Эффективное использование преимуществ ферроэлектрической памяти

За несколько лет интерес к FRAM возрос многократно, появилось множество публикаций об этой технологии и продукции Ramtron, выпускаемой уже более 10 лет. Тем не менее пока еще нельзя назвать ее фундаментальной и общеизвестной. FRAM — энергонезависимая память с произвольным доступом — объединяет свойства, ранее присущие разным компонентам и должна повлечь изменения в типовых, широко применяемых решениях. Новый инструмент должен дать новые идеи, открыть новые возможности для создания современных электронных приборов. Некоторые из них предложены в этой статье.

Илья Зайцев

ilya.zc@eltech.spb.ru

Вкратце о технологии FRAM

Ферроэлектрическая память с произвольным доступом — одна из новейших и наиболее перспективных технологий запоминающих устройств. Уникальные свойства FRAM позволяют использовать ее вместо ОЗУ и ПЗУ одновременно. С развитием технологии в ближайшие годы высока вероятность постепенного вытеснения ею наиболее распространенных сейчас типов памяти (Flash, SRAM, DRAM) из новых проектов.

Физический принцип хранения информации ячейкой FRAM заключается в длительном энергонезависимом сохранении ферроэлектрическим материалом поляризации, приобретенной в электрическом поле при записи.

Ячейка FRAM состоит из пары транзистор-конденсатор, как в динамической памяти. Но в качестве диэлектрика в конденсаторе использован ферроэлектрик. В результате, отпадает необходимость в частой регенерации, обеспечено энергонезависимое хранение, существенно снижается энергопотребление, и, потенциально, достижимо быстродействие и плотность DRAM.

Ключевые преимущества технологии

Как результат многолетних исследований и опыта производства FRAM, Ramtron предлагает сегодня компоненты, предоставляющие революционные преимущества в хранении данных:

Быстродействие статической памяти и энергонезависимость

FRAM не требует ожидания перед началом записи, как EEPROM или Flash. И чтение, и запись FRAM может производиться с частотой шины процессора — так же, как SRAM. Однако, в отличие от SRAM, после выключения питания записанная информация не теряется. В температурном диапазоне от –40 до +85 °С данные сохраняются более 10 лет без необходимости в резервном питании или регенерации.

