акустическую волну, пробегающую по подложке или встроенному в нее акустическому каналу. Важно, чтобы акустическая волна была исключительно продольной или исключительно поперечной [12].

Кроме того рассматриваются следующие методы считывания [13]:

1. Электрооптический метод считывания. Существует набор фотосегнетоэлектрических эффектов, которые могут предоставить полезную информацию о наличии и направлении поляризации в тонких сегнетоэлектрических пленках. Одним из наиболее значимых эффектов является изменение двупреломления. Однако для обнаружения изменений двупреломления необходима сложная экспериментальная установка.

2. Фотоэлектрическое считывание. При освещении полярного сегнетоэлектрика светом высокой интенсивности, производится фотоэлектрический ток, знак которого определяется

направлением поляризации. Данный метод может обеспечить высокую скорость считывания, но основным препятствием является высокая мощность источника света и необходимость двойных битов памяти для каждого считывания.

3. Пироэлектрическое считывание. Основой являются пироэлектрические свойства сегнетоэлектриков. Использование ИК-лазера для нагрева радикально упрощает архитектуру всей памяти, улучшает масштабируемость и стоимость изготовления.

Также проблему деструктивного считывания предлагается решить при помощи структурных комбинаций. Например, построить память на полевом транзисторе, используя ферроэлектрическую пленку в качестве затвора, информацию с которой можно считывать с помощью тока исток-сток, контролируемого сегнетоэлектрической поляризацией в затворе. Такая комбинация позволяет достичь чрезвычайно низкого энергопотребления [14].

Еще одним недостатком ферроэлектрической памяти является плохая масштабируемость до атомарных размеров. Например, в статье [2] было отмечено, что характерный размер элемента хранения на основе цирконат-титаната свинца (PZT) не может быть меньше 50 нм из-за ухудшения сегнетоэлектрических свойств пленок PZT. Это обусловлено достаточно большими доменами в PZT, размеры которых контролируются термодинамикой для этого материала.

Поэтому сейчас ведутся активные исследования в области материаловедения для изменения этой ситуации. Так в работе [15] экспериментально установлено, что перспективным является замена цирконат-титанат свинца на оксиды переходных металлов, например HfO_2 , пленка которого не теряет остаточной поляризации вплоть до толщин 10 нм и к тому же не проявляет химической активности по отношению к основным материалам кремниевой микроэлектроники.

На рынке FRAM наблюдался достаточно длительный период, в течение которого отрасль не могла преодолеть барьер 180 нм для минимального размера сегнетоэлектрического элемента, что связано с интеграцией в полупроводниковые технологии новых материалов [16].

Тем не менее, FRAM относится к перспективным видам энергонезависимой памяти, поскольку обладает высоким быстродействием (несколько наносекунд), низким энергопотреблением (мощность потребляется лишь в режимах записи и считывания), существенно большим в сравнении с Flash информационным окном (порядка 20 Дб), малым рабочим напряжением (2,0-3,6 В), значительным ($\sim 10^{14}$) ресур-

сом циклов перезаписи, а также стойкостью к радиации и другим проникающим излучениям.

Резистивная память (Resistive Random Access Memory, RRAM)

Технология RRAM (или технология мемристоров) связана с управлением электрическим сопротивлением рабочего слоя с помощью электрического поля [2]. Эта технология имеет некоторые общие черты с фазоинверсной памятью. Теоретически технология мемристора была разработана в 1971 году профессором Леоном Чуа (Leon Chua) из университета Калифорнии. Основы своей идеи Леон Чуа (Leon Chua) сформулировал в работе [17], но данная теория долгое время не находила своего практического осуществления. В 2008 году, благодаря достижениям нанотехнологий, ученые из исследовательской лаборатории фирмы Hewlett-Packard во главе с Р.С. Уильямсом (R.S. Williams) сообщили о создании первого рабочего образца основанного на идее мемристора. Результаты исследований были изложены в статье [18]. Мемристор, разработанный группой Уильямса, представляет собой два слоя диоксида титана толщиной 5 нм, размещенных между металлическими платиновыми электродами [18]. Один из слоев диоксида титана слегка обеднен кислородом и обладает меньшим сопротивлением.

Под действием приложенного напряжения происходит обмен импульсами между электронами и кислородными дырками. Эта движущая сила приводит к дрейфу кислородной вакансии в атомноразмерном масштабе и смещению границы между двумя слоями. При протекании тока в одном направлении, электрическое сопротивление мемристора увеличивается, в обратном направлении – сопротивление уменьшается. Механизм вакансионного переключения проводимости показан на рисунке 2.

