

УСТРОЙСТВО ПАМЯТИ. FLASH-ПАМЯТЬ. DRAM. SRAM. SSD. ROM

Пупенко М.М. студент гр. 478103 Дрожжа И.М. студент гр. 478101

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь*

Савилова Ю.И. – канд. техн. наук, доцент

Аннотация. В статье рассматриваются устройства электрической памяти: оперативная память (RAM, включая DRAM и SRAM), Flash-память, твердотельные накопители (SSD) и ROM. Описываются их физические принципы работы, устройство, преимущества и недостатки, а также области применения. Особое внимание уделяется нелетучей памяти (Flash, SSD) как наиболее распространенной в современных устройствах, тогда как ROM упоминается кратко для полноты картины. Работа направлена на анализ ключевых характеристик каждого вида памяти и их значения в вычислительных системах. Материал будет полезен IT-специалистам, стремящимся глубже понять устройство компьютеров и оптимизировать работу программ.

Ключевые слова. Электрическая память, Flash-память, DRAM, SRAM, SSD, ROM, полупроводниковые устройства, хранение данных.

Электрическая память является краеугольным камнем современных вычислительных систем, обеспечивая как временное, так и долговременное хранение данных, а также быстрый доступ к информации для процессоров и других компонентов. Её развитие напрямую связано с прогрессом в области полупроводниковых технологий, где ключевую роль играют такие элементы, как транзисторы и конденсаторы. Эти компоненты определяют не только скорость работы памяти, но и её энергоэффективность, долговечность и способность масштабироваться для удовлетворения растущих потребностей современных устройств — от смартфонов до суперкомпьютеров.

Транзисторы, выступающие в роли переключателей, управляют потоками электрического тока, позволяя записывать и считывать данные в виде двоичных состояний (0 или 1). Конденсаторы, в свою очередь, используются для хранения заряда, представляющего бит информации, что особенно важно в таких типах памяти, как DRAM. Комбинация этих элементов лежит в основе большинства современных технологий памяти, включая летучую RAM (Random Access Memory) и нелетучую Flash-память. Например, в DRAM один транзистор и один конденсатор образуют минимальную ячейку памяти, что позволяет достичь высокой плотности хранения, тогда как в SRAM сложная схема из шести транзисторов обеспечивает стабильность и скорость.

Современные системы используют различные виды памяти в зависимости от их характеристик и задач. Летучая память (volatile), такая как RAM, обеспечивает высокую скорость работы и временное хранение данных, необходимых для выполнения текущих операций процессора. Нелетучая память (non-volatile), к которой относятся Flash, SSD и ROM, предназначена для долговременного хранения информации, включая операционные системы, файлы и прошивки. Понимание различий между этими типами памяти и их физических основ позволяет разработчикам оптимизировать вычислительные системы, улучшая производительность и снижая энергозатраты. Например, замена HDD на SSD в ноутбуках сокращает время загрузки системы с минут до секунд, что демонстрирует практическую значимость выбора подходящего типа памяти.

Физические основы работы памяти: роль транзисторов и конденсаторов

Все полупроводниковые устройства памяти состоят из множества ячеек, каждая из которых способна хранить один или несколько бит данных. Конструкция этих ячеек определяет свойства памяти, такие как скорость доступа, энергопотребление и плотность хранения. Основными строительными блоками ячеек являются транзисторы и конденсаторы, чьи характеристики напрямую влияют на функциональность памяти.

