

ЗАПОМИНАЕТ БЫСТРО, ПОМНИТ ДОЛГО

МИКРОСХЕМЫ ПАМЯТИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ADESTO TECHNOLOGIES

М.Шейкин max.shaking@gmail.com

Трудно найти современное электронное цифровое устройство, в котором не применялась бы флеш-память. Этот вид энергонезависимой памяти универсален: она подходит и для долговременного хранения данных, заменяя накопители на магнитных и лазерных дисках, и для использования в качестве загрузочного ПЗУ для микроконтроллеров и ПЛИС, и как хранилище промежуточных результатов вычислений. Однако есть у флеш-памяти несколько существенных недостатков, устранить которые пытаются многие ведущие производители электроники. Среди них – корпорация Adesto Technologies. Разработки компании включают совершенствование флеш-памяти и создание новых перспективных технологий энергонезависимой памяти.

НЕМНОГО ИСТОРИИ

Первые серийные образцы микросхем энергонезависимой памяти, которые допускали стирание и повторное перепрограммирование (EPROM), появились в начале 70-х годов прошлого века. Инженеры "старой школы" помнят ультрафиолетовые лампы – неперенный атрибут разработчиков цифрового электронного оборудования: с их помощью содержимое памяти стиралось, и микросхема была готова для повторного программирования. Процесс был достаточно продолжительным – микросхема облучалась ультрафиолетом от пяти минут до получаса. Иных методов стирания данных не предусматривалось, поэтому микросхемы применялись только как ПЗУ электронных устройств.

Качественным прорывом в электронике стало появление в 1978 году электрически стираемых микросхем памяти (EEPROM). Первые их образцы были медленны, а для программирования требовалось высокое напряжение. Однако спустя еще несколько лет, в 1984 году, доктор Фудзиро Мацуока, работавший в компании Toshiba, вместе с коллегами представил новый вид энергонезависимой памяти, получившей название "флеш" (от англ. flash – вспышка; процесс стирания памяти столь же быстр).

В зависимости от схемы соединения ячеек флеш-память бывает двух типов: NOR и NAND. У NAND-памяти выше плотность и меньше стоимость. Но стирать и записывать информацию в ней можно только блоками, поэтому NAND-память не подходит для применения в качестве энергонезависимого ОЗУ.

Первые коммерческие образцы флеш-памяти типа NOR были выпущены корпорацией Intel в 1988 году. На ее основе создавались съемные носители типа Compact Flash. Но с началом массового производства более дешевой и емкой NAND-памяти именно она стала применяться в многочисленных устройствах долговременного хранения данных, активно вытесняя накопители на жестких магнитных и лазерных дисках. Плотность флеш-памяти возрастает: в 2014 году карты памяти стандарта MicroSD площадью около 1,5 см² и толщиной менее 1 мм вмещают 128 Гбайт информации.

УДОБНО, НО НЕИДЕАЛЬНО

Технологии флеш-памяти совершенствуются, но пока сохраняют свои главные недостатки. Основа современной флеш-памяти – ячейка на базе полевого транзистора с плавающим затвором. В отличие от обычных MOSFET, в таком транзисторе не один, а два затвора: плавающий, который изолирован

от остальных частей транзистора, и управляющий. Плавающий затвор выступает в роли хранилища одного бита информации: сообщенный ему заряд может сохраняться длительное время. Для удобства было принято инверсное хранение данных: наличие заряда означает хранение логического "0", а его отсутствие – "1". Заряд на затворе влияет на пороговые характеристики транзистора, что и регистрируется при чтении информации.

Для записи информации в ячейки необходим достаточно большой ток, который обеспечивают встроенные в микросхему преобразователи напряжения с переключаемыми конденсаторами (зарядовые насосы – charge pump). Конденсаторам нужно время на зарядку, что сильно замедляет запись. Кроме этого, преобразователи потребляют около половины необходимой микросхеме мощности. Высокий ток программирования приводит к деградации ячеек, поэтому их ресурс ограничен – всего 10^5 – 10^6 циклов перезаписи.