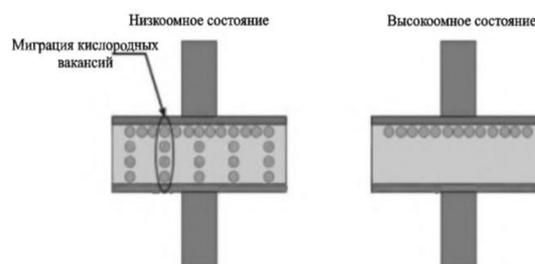


Рис. 2. Иллюстрация механизма вакансионного переключения проводимости [2].

Fig. 2. Illustration of the mechanism of vacancy switching of conductivity [2].

Если к мемристору приложено переменное синусоидальное напряжение определенной частоты, то проявляется его особенное свойство – наличие гистерезиса вольтамперной характеристики. Таким образом, в зависимости от величины проходящего тока мемристор может переходить из состояния с высокой проводимостью в состояние с низкой и наоборот. Данное свойство называется мемристивностью и указывает на способность мемристора запоминать свое состояние после отключения напряжения [18], что позволяет его использовать в качестве ячейки памяти RRAM типа 1T-1R.

Существует две основных структуры, которые используются для создания 3D-массива RRAM: горизонтальная структура H-RRAM и вертикальная структура V-RRAM (рис. 3).

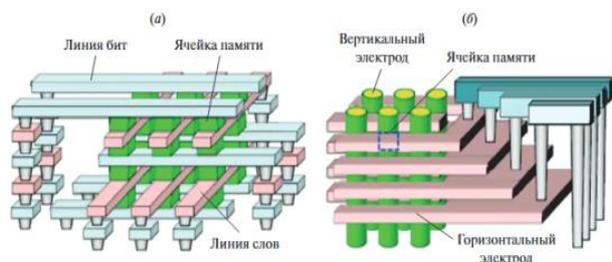


Рис. 3. (а) H-ReRAM и (б) V-ReRAM [19].

Fig. 3. (a) H-ReRAM and (b) V-ReRAM [19].

HRRAM состоит из многослойной планарной двумерной RRAM, наложенной в процессе изготовления, как показано на рис. 3 (а). VRRAM изготавливается путем поворота обычной горизонтальной структуры на 90° и многократного ее расширения в горизонтальном направлении, как показано на рис. 4(б). Ячейки памяти располагаются на каждом пересечении вертикальных и горизонтальных электродов.

У каждой из рассмотренных структур существуют как преимущества, так и недостатки. H-RRAM позволяет вставлять селекторы, например, диоды, которые способствуют уменьшению токов утечки без ущерба для горизонтальной масштабируемости. С другой стороны, стоимость изготовления высока из-за того, что один и тот же процесс повторяется столько раз, сколько слоев требуется создать. Тогда как технология создания структуры V-RRAM позволяет формировать нужное количество слоев в одном процессе, но при этом существуют определенные сложности в интегра-

ции селекторов [19].

По сравнению с современными типами памяти запоминающие устройства на основе мемристоров являются энергонезависимыми, имеют высокое быстродействие, ресурс циклов перезаписи составляет 10^9 , обладают хорошей масштабируемостью и перспективой формирования многослойных структур.

Основные проблемы, затрудняющие сегодня практическое использование резистивной памяти, заключаются в поиске материалов и разработке технологии изготовления ячеек RRAM нанометровых размеров (менее 30-50 нм), которая обеспечивала бы стабильность и воспроизводимость их параметров при требуемом числе циклов перезаписи порядка 10^{14} [20].

В настоящее время в качестве активного слоя мемристора чаще всего используются оксиды таких химических элементов, как: титан, кремний, тантал, гафний. В 2012 г. разработчики Межуниверситетского центра микроэлектроники IMEC, представили рекордно маленькую для того времени микросхему резистивной оперативной памяти. Размер ячейки памяти RRAM, изготовленной на основе Hf/HfO_2 -резистивного элемента, не превышал 10×10 нм, ресурс ячейки превосходил 10^9 циклов, время переключения состояния проводимости элемента памяти при низких значениях напряжения лежало в наносекундном диапазоне [21].

Постепенно различными группами ученых проводились исследования по поиску материалов и созданию ячеек памяти меньшего размера и в 2023 году израильская компания Weebit сообщила о выпуске демонстрационного чипа рекордно малого размера, созданного по техпроцессу 22 нм. Он включал в себя массив RRAM объемом 8 Мб, управляющую логику, декодеры, элементы ввода-вывода и код исправления ошибок. Основными компаниями, которые выпускают как демонстрационные, так и коммерческие устройства, в настоящее время являются Fujitsu, Panasonic, Adesto, Crossbar Inc, Weebitnano, TSMC, Intel.