DRAM (Dynamic RAM)

В динамической оперативной памяти (DRAM) каждая ячейка состоит из одного транзистора и одного конденсатора. Конденсатор хранит электрический заряд, представляющий бит данных (заряд — 1, отсутствие заряда — 0), а транзистор управляет доступом к этому заряду. Однако конденсаторы в DRAM имеют склонность к саморазряду из-за утечки тока через диэлектрик, что требует периодического обновления данных (процесс, известный как "рефреш"). Частота рефреша обычно составляет несколько тысяч раз в секунду (например, каждые 64 мс в DDR4), что увеличивает энергопотребление, но позволяет сделать DRAM чрезвычайно компактной и дешёвой в производстве. Современные модули DDR4 или DDR5 DRAM могут содержать миллиарды ячеек на одном чипе, обеспечивая объём памяти до 16–32 ГБ в одном модуле, а в серверных системах — до 128 ГБ. DRAM широко используется как основная оперативная память в компьютерах, смартфонах и игровых консолях благодаря своей высокой плотности и относительно низкой стоимости. Например, в смартфонах она обеспечивает быструю загрузку приложений, а в ПК — многозадачность. На рисунке 1 представлена схема ячейки памяти DRAM.

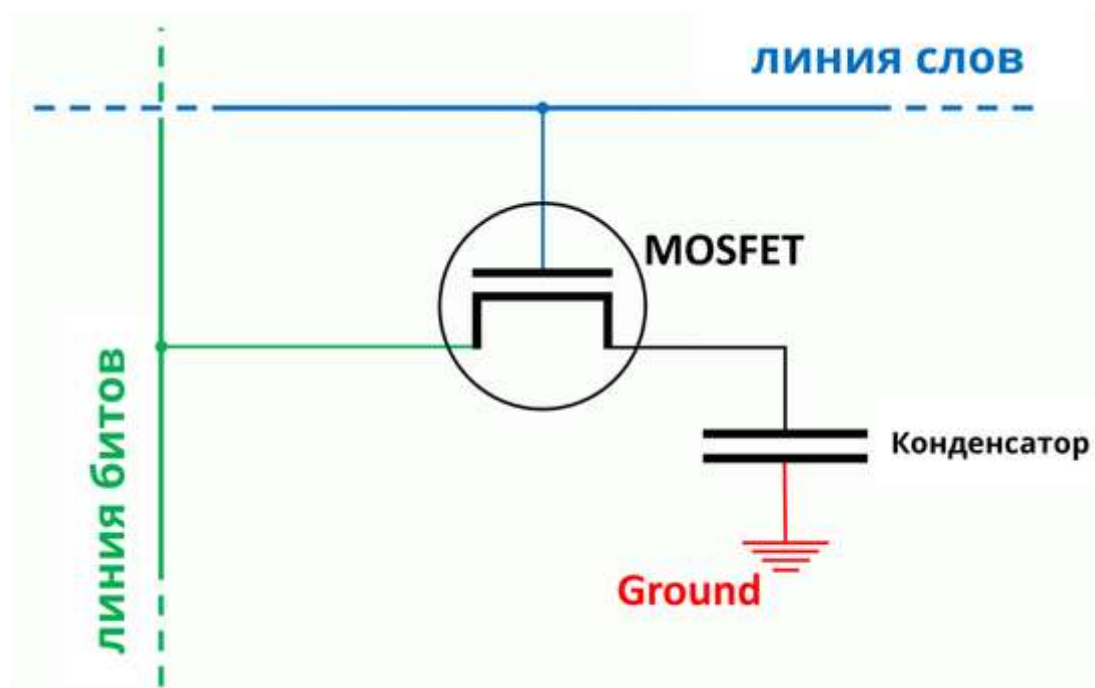


Рисунок 1 – Схема ячейки памяти DRAM

Статическая оперативная память (SRAM) отличается от DRAM тем, что не использует конденсаторы. Вместо этого каждая ячейка SRAM состоит из шести транзисторов, образующих триггерную схему (два инвертора с обратной связью), которая сохраняет состояние бита без необходимости обновления. Это делает SRAM значительно быстрее DRAM — время доступа может составлять всего 0,5–2 наносекунды по сравнению с 10–15 наносекундами у DRAM. Однако из-за большего числа транзисторов SRAM занимает больше места на кристалле и стоит дороже в производстве. Например, кэш-память процессоров Intel Core i9 или AMD Ryzen 9, выполненная на основе SRAM, обычно имеет объем от 256 КБ (L1) до 64 МБ (L3), что достаточно для хранения часто используемых данных и инструкций. SRAM применяется там, где требуется максимальная скорость, например, в кэш-памяти процессоров, регистрах и буферах сетевых устройств. Её высокая надёжность также делает её востребованной в критически важных системах, таких как авионика.