Наконец, сам метод хранения информации с помощью зарядов недостаточно надежен: заряды могут стекать, что приводит к повреждению информации. Поэтому при разработке микросхем флеш-памяти уделяют внимание геометрии электродов и свойствам изолирующих материалов. Однако по мере перехода на более тонкие техпроцессы и увеличения плотности памяти проблема утечки заряда становится все более актуальной. Кроме этого, флеш-память крайне чувствительна к ионизирующему излучению, причем первыми выходят из строя не ячейки, а преобразователи напряжения памяти.

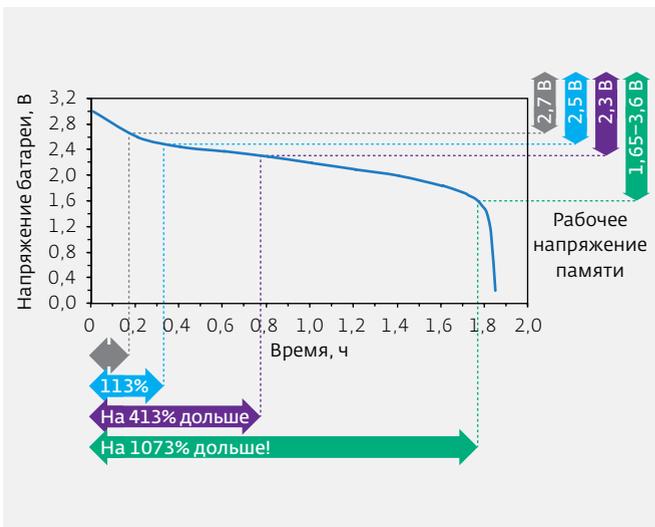
Все эти недостатки затрудняют применение флеш-памяти там, где важны высокая скорость записи и/или малое потребление, и снижают надежность флеш-памяти как долговременного хранилища данных. Решать проблему можно разными способами: развивая технологии производства флеш-памяти

и применяя различные схемотехнические решения, позволяющие обойти некоторые описанные выше ограничения, либо отказаться от флеш-памяти в пользу перспективных разработок. Корпорация Adesto Technologies – один из лидеров на рынке энергонезависимой памяти – при создании новых продуктов применяет оба подхода. В конце 2012 года Adesto приобрела у компании Atmel серии микросхем флеш-памяти AT45xxx и AT25xxx, ставшие основой для совершенствования флеш-технологий, параллельно разрабатывая микросхемы резистивной памяти (CBRAM).

ОДИН БУФЕР ХОРОШО, А ДВА – ЛУЧШЕ

Один из "фирменных" продуктов Adesto, совмещающий традиционную флеш-память и удачные схемотехнические решения – микросхемы серии DataFlash. Эта компактная энергонезависимая память емкостью от 2 до 64 Мбит оснащена последовательным интерфейсом SPI; в 2015 году компания планирует выпускать также память объемом 128 и 256 Кбит. Микросхемы DataFlash новой серии E требуют напряжения питания от 1,65 до 3,6 В. При этом потребляемый ток крайне мал: в режиме "глубокого сна" менее 400 нА. Широкий диапазон входного напряжения позволяет микросхеме работать при снижении заряда батареи, продлевая тем самым срок автономной работы прибора (рис.1).

Но главное отличие памяти DataFlash от прочей доступной на рынке флеш-памяти – два буфера встроенной оперативной памяти, объем каждого равен одной странице флеш-памяти. Это дает возможность записи потоковых данных: когда первый буфер заполняется, его содержимое начинает переписываться на страницу памяти, а данные продолжают поступать во второй буфер. К моменту заполнения второго буфера содержимое первого уже в памяти, и он готов к приему следующей порции данных. В результате время записи информации



- экономия на дополнительном объеме оперативной памяти (отдельных микросхемах или встроенной в микроконтроллер);
- сохранение ресурса флеш-памяти – данные, не требующие хранения при отключении питания, не записываются во флеш;
- дополнительная экономия батарей – запись в ОЗУ требует меньше энергии;
- сокращение времени работы с памятью.

Гибкая двухбуферная архитектура позволяет разработчикам создавать собственные решения на ее основе. Например, в один из буферов можно периодически записывать данные, которые нужно сохранять в случае сбоя питания, и при получении сигнала об отказе источников питания сразу инициировать их запись во флеш-память. Благодаря широкому диапазону напряжения питания микросхема продолжает работать даже тогда, когда более требовательные к питанию компоненты отключатся (рис.2).