К недостаткам памяти RRAM-типа относится большой разброс значений порогового напряжения, токов записи/считывания и других критических параметров. Причины такого разброса специалисты связывают с изменением ширины туннелируемых барьеров и генерацией ловушек у электрода [21]. Следующий ряд проблем связанный с масштабированием ячейки памяти обозначен в работе [22]. Во-первых, при

уменьшении технологии от 22 до 5 нм возрастает паразитное сопротивление числовой и рядной шины с менее чем 10 Ом до почти 100 тыс. Ом из-за того, что ширина и толщина этих шин уменьшились. Во-вторых, возникает разброс в сопротивлении между ближайшими ячейками в матрице и дальними связями в этой же матрице. При этом значения этих разбросов могут составлять до четырех порядков, что приводит к ограничению размеров субматриц, и, следовательно, к ухудшению параметров потенциальной экономии площади. В-третьих, по мере того, как токопроводящие дорожки масштабируются с целью обеспечения большей плотности расположения элементов памяти, нити, обеспечивающие проводимость в ячейках, не масштабируются. Это означает, что значения тока в импульсах установления/сброса не изменяются при масштабировании ячеек памяти.

Таким образом, с одной стороны, RRAM является перспективной технологией за счет высокого быстродействия, значительного ресурса циклов перезаписи, возможности масштабирования ячеек и использования КМОП-совместимых материалов. С другой стороны, эта технология обладает рядом недостатков, которые необходимо преодолеть для ее широкого использования в качестве перспективного решения в области памяти.

Заключение

Таким образом, можно утверждать, что перспективные схемы, способные в среднесрочной перспективе заменить существующие типы памяти, существуют. Однако не один из разработанных сегодня подходов не лишен недостатков. Поэтому в настоящее время значительные усилия ученых и исследователей направлены на улучшение характеристик ячеек памяти, в первую очередь за счет выбора оптимальной геометрии ячейки и использования новых материалов.

Рассмотренные нами виды энергонезависимой памяти обладают рядом привлекательных свойств. К ним относятся высокое быстродействие, низкое энергопотребление в режимах записи и считывания информации, высокая информационная плотность. Наиболее важной характеристикой любого запоминающего устройства является отношение стоимости к объему памяти. Данный параметр в первую очередь

определяется плотностью записи информации, т.е. размером ячейки памяти и количеством бит информации, записанных в одной ячейке [23]. Нарастивание плотности записи информации и снижение стоимости возможны благодаря постоянному уменьшению размеров элементов. Однако масштабирование сталкивается с множеством фундаментальных и специфических проблем, связанных, в первую очередь, с квантовыми явлениями. Поэтому смещение размеров элементов микросхем памяти в нанометровую область делает все более трудной задачу сохранения эффективности устройств памяти.

Список литературы

1. Brewer J.E., Gill M. Nonvolatile memory technologies with emphasis on Flash. A comprehensive guide to understanding and using NVM devices. New Jersey: A John Wiley & Sons Inc., 2008. 759 p.
2. Красников Г.Я. Энергонезависимая твердотельная память в современной микроэлектронике // Нанотехнологии в электронике. М.: Техносфера, 2015. С. 461-476.
3. Романова И. Новые виды памяти – разработки и перспективы применения // Электроника: наука, технология, бизнес. 2010. №2. С. 26-33.
4. Рыжкова Д.А., Гафнер С.Л., Гафнер Ю.Я. Использование эвтектических эффектов при возможном создании ячеек фазоизменяемой памяти на основе нанокластеров Ag-Cu. // Физика металлов и металловедение. – 2023. – Т. 124. – № 10. – С.988-996.
5. Ю.Я. Гафнер, С.Л. Гафнер, Л.В. Редель Использование наноструктур в качестве ячеек РСМ памяти. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2018. – Т.15. – №.2. – С. 265-272.
6. Takashima D. Overview of FeRAMs: Trends and Perspectives // IEEE 11-th Annual Non-Volatile Memory Technology Symposium. 2011. P. 36-41.
7. 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 исследование. // Российский технологический журнал. 2020. №8(5). С. 44-67.
8. Шурыгина В. Энергонезависимая память. Кто победит в гонке? Ч.2 // Электроника: наука, технология, бизнес. 2008. № 6. С. 36-47.
9. Лукичев В.Ф., Шиколенко Ю.Л. Современная элементарная база запоминающих устройств // Нано- и микросистемная техника. 2015. № 11(184). С. 40-49.