Flash-память представляет собой нелетучий тип памяти, основанный на транзисторах с плавающим затвором. В отличие от DRAM и SRAM, здесь данные сохраняются даже при отключении питания. Плавающий затвор — это изолированный слой в структуре транзистора, куда электроны "закачиваются" с помощью туннелирования Фаулера-Нордхейма или инжекции горячих электронов. Наличие заряда на затворе изменяет пороговое напряжение транзистора, что интерпретируется как 0 или 1. Стирание данных происходит путём обратного туннелирования, что требует высокого напряжения (10–20 В) и занимает больше времени, чем запись. Flash-память делится на два типа: NAND и NOR. NAND Flash обеспечивает высокую плотность хранения и используется в SSD и картах памяти, тогда как NOR Flash, благодаря быстрому произвольному доступу (~50 нс), применяется в прошивках и микроконтроллерах. Ограничение Flash-памяти — конечное число циклов записи (10 000–100 000), что связано с износом изоляционного слоя при многократных операциях. Для минимизации этого эффекта применяются алгоритмы вроде wear leveling, распределяющие нагрузку между ячейками. Схема ячейки Flash-памяти представлена на рисунке 2.

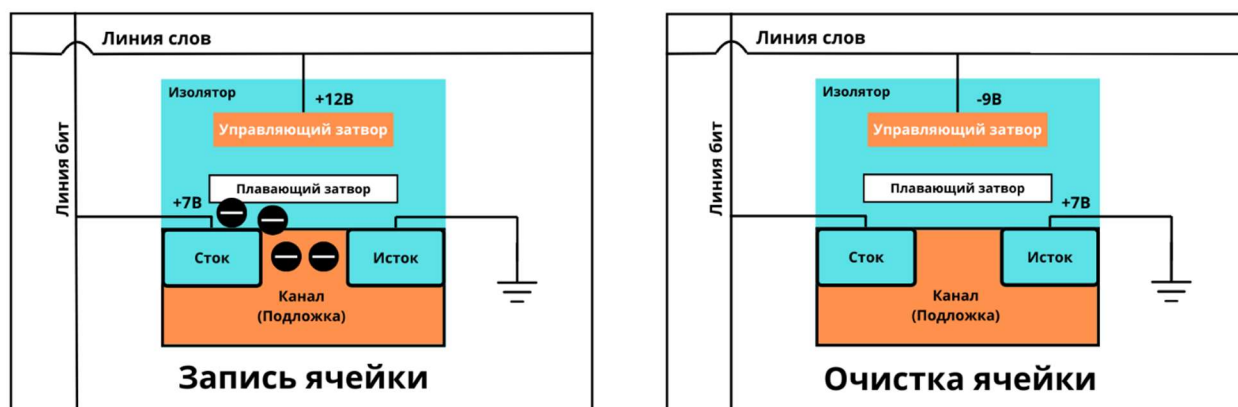


Рисунок 2 – Схема ячейки Flash-памяти

Нелетучая память: принципы работы и использование

Нелетучая память играет ключевую роль в современных устройствах, обеспечивая долговременное хранение данных. Её основные представители — Flash-память, SSD и ROM — различаются по конструкции и применению.

