

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

УДК 621.377.622.25

НАЗАРЕВИЧ
Дмитрий Николаевич

ТЕСТИРОВАНИЕ ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМОЙ ФЛЭШ-ПАМЯТИ

АВТОРЕФЕРАТ

магистерской диссертации на соискание степени
магистра технических наук

по специальности 1-41 80 01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные
компоненты, микро-и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах»

Научный руководитель
Черных Александр Георгиевич
кандидат технических наук
доцент кафедры микро- и наноэлек-
троники

Минск 2019

Работа выполнена на кафедре микро- и наноэлектроники учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель:

Черных Александр Георгиевич,
кандидат технических наук, доцент кафедры микро- и наноэлектроники учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Рецензент:

Власова Галина Александровна
кандидат технических наук, доцент кафедры защиты информации учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Защита диссертации состоится «29» января 2018 г.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

ВВЕДЕНИЕ

Носители, использующие флэш-память, составляют самый многочисленный класс портативных носителей цифровой информации и применяются в подавляющем большинстве современных цифровых устройств. Различные типы карт флэш-памяти все чаще используются в цифровых камерах, карманных компьютерах, аудиоплеерах, мобильных телефонах и других портативных электронных системах.

Использование чипов флэш-памяти позволяет создавать миниатюрные и очень легкие энергонезависимые сменные карты памяти, обладающие к тому же низким энергопотреблением. Важным достоинством карт на основе флэш-памяти является также их высочайшая надежность, обусловленная отсутствием движущихся частей, что особенно критично в случае внешних механических воздействий: ударов, вибраций и т.п.

Основные недостатки таких носителей — довольно большая цена самих карт флэш-памяти и высокая удельная стоимость хранимых на них данных, хотя в настоящее время наблюдается тенденция к значительному снижению цен на сменные карты флэш-памяти.

Также, одним из главных применений технологии флэш-памяти и NAND флэш-памяти в частности являются носители SSD. В настоящее время твердотельные накопители используются не только в компактных устройствах: ноутбуках, нетбуках, коммуникаторах и смартфонах, но могут быть использованы и в стационарных компьютерах для повышения производительности.

Накопители, построенные на использовании энергонезависимой памяти NAND появились относительно недавно, но в связи с гораздо более низкой стоимостью (от 1 доллара США за гигабайт) начали уверенное завоевание рынка. До недавнего времени существенно уступали традиционным накопителям — жёстким дискам — в скорости записи, но компенсировали это высокой скоростью поиска информации (начального позиционирования). Сейчас уже выпускаются твердотельные накопители со скоростью чтения и записи, во много раз превосходящие возможности жёстких дисков. Характеризуются относительно небольшими размерами и низким энергопотреблением.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В последние годы флэш-память широко использовалась во встроенных медиаплеерах, фотоаппаратах, портативных дисках и твердотельных дисках (SSD) для традиционного компьютерного хранилища. Флэш память стала первым конкурентом на хранении на магнитных дисках, чтобы получить значительный коммерческий прием, причем расчетные поставки составляют 5×10^{19} байт в 2009 году или больше

объема дискового хранилища, отправленного в 2005 году. Флэш-память отличается от диска многими характеристиками; тем не менее, те, которые имеют особое значение для проектирования систем хранения - это ограниченная выносливость для записи.

В то время как надежность дискового накопителя в основном не зависит от использования, бит в микросхеме флэш-памяти будет терпеть неудачу после ограниченного числа записей, типичных для количества от 10^4 до 10^5 в зависимости от конкретного устройства. При использовании с приложениями, ожидающими дискообразный интерфейс хранения, например, для реализации FAT или другой традиционной файловой системы это приводит к чрезмерному использованию небольшого числа блоков и раннего отказа. Почти все флэш-устройства на рынке - USB-накопители, SD-накопители, твердотельные накопители и многие другие - таким образом реализуют внутренние алгоритмы выравнивания износа, которые сопоставляют адреса блоков приложений с адресами физических блоков и изменяют это сопоставление для равномерного распространения сообщений на устройстве.