10. Zhang K. Embedded memories for nano-scale VLSIs. N. Y.: Springer Science & Business Media Inc., 2009. 279 p.

11. Зайцев И. Сравнение новых технологий энергонезависимой памяти // Компоненты и технологии. 2004. №4. С. 66-70

12. Константинов В.С., Итальянцев А.Г., Шульга Ю.В. Принципы построения сегнетоэлектрической памяти с акустическим считыванием // Труды 56-й научной конференции МФТИ Всероссийской научной конференции «Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в современном информационном обществе» Всероссийской молодежной научно-инновационной конференции «Физико-математические науки: актуальные проблемы и их решения». М. 2013. С. 38-39.

13. 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

14. Yao K., Chen S., Lai S.C., Yousry Y.M. Enabling Distributed Intelligence with Ferroelectric Multifunctionalities // Adv. Sci. 2022. No. 9. Art. no. 2103842

15. Mueller S. Ten-Nanometer Ferroelectric Films for Next-Generation FRAM Capacitors // Electron Device Letters. 2012. T 33. №. 9, С. 1300-1302.

16. Воротилов К.А., Сигов А.С. Сегнетоэлектрические запоминающие устройства // Физика твердого тела. 2012, Т. 54. В. 5. С. 843-848.

17. Chua L.O. Memristor – The Missing Circuit Element // IEEE Transactions on Circuit Theory. 1971. V. 18. №5. P. 507-519.

18. Strukov D.B., Snider G.S., Stewart D.R., Williams R.S. The missing memristor found // Nature. 2008. V. 453. № 7191. P. 80-83.

19. Исаев А. Г., Пермякова О. О., Рогожин А. Е. Оксидные мемристоры для ReRAM: подходы, характеристики, структуры // Микроэлектроника. 2023. Том 52. № 2. С. 127–151

20. Гудков А., Гогин А., Кик М., Козлов А., Самусь А. Мемристоры – новый тип элементов резистивной памяти для наноэлектроники // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2014. Спецвыпуск. С. 156-162.

21. Гольцова М. Международная конференция IEDM Самые быстрые, самые небольшие, самые необычные микросхемы // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2012. №1 С.108-124.

22. Макушин М.В., Мартынов В.В. Исследование перспектив развития рынков и технологий схем памяти // Зарубежная электронная техника. 2015. №491. С. 8-53.

Богословский Н.А., Цендин К.Д. Физика эффектов переключения памяти на

халькогенидных стеклообразных полупроводниках // ФТИ. 2012. Т 46. С. 577-589.

Информация об авторах

Д.А. Рыжкова – старший преподаватель кафедры математики, физики и информационных технологий ФГБОУ ВО «Хакасский государственный университет им. Н.Ф. Катанова», +79503070860

А.А. Череповская – ассистент кафедры математики, физики и информационных технологий ФГБОУ ВО «Хакасский государственный университет им. Н.Ф. Катанова», +79029964843

М.Н. Наразин – студент магистратуры 1 года обучения направления подготовки «Современные цифровые технологии в образовании» ФГБОУ ВО «Хакасский государственный университет им. Н.Ф. Катанова», +79835878725

Ю.Я. Гафнер – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой математики, физики и информационных технологий ФГБОУ ВО «Хакасский государственный университет им. Н.Ф. Катанова», +79617443175

References

1. Brewer, J.E. & Gill, M. (2008) Nonvolatile memory technologies with emphasis on Flash. A comprehensive guide to understanding and using NVM devices. New Jersey: A John Wiley & Sons Inc. P. 759.

2. Krasnikov, G. Ya. (2015). Energoniezavisimaya tverdotelnaya pamjat' v sovremennoj mikroelektronike. Nanotekhnologii v elektronike, 461-476.

3. Romanova, I. (2010). Novye vidy pamjati – razrabotki i perspektivy primeneniya. Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes, (2), 26-33.

4. Ryzhkova, D. A., Gafner, S. L. & Gafner, Yu. Ya. (2023). Use of eutectic effects in the possible creation of PCM cells on the basis Ag-Cu nanoclusters. Physics of metals and metallography, 124(10), 988-996.

5. Gafner, Yu. Ya., Gafner, S. L. & Redel', L. V. (2018). Use of nanoclusters as the cells of PCM memory. Basic Problems of Material Science, 15(2), 265-272.