Flash-память

Flash-память стала стандартом для хранения данных благодаря своей компактности и энергонезависимости. NAND Flash, организованная в виде блоков, позволяет хранить большие объёмы данных (до нескольких терабайт в современных SSD), но операции чтения и записи выполняются медленнее, чем в NOR Flash, из-за блочной структуры. Например, запись в NAND Flash может занимать до 1 мс на блок, тогда как NOR Flash обеспечивает доступ к отдельным ячейкам за 50 нс. NOR Flash идеально подходит для хранения кода, например, в BIOS или встроенных системах автомобилей. Для повышения долговечности Flash-памяти используются технологии вроде wear leveling (равномерное распределение износа) и ECC (коды исправления ошибок), которые компенсируют деградацию ячеек при многократных циклах записи. В современных устройствах, таких как смартфоны, Flash-память обеспечивает хранение операционной системы и пользовательских данных.

SSD (Solid State Drive)

Твердотельные накопители (SSD) представляют собой эволюцию Flash-памяти, объединяя чипы NAND Flash с контроллером, который управляет операциями чтения, записи и стирания. Скорость чтения/записи современных SSD может достигать 5000–7000 МБ/с (например, в NVMe SSD на базе PCIe 4.0), что в десятки раз превышает показатели традиционных жёстких дисков (HDD, ~150 МБ/с). Отсутствие движущихся частей делает SSD устойчивыми к механическим повреждениям, а низкое энергопотребление (2–5 Вт против 10–15 Вт у HDD) повышает их эффективность в портативных устройствах. SSD применяются в ноутбуках, серверах, игровых консолях (например, PlayStation 5 использует кастомный SSD для ускорения загрузки игр) и облачных хранилищах, где важны скорость и надёжность. Контроллеры SSD также включают кэш на основе DRAM или SRAM для ускорения операций, что делает их гибридными системами.

ROM (Read-Only Memory)

Постоянная память (ROM) предназначена для хранения неизменяемых данных, таких как прошивки и базовые программы. Масочная ROM программируется на этапе производства и не подлежит изменению. PROM (Programmable ROM) позволяет однократную запись пользователем с помощью специального оборудования. EPROM (Erasable Programmable ROM) может быть стёрта ультрафиолетовым излучением и перепрограммирована, а EEPROM (Electrically Erasable Programmable ROM) поддерживает электрическое стирание и запись, что делает её более гибкой. Например, EEPROM часто используется в микроконтроллерах Arduino для хранения настроек или калибровочных данных. Объём ROM обычно невелик (от нескольких килобайт до мегабайт), но её надёжность и неизменяемость делают её незаменимой для низкоуровневых функций, таких как загрузка системы.

Обобщенные сведения всех основных типов электрической памяти продемонстрированы в таблице 1.

Таблица 1 – Обобщенные сведения всех основных типов электрической памяти.

Тип памяти	Volatility	Принцип работы	Преимущества	Недостатки	Области применения
Flash-память	Non-volatile	Ячейка с плавающим затвором, туннелирование/инжекция горячих электронов	Энергонезависимость, компактность	Ограниченное число циклов записи (10–100 тыс.)	SSD, USB-накопители, прошивки (NOR)
SSD	Non-volatile	Основано на NAND Flash, контроллер и чипы памяти	Высокая скорость, надёжность, низкое энергопотребление	Высокая стоимость по сравнению с HDD	ПК, ноутбуки, серверы
ROM	Non-volatile	Постоянное хранение данных (масочная, PROM, EPROM, EEPROM)	Надёжность, неизменяемость данных	Только чтение, ограниченная гибкость	BIOS, низкоуровневые функции
DRAM	Volatile	Ячейка с конденсатором и транзистором, требует перезагрузки	Низкая стоимость, высокая плотность	Медленнее SRAM, больше энергопотребление	Основная память ПК, смартфоны
SRAM	Volatile	Шесть транзисторов, формирующих устойчивую схему, не требует перезагрузки	Высокая скорость, надёжность	Высокая стоимость, больше места	Кэш-память процессоров

Перспективные технологии памяти

Современные исследования в области памяти направлены на преодоление ограничений традиционных технологий. Новые разработки, такие как MRAM, ReRAM, PCM и 3D NAND, предлагают улучшенные характеристики.