Эти возможности выгодно дополняются еще одной особенностью микросхем DataFlash – встроенными алгоритмами записи и стирания данных. При работе с обычной флеш-памятью для изменения содержащейся в ней информации микропроцессор должен самостоятельно выполнить ряд операций:

1. Загрузить в оперативную память страницу данных.
2. Выполнить с ней необходимые действия.

Рис.1. Продолжительное время работы памяти DataFlash при питании от батареи

уменьшается в два-три раза по сравнению с однобуферной архитектурой (см. таблицу).

Роль буферной памяти не ограничивается лишь "перегоном" между внешним интерфейсом и флеш-памятью. Она может использоваться и как обычная память с произвольным доступом для хранения промежуточных результатов работы центрального процессора без записи их во флеш-память. Таким образом, одна микросхема совмещает и ОЗУ, и энергонезависимую память. Это дает сразу несколько важных преимуществ:

Сравнение времени работы с памятью DataFlash и обычной последовательной флеш-памятью (в микросекундах) [2]

Микросхема		DataFlash емкостью 64 Мбит (AT45DB642D)		Serial Flash емкостью 64 Мбит (AT25DF641)	
		заявленное	измеренное	заявленное	измеренное
Стирание по блокам (новая микросхема)		22 800	45 000	23 200	50 000
Запись сектора минимально возможного объема*	со стиранием	8020	17 000	38 560	–
	без стирания	1280	3000	15 360	16 000
Запись данных	1 байт	8020	–	23 500	–
	256 байт	8020	–	24 400	–
	1024 байт	8020	–	26 700	–
Запись блоками	4096 байт	32 100	–	38 560**	–
	8192 байт	33 000**		77 120**	

* Секторы размером 1056 байт в DataFlash и 4096 байт в обычной флеш-памяти.

** С функцией стирания блоков.

3. Дать команду на стирание страницы флеш-памяти.
4. Дождаться окончания очистки.
5. Передать обратно во флеш-память измененную страницу.
6. Дождаться окончания записи.

Столь долгая последовательность действий значительно сокращается при наличии буферного ОЗУ, поскольку данные не передаются в процессор, а изменяются непосредственно в буфере флеш-памяти. Микропроцессор лишь отдает команду на запись измененной страницы. В новой же серии DataFlash E манипуляции с байтами выполняются с помощью специальных команд, в аргументах которых указываются новые данные и их адреса. Получение страницы из памяти, изменение данных, стирание страницы и ее запись выполняются микросхемой DataFlash самостоятельно, благодаря чему разгружается процессор и упрощается написание прикладных программ. Таким образом, микросхемы Adesto DataFlash E можно условно (не заглядывая "под капот") считать первыми образцами флеш-памяти, позволяющими манипулировать отдельными байтами данных.

Из дополнительных особенностей DataFlash серии E стоит отметить возможность приостановки процессов записи и стирания. При использовании обычной флеш-памяти перед чтением необходимо дождаться окончания записи или стирания; память DataFlash позволяет поставить их "на паузу", получить из памяти нужные данные, а затем продолжить приостановленные процессы. Микросхемы DataFlash E также могут программно перезагружаться и переводиться в глубокий спящий режим (потребление менее 200 нА) и выходить из него по команде пробуждения.

В эпоху Интернета вещей актуальна задача обеспечения безопасности информации. Функции защиты страниц памяти DataFlash от чтения или записи позволяют эффективно защищать данные от похищения. Память поделена на секторы, содержащие определенное число страниц. Любой сектор может быть защищен от перезаписи – как обратимо (защита сохраняется при отключении питания), так и постоянно (без возможности отключения защиты), что предохраняет систему от взлома посредством подмены данных в загрузочных секторах.

Однако эта возможность может сыграть на руку вредоносному коду: заблокировав запись во всю память или несколько секторов, можно нарушить работу устройства. Поэтому память DataFlash позволяет также запретить блокировку записи для каждого сектора.