Таким образом, выносливость системы хранения на основе флэш-памяти, такой как USB-накопитель или SSD, является функцией как параметров самого чипа, так и деталей алгоритма выравнивания износа (или Flash Translation Layer, FTL). Поскольку измеренные данные о выносливости тщательно охраняются производителями полупроводников, а данные FTL обычно являются собственностью и скрыты в устройстве хранения данных, более широкое сообщество мало понимает характеристики выносливости этих систем. Даже эмпирическое тестирование может иметь ограниченную полезность без понимания того, какие шаблоны доступа представляют собой худшее поведение.

Степень разработанности проблемы. В настоящее время существует множество систем и программного обеспечения для тестирования различных характеристик энергонезависимой флэш-памяти. Существует достаточно большое количество зарубежных работ, рассматривающих те или иные характеристики флэш-накопителей (Д. Агравалл, Х. Чоу, Д. Ли и другие), так же непрерывно проводятся исследования со стороны крупных производителей энергонезависимой флэш-памяти, такие как Samsung, Dell и другие.

Цель и задачи исследования

Целью диссертации является разработка методологии тестирования флэш накопителей с целью определить параметры выносливости устройства.

Для выполнения поставленной цели в работе были сформулированы следующие задачи:

- анализ и подбор программного обеспечения в среде Linux, для проведения тестирования устройств;
- разработать наиболее оптимальную методологию тестирования, и вспомогательные программные средства;
- провести анализ выносливости устройств при многократных операциях записи, чтения и удаления.

Область исследования. Содержание диссертационной работы соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) специальности 1-41 80 01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро-и нано-электроника, приборы на квантовых эффектах».

Теоретическая основа диссертации строится на результатах полученных известными зарубежными работ в области энергонезависимой флэш-памяти и анализ характеристик флэш памяти.

Для получения теоретических и практических результатов исследования применялись пакеты прикладного программного обеспечения МТD.

Информационная база исследования для регрессионного и классификационного анализа сформирована на основе более ранних наработок и исследований в этой области, а так же ресурсов Интернет.

Научная новизна диссертационной работы заключается в разработке методики тестирования выносливости флэш-накопителей.

Теоретическая значимость диссертации заключается в проведенных анализах существующих работ по тестированию энергонезависимой флэш-памяти и рассмотрении значимости полученных результатов.

Практическая значимость диссертации заключается в разработке методологии анализа выносливости флэш-накопителей.

Основные положения, выносимые на защиту

1. В результате разработки методологии и программных средств установлена необходимость тестирования выносливости устройств при многократных операциях записи, чтения, стирания, что позволило определить точное количество полных циклов работы устройства 10^9 , а также разницу между выносливостью на уровне чипа и устройства 10^3 .

Структура и объем работы. Структура диссертационной работы обусловлена целью, задачами и логикой исследования. Работа состоит из введения, трёх глав и заключения, библиографического списка и приложений. Общий объем диссертации – 82 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассмотрено современное состояние проблемы выносливости и срока службы энергонезависимой флэш-памяти, определены основ-

ные направления исследований, а также дается обоснование актуальности темы диссертационной работы.

В общей характеристике работы сформулированы ее цель и задачи, показана связь с научными программами и проектами, даны сведения об объекте исследования и обоснован его выбор, представлены положения, выносимые на защиту, приведены сведения о личном вкладе соискателя, апробации результатов диссертации, а также, структура и объем диссертации.

В первой главе рассматриваются конструктивно-технологические особенности энергонезависимой флэш-памяти. Как известно, естественной для компьютера арифметикой является двоичная логика, когда вся информация кодируется с помощью логических нулей и единиц — информационных битов. С позиции электроники двоичной логике соответствует два дискретных состояния сигнала, одному из которых приписывается значение логического нуля, а второму — логической единицы. Соответственно и память, используемая в цифровой электронике, представляет собой организованное хранилище логических нулей и единиц. В простейшем случае каждая элементарная ячейка памяти хранит один бит информации, то есть либо 0, либо 1. Известные типы памяти различаются между собой лишь конструктивными особенностями элементарной ячейки памяти и принципами организации массива этих ячеек.

Рассмотрим для примера хорошо известную оперативную память с произвольным доступом, именуемую также RAM-памятью (Random Access Memory). По принципам действия RAM-память можно разделить на динамическую и статическую.

В статической памяти ячейки построены на различных вариантах триггеров — на транзисторных схемах с двумя устойчивыми состояниями. После записи бита в такую ячейку она может находиться в одном из этих состояний и сохранять записанный бит как угодно долго: необходимо только наличие питания. Отсюда и название памяти — статическая, то есть пребывающая в неизменном состоянии. Достоинством статической памяти является ее быстроедействие, а недостатками — высокое энергопотребление и низкая удельная плотность данных, поскольку одна триггерная ячейка состоит из нескольких транзисторов и, следовательно, занимает довольно много места на кристалле.

Рассмотрим сначала ситуацию, когда на плавающем затворе нет электронов. При подаче на управляющий затвор положительного напряжения (инициализация ячейки памяти) он будет находиться в открытом состоянии, что соответствует логическому нулю. Если же на плавающем затворе помещен избыточный отрицательный заряд (электроны), то даже при подаче положительного напряжения на управляющий затвор он компенсирует создава-

емое управляющим затвором электрическое поле и не дает образовываться каналу проводимости, то есть транзистор будет находиться в закрытом состоянии.

Простейшим примером энергонезависимой памяти является ROM (Read-Only Memory), известная также как ПЗУ (постоянное запоминающее устройство). В такой памяти массив ячеек представляет собой набор проводников, некоторое из которых остаются целыми, а остальные разрушаются. Данные проводники, выполняющие роль элементарных переключателей, организуются в матрицу путем подсоединения к линиям столбцов и строк. Замокнутому состоянию проводника можно присвоить значение логического нуля, а разомкнутому — логической единицы. Если теперь измерить напряжение между одной из линий столбцов и строк (то есть получить доступ к определенной ячейке памяти), то его высокое значение (разомкнутое состояние проводника) соответствует логической единице, а нулевое (замкнутое состояние проводника) — логическому нулю.

Архитектура V-NAND предусматривает компоновку кристаллов флеш-памяти по вертикали, то есть формирование 3D-структуры. Один чип в текущем виде может иметь до 24 слоёв.

Во второй главе приведен сравнительный анализ характеристик NOR и NAND флэш-памяти. Рассмотренная нами простейшая ячейка флэш-памяти на основе транзистора с плавающим затвором, способная сохранять один бит информации, может использоваться для создания массивов энергонезависимой памяти. Для этого нужно только соответствующим образом объединить в единый массив множество ячеек, то есть создать архитектуру памяти.

Существует несколько типов архитектур (организаций соединений между ячейками) флэш-памяти. Наиболее распространёнными в настоящее время являются микросхемы с организацией NOR и NAND.

Сокращения NOR и NAND обозначают тип логических элементов, используемых в данной единице флэш-памяти. NOR обозначает логический элемент ИЛИ-НЕ (NOT OR), а NAND — И-НЕ (NOT AND).

Так получается, что основным назначением памяти, произведенной по технологии NAND, является хранение данных, а по технологии NOR — хранение исполнимого программного кода и, в меньшей степени, данных (что обусловлено не только доступным малым объемом).

К данным в NOR архитектуре можно обращаться в случайном порядке. Операциями с флеш-памятью могут быть:

Процедура чтения: чтение содержимого флеш-памяти.

Процедура стирания: стирание - это процесс установки всех битов флеш-памяти в 1. Стирание в микросхемах NOR происходит в терминах блоков (называемых областями стирания).

Процедура записи: запись - это процесс изменения во флеш-памяти 1 в 0. После того, как бит стал 0, он не может быть записан, пока блок не будет стёрт, что означает установку всех битов в блоке в 1.

Цель этой главы – объяснить причины, почему выполнение в чтении программы и стирании такие разные, по причине связи, используемой для создания матрицы памяти.

В микросхемах NAND флеш пространство разделено на блоки, которые также разделены на страницы. Каждая страница разделена на обычные данные и дополнительные (out-of-band) данные. Дополнительные данные используются для того, чтобы хранить метаданные, такие как ECC (Error-Correction Code, Код для коррекции ошибок) данные и информацию о неисправном блоке. NAND флеш, как и NOR флеш, имеет три основные операции: чтение, стирание и запись. Однако, в отличие от NOR, к данным которой можно обращаться в произвольном порядке, чтение и запись в NAND флеш выполняются в терминах страниц, тогда как стирание происходит в терминах блоков.