MRAM (Magnetoresistive RAM) использует магнитные туннельные переходы для хранения данных. Скорость доступа (~10 нс) сравнима с SRAM, а энергонезависимость делает её конкурентом Flash. MRAM уже применяется в некоторых промышленных системах, например, в контроллерах Everspin, и рассматривается как замена SRAM в кэш-памяти.

ReRAM (Resistive RAM) основана на изменении сопротивления материала (например, оксидов металлов) под воздействием тока. Её преимущества — низкое энергопотребление (менее 1 мкВт на ячейку) и высокая плотность. ReRAM может стать основой для нейроморфных вычислений благодаря аналоговому характеру сопротивления.

PCM (Phase Change Memory) использует переход материала (например, халькогенидов) между аморфным и кристаллическим состояниями для хранения данных. PCM сочетает скорость DRAM (~50 нс) и энергонезависимость Flash, что делает её перспективной для универсальной памяти. Intel Optane — пример коммерческого применения PCM.

3D NAND увеличивает плотность хранения за счёт вертикального расположения ячеек. Современные чипы 3D NAND (например, от Samsung или Micron) содержат до 176 слоёв, обеспечивая объём до 1 ТБ на одном кристалле, а в будущем — до 10 ТБ.

Эти технологии обещают повысить производительность, снизить энергозатраты и увеличить срок службы памяти, что особенно важно для искусственного интеллекта, больших данных и Интернета вещей (IoT). Например, MRAM и PCM могут сократить задержки в системах реального времени, таких как автономные автомобили.

Заключение

Электрическая память остаётся основой современных вычислительных систем, обеспечивая как быстрый доступ к данным, так и их долговременное хранение. Транзисторы и конденсаторы, лежащие в основе DRAM, SRAM и Flash, определяют ключевые характеристики памяти, такие как скорость, плотность и энергопотребление. Нелетучая память (Flash, SSD, ROM) и летучая память (RAM) дополняют друг друга, создавая гибкую экосистему для различных задач.

Перспективные технологии, такие как MRAM, ReRAM, PCM и 3D NAND, открывают новые горизонты, обещая преодолеть ограничения текущих решений. Например, внедрение PCM может привести к созданию универсальной памяти, объединяющей преимущества RAM и Flash, а развитие 3D NAND уже позволяет производить накопители объёмом в десятки терабайт. Эти инновации будут способствовать созданию более мощных, энергоэффективных и надёжных устройств, что особенно важно в эпоху цифровизации и роста объёмов данных. Дальнейшие исследования и разработки в этой области определят будущее вычислительных технологий, обеспечивая баланс между производительностью, стоимостью и долговечностью.

Список использованных источников:

1. Паттерсон Д.А., Хеннесси Дж.Л. Computer Organization and Design: The Hardware/Software Interface: учебник / Д.А. Паттерсон, Дж.Л. Хеннесси. – 5th ed. – Waltham, MA: Morgan Kaufmann, 2013. – 800 с.: ил. – ISBN 978-0-12-407726-3.
2. Таненбаум Э. Архитектура компьютера: учебник / Э. Таненбаум; пер. с англ. – 6-е изд. – СПб.: Питер, 2013. – 816 с.: ил. – ISBN 978-5-459-01624-6.
3. Взгляд изнутри: Flash-память и RAM / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/articles/135854/>. – Дата обращения: 30.03.2025.
4. SRAM (память) — Википедия / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/SRAM_\(память\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/SRAM_(память)). – Дата обращения: 30.03.2025.
5. DRAM — Википедия / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/DRAM>. – Дата обращения: 30.03.2025.
6. Flash memory — Wikipedia / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Flash_memory. – Дата обращения: 30.03.2025.
7. Read-only memory — Wikipedia / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Read-only_memory. – Дата обращения: 30.03.2025.
8. Memory & Storage Solutions by Samsung / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.samsung.com/semiconductor/global.semi/en/products/memory-storage/>. – Дата обращения: 01.04.2025.