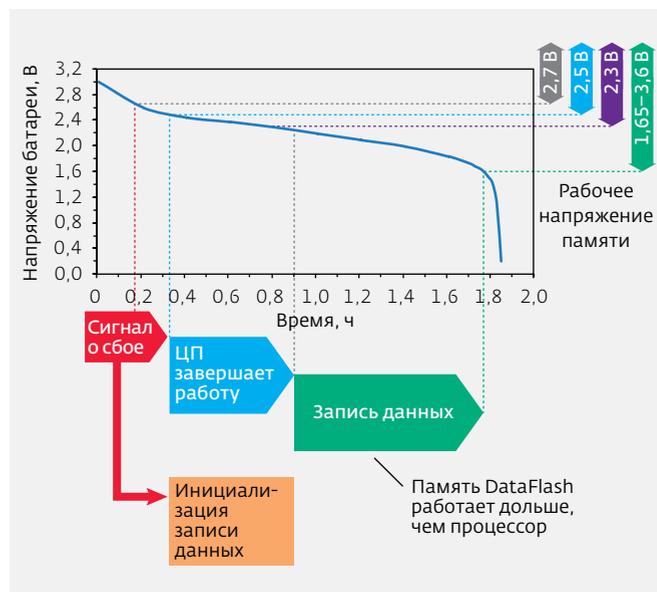


Рис.2. Память DataFlash успевает сохранить важные данные из буфера до полного отключения питания

Дополнительную защиту обеспечивают хранящиеся в специальном регистре уникальные идентификаторы (UID): самой микросхемы (устанавливается производителем и не может быть изменен)

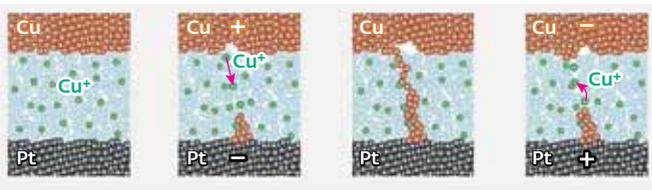


Рис.3. Принцип работы CBRAM: исходное состояние (а); запись "1" (б); записанная "1" (в); стирание (г)

и пользовательский (задается пользователем и защищается от перезаписи). Идентификация микросхем может быть полезной, например, для защиты от "обмана" счетчиков электроэнергии. Для этого в память микроконтроллера записывается UID памяти, а в пользовательский регистр безопасности этой микросхемы – UID микроконтроллера. Перед началом работы микроконтроллер сверяет UID, полученные из собственной и флеш-памяти, и только при их совпадении продолжает работу. Так исключается подмена программного обеспечения счетчика с целью занижения его показаний. Кроме того, UID можно применять для шифрования содержимого памяти.

Таким образом, микросхемы DataFlash компании Adesto обладают рядом неоспоримых преимуществ перед обычными микросхемами флеш-памяти. Применение микросхем DataFlash упрощает конструкцию изделия, повышает его надежность, защищенность, экономичность и эффективность.

CBRAM: БЫСТРЕЕ, ЭКОНОМИЧНЕЕ, НАДЕЖНЕЕ

Применение буферов и усложнение внутренней логики работы флеш-микросхем не снимает главную проблему этого типа памяти – высокого потребления и ограниченного ресурса. Ведущие разработчики микросхем исследуют возможности создания новых видов более совершенной энергонезависимой памяти. Один из перспективных видов памяти с произвольным доступом, лишенный указанных недостатков, – резистивная память (RRAM). Эта технология, лицензированная в 2004 году компанией Infineon Technologies, получила название CBRAM (conductive bridge RAM – память на основе проводящих мостиков). Схожие разработки других фирм известны как "электролитическая память" или "наномостики" (nanobridge).

Принцип работы CBRAM основан на том, что под действием напряжения в некоторых диэлектриках образуются проводящие ионные нити (мостики). Ячейка резистивной памяти представляет собой два электрода из различных металлов (один инертный, например, вольфрам, а другой – химически

активный, такой как серебро) с тонкой пленкой оксида между ними. Если к инертному электроду приложить отрицательное напряжение, ионы металла в толще диэлектрика придут в движение и сформируют нанокристаллическую нить с небольшим сопротивлением, которая сохраняет свои свойства неограниченно долгое время. Для разрушения нити достаточно приложить к инертному электроду положительное напряжение (рис.3). Таким образом в резистивную ячейку записывается информация, которую затем несложно считать: малое сопротивление ячейки означает логическую "1", а высокое – "0".