Подключается NOR флэш как обычное устройство SRAM к шинам адреса и данных процессора.

Существуют несколько способов подключения NAND флеш к CPU, зависящих от производителя. Для доступа к NAND выполняется соединение выводов данных и команд к обычно 8 выводам ввода-вывода на микросхеме флеш-памяти.

Выполнение кода в NOR флэш может быть выполнен прямо из NOR, поскольку она подключена непосредственно к шинам адреса и данных. Если код находится в NAND флеш, для запуска он нуждается в копировании в память.

Производительность флеш-памяти NOR характеризуется медленным стиранием, медленной записью и быстрым чтением. Флеш-память NAND характеризуется быстрым стиранием, быстрой записью и быстрым чтением.

Неисправные блоки в микросхемах NOR флеш не ожидаются, поскольку они были разработаны, чтобы хранить системные данные.

NAND микросхемы были разработаны в основном как устройства хранения медиа-данных с более низкой ценой, поэтому стоит ожидать, что они имеют неисправные блоки. Обычно такие микросхемы флеш-памяти поставляются с помеченными неисправными участками. Также сектора NAND флеш больше страдают от проблемы переключения битов, когда бит становится перевернутым во время записи; это обнаруживается алгоритмами кор-

рекции ошибок, называемых ECC/EDC, которые выполняются либо в оборудовании, либо в программном обеспечении.

Применение NOR в основном используются для выполнения кода. На NOR флеш могут находиться загрузчики, потому что код из такой флеш-памяти может быть выполнен напрямую. Такая флеш-память довольно дорогая и она обеспечивает меньшие плотности памяти и имеет относительно более короткую продолжительность жизни (приблизительно 100 000 циклов стирания). NAND используются главным образом в качестве устройств хранения для встраиваемых систем, таких как приставки к телевизорам и MP3-плееры. Если вы планируете использовать плату только с NAND, вам придётся добавить дополнительное ПЗУ загрузки. Они предлагают высокие плотности при более низких ценах и имеют более длительный срок службы (около 10 в 6-ой степени циклов стирания).

Флэш-устройства делятся на части, которые называются блоками. Это необходимо делать для преодоления некоторых физических ограничений и из ценовых соображений. Запись в любом устройстве флэш определенного блока может быть произведена только если этот блок пуст или очищен. В большинстве случаев получается так, что операции записи должна предшествовать операция стирания. И если в NAND-устройствах операция стирания блока может быть произведена сразу, то в NOR-устройствах необходимо предварительно установить все байты блока в ноль.

В **третьей главе** представлены разработка и подбор программного обеспечения и методологии тестирования флэш-памяти. Подсистема MTD (расшифровывается как Memory Technology Devices) обеспечивает уровень абстракции для необработанных флэш-устройств. Это позволяет использовать один и тот же API при работе с различными типами и технологиями флэш-памяти, например NAND, OneNAND, NOR, AG-AND, ECC'd NOR и т.д.

Подсистема MTD не работает с блочными устройствами, такими как MMC, eMMC, SD, CompactFlash и т.д. Эти устройства не являются необработанными флэш накопителями, но имеют внутри слой трансляции Flash, что делает их похожими на блочные устройства. Эти устройства являются предметом блочной подсистемы Linux, а не MTD.

Подсистема MTD имеет следующие интерфейсы.

Символьные устройства MTD - обычно называемые /dev/ mtd0, /dev/mtd1 и т. д. Эти символьные устройства обеспечивают доступ ввода / вывода к необработанной флэш-памяти. Они поддерживают несколько вызовов ioctl для стирания eraseblocks, пометки их как плохих или проверки, если eraseblock блок, получения информации об устройствах MTD .

Интерфейс `sysfs` является относительно новым и предоставляет полную информацию о каждом устройстве MTD в системе. Этот интерфейс легко расширяемый, и разработчикам рекомендуется использовать интерфейс `sysfs` вместо старых интерфейсов `ioctl` или `/proc/mtd`, когда это возможно. Интерфейс `sysfs` для подсистемы `mtd` задокументирован в ядре, и в настоящее время его можно найти в `Documentation/ABI/testing/sysfs-class-mtd`.

Файл файловой системы `proc/mtd/proc` предоставляет общую информацию MTD. Это устаревший интерфейс, а интерфейс `sysfs` предоставляет больше информации.

Подсистема MTD поддерживает обычные накопители NAND с программным и аппаратным ECC, накопители OneNAND, накопители CFI (Common Flash Interface) NOR и другими типами накопителей.

Кроме того, MTD поддерживает устаревшие «слои трансляции» FTL / NFTL, чипы M-Systems DiskOnChip 2000 и Millennium, а также прошивки PCMCIA (драйвер `pcmciamtd`).

Существует большой объем существующих экспериментальных работ по изучению производительности и выносливости флэш-памяти; эти исследования могут быть широко классифицированы как замкнутые или системно-ориентированные. В исследованиях на уровне цепей были изучены влияние напряжения программы / стирания на внутренние электрические характеристики, часто с использованием изготовленных на заказ устройств для устранения логики внутреннего управления и проведения измерений эффектов отдельных программ или шагов стирания. Репрезентативное исследование принадлежит Lee et al. в Samsung, изучая цикличность программирования / стирания и эффекты горячего хранения во множестве технологических процессов. Аналогичные исследования включают исследования, проведенные Park et al. и Yang et al., как и в Samsung. Самая последняя работа в этой области включает в себя отчет о наших результатах и эмпирическую характеристику флэш-памяти, проведенную Grupp et al., анализ производительности основных операций, энергопотребления и надежности.

Бен-Аройо и Толедо представили подробный теоретический анализ границ эффективности износа; однако для реалистичных флэш-устройств (т. е. с размером блока стирания > 1 страница) их результаты показывают существование границы, но не ее значения.

Выносливость программирования / стирания тестировалась путем многократного программирования одной страницы со всеми нулями (по сравнению со стираемым состоянием всех 1 бита), а затем стиранием содержащего блока; этот цикл повторялся до тех пор, пока операция программы или операции стирания не завершится со статусом ошибки. Хотя номинальная выносливость устройства колеблется от 10^4 до 10^5 программ / стирания циклов, мы видим, что количество циклов до отказа было выше почти в каж-

дом случае, часто почти в 100 раз.

Во время испытаний на выносливость индивидуальное время срабатывания измерялось без передачи данных, чтобы уменьшить зависимость от тестовой установки; Увеличенное время стирания и снижение времени программы, по-видимому, непосредственно иллюстрируют ухудшение V_T поскольку возраст клеток становится легче программироваться и сложнее стереть, требуя меньше итераций внутреннего алгоритма записи и больше итераций для стирания.

Дополнительное тестирование. Дальнейшее исследование было проведено, чтобы определить, является ли типично необычайно высокая выносливость тестируемых устройств или вместо этого возникает из-за аномалий в процессе тестирования.

В результате проведения тестирования были получены качественные данные по выносливости Флэш - накопителей. Был проведен анализ и оценка полученных данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В рамках магистерской диссертации был проведен анализ литературных источников. Изучены теоретические основы формирования ячейки флэш-памяти. Подробно рассмотрена структура на двух транзисторах.

2. Детально рассмотрены и изучены особенности архитектуры NOR и NAND , были приведены их достоинства и недостатки. Приведена сравнительная характеристика NOR и NAND архитектур. Рассмотрены особенности проводимых операций на архитектурах NAND и NOR такие как : чтение, запись и стирание информации.

3. Разработана методология тестирования энергонезависимой флэш-памяти и разработано вспомогательное программное обеспечение.

4. Проведен подбор устройств и тестирование с использованием представленной методологии и программного обеспечения.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Барьерные слои в системе медной металлизации интегральных микросхем, 10-я международная научно-техническая конференция молодых ученых и студентов: Материалы конференции. – Минск: БНТУ, 2017.

2. В. И Саратокина. Д.Н. Назакревич Термическая стабильность диффузионных барьерных слоев в системах Cu/TiN_x/Si и Cu/TaN_x/Si . ФКС XXV: Материалы конференции. – Гродно: ГрГУ, 2017 – с 97-99.

3. Локальное осаждение меди при формировании межсоединений ИМС. 53-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов: Материалы конференции. – Минск: БГУИР, 2017