6. Takashima, D. (2011). Overview of FeRAMs: trends and perspectives. IEEE 11th Annual

Non-Volatile Memory Technology Symposium, 36-41.

7. Abdullaev, D. A., Milovanov, R. A., Volkov, R. L., Borgardt, N. I., Lantsev, A. N., Vorotilov, K. A., & Sigov, A. S. (2020). Ferroelectric memory: state-of-the-art manufacturing and research. Russian technological journal, 8(5), 44-67.

8. Shurygina, V. (2008). Energoniezavisimaja pamjat'. Kto pobedit v gonke? Ch. 2. Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes, 6, 36-47.

9. Lukichev, V. F., & Shikolenko, Yu. L. (2015). Sovremennaja elementarnaja baza zapominajushchikh ustrojstv. Nano- i mikrosistemnaja tekhnika, 11(184), 40-49.

10. Zhang, K. (2009). Embedded memories for nano-scale VLSIs. New York: Springer Science & Business Media Inc. 279.

11. Zaitsev, I. (2004). Sravnenie novykh tekhnologij energo-niezavisimoj pamjati. Komponenty i tekhnologii, 4, 66-70.

12. Konstantinov, V. S., Ital'jancev, A. G., & Shul'ga, Yu. V. (2013). Printsipy postroenija segnetoelektricheskoy pamjati s akusticheskim schitivaniem. Trudy 56-j nauchnoj konferentsii MFTI Vserossijskoj nauchnoj konferentsii «Aktual'nye problemy fundamental'nyh i prikladnyh nauk v sovremennom informatsionnom obshchestve» Vserossijskoj molodezhnoj nauchno-innovacionnoj konferentsii «Fiziko-matematicheskie nauki: aktual'nye problemy i ih reshenija», 38-39.

13. Iuga, A. R., Lindfors-Vrejoiu, I., & Boni, G. A. (2021). Ultrafast nondestructive pyroelectric reading of FeRAM memories. Infrared Physics & Technology, 116, 103766.

14. Yao, K., Chen, S., Lai, S. C., & Yousry, Y. M. (2022). Enabling distributed intelligence with ferroelectric multifunctionalities. Advanced Science, 9(9), 2103842.

15. Mueller, S. (2012). Ten-nanometer ferroelectric films for next-generation FRAM capacitors. Electron Device Letters, 33(9), 1300-1302.

16. Vorotilov, K. A., & Sigov, A. S. (2012). Ferroelectric memory devices. Physics of Solid State, 54(5), 843-848.

17. Chua, L. O. (1971). Memristor – the missing circuit element. IEEE Transactions on Circuit Theory, 18(5), 507-519.

18. Strukov, D. B., Snider, G. S., Stewart, D. R., & Williams, R. S. (2008). The missing memristor found. Nature, 453(7191), 80-83.

19. Isaev, A. G., Permjakova, O. O. & Rogozhin, A. E. (2023). Oxidnye memristory dlya ReRAM: podhody, harakteristiki, struktury. Microelectronics, 52(2), 127-151.

20. Gudkov, A., Gogin, A., Kick, M., Kozlov, A. & Samus', A. (2014). Memristory – novyj tip elementov rezistivnoj pamjati dlja nanojelektroniki. Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes, Special issue, 156-162.

21. Gol'tcova, M. (2012). Mezhdunarodnaja konferencija IEDM samye bystrye, samye nebol'shie, samye neobychnye mikroschemy. Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes, 1, 108-124.

22. Makushin, M. V., & Martynov, V. V. (2015). Issledovanie perspektiv razvitija rynkov i tekhnologij shem pamjati. Zarubezhnaja jelektronnaja tekhnika, (491), 8-53.

23. Bogoslovskii, N. A., & Tsendin, K. D. (2012). Physics of the switching and memories effects in chalcogenide glassy semiconductors. Physics of Solid State, 46, 577-589.

Information about the authors

D.A. Ryzhkova – Senior Lecturer, Department of Mathematics, Physics and Information Technology, Khakass State University, +79503070860

A.A. Cherepovskaya – Assistant, Department of Mathematics, Physics and Information Technology, Khakass State University, +79029964843

M.N. Narazin – 1st year graduate student of specialty «Modern digital technologies in education», Khakass State University, +79835878725

Yu.Ya. Gafner – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Chief of the Department of Mathematics, Physics and Information Technology, Khakass State University, +79617443175

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 25.06.2025; одобрена после рецензирования 25.08.2025; принята к публикации 01.09.2025.

The article was received by the editorial board on 25 Jun. 2025; approved after reviewing 25 Aug. 2025; accepted for publication 01 Sep. 2025.