Память CBRAM не требует для программирования высокого напряжения, а следовательно, и применения медленных преобразователей. Скорость записи данных ограничивается лишь физикой образования ионных нитей и прямо зависит от прикладываемого напряжения (возможны компромиссы между быстродействием и потреблением). Еще одно перспективное преимущество этого типа памяти – возможность достижения очень высокой плотности, так как размер ячейки фактически определяется диаметром нескольких ионов металла.

Несмотря на то, что разработкой CBRAM занимались несколько компаний, лишь одна из них смогла начать их серийное производство. Пионером на рынке энергонезависимой памяти нового поколения стала компания Adesto Technologies, которая в 2011 году получила награду DARPA за образцы CBRAM, работающие при напряжении питания в десять раз меньшем, чем требует флеш-память.

Сегодня компания Adesto предлагает серийно выпускаемые микросхемы CBRAM емкостью от 48 до 128 Кбит, совместимые по выводам со стандартными ПЗУ с последовательными портами SPI (RM25CxС) и I²C (RM24CxС). Максимальная частота тактовых импульсов порта I²C – 400 МГц. Микросхемы питаются напряжением от 1,65 до 3,6 В, потребляя при записи ток всего 1,5 мА, при чтении – 1 мА, а в состоянии ожидания – 1,5 мкА. Для того чтобы оценить преимущества нового типа памяти, достаточно сравнить эти цифры с параметрами флеш-памяти. Для изделий компании Adesto ток записи примерно в десять раз выше, а микросхемы других производителей могут требовать в 20 раз большего тока! В отличие от флеш-памяти, CBRAM Adesto позволяет записывать данные байтами и страницами по 32 байта. Запись в CBRAM одного байт занимает 50 мкс, а страницы памяти – 1 мс. Поддерживаются как произвольное, так и последовательное чтение данных, в том числе

вывод всего содержимого памяти. Микросхема может быть защищена от перезаписи.

Еще одно важное преимущество CBRAM перед флеш-памятью – нечувствительность к радиации – позволило создавать специализированные микросхемы серии RM24EP, пригодные для применения в медицинском оборудовании, которое подвергается лучевой стерилизации. Эти микросхемы выдерживают фатальные для флеш-памяти дозы облучения до 200 КГрей.

Adesto готовится представить в 2015 году первые образцы двух новых серий микросхем последовательной энергонезависимой CBRAM. Серия RM24CxD отличается более высокой емкостью (до 512 Кбит, размер страницы – до 32/64 бит), расширенным диапазоном рабочих напряжений – от 1,65 до 3,6 В и быстродействием. Время записи одного байта составляет всего 25 мкс – в 200 раз меньше по сравнению с флеш-памятью. Потребление тока при записи снижено до 1 мА, а при чтении – до 0,25 мА.

Микросхемы серии RM24UL – первые в семействе CBRAM Adesto с ультранизким напряжением питания от 1 до 1,32 В. Скорость записи и потребляемый этими микросхемами ток несколько больше, чем у описанной выше серии: 100 мкс на один байт при уровне тока 2 мА.

Можно смело сказать, что разработки корпорации Adesto Technologies в области совершенствования традиционной флеш-памяти и создания перспективной CBRAM открывают перед разработчиками электронных изделий новые горизонты. Устройства Интернета вещей, носимая портативная электроника, медицинские аппараты, в том числе вживляемые в тело пациента требуют малопотребляющей и емкой памяти. Отдельно стоит отметить возможность работы низковольтных CBRAM в автономных устройствах, получающих энергию для собственного питания из нестабильных природных источников, когда на счету даже не милли-, а микроамперы потребления. Поэтому новые разработки Adesto в этой области современной электроники придутся как нельзя кстати.

ИСТОЧНИКИ

- Flash memory. – Wikipedia, en.wikipedia.org/wiki/Flash_memory.
- DataFlash products. Product overview. – Adesto Technologies, www.adestotech.com.
- Programmable Metallization cell. – Wikipedia, en.wikipedia.org/wiki/Programmable_metalization_cell.
- Introducing Adesto Technologies Corporation CBRAM. – Adesto Technologies, www.adestotech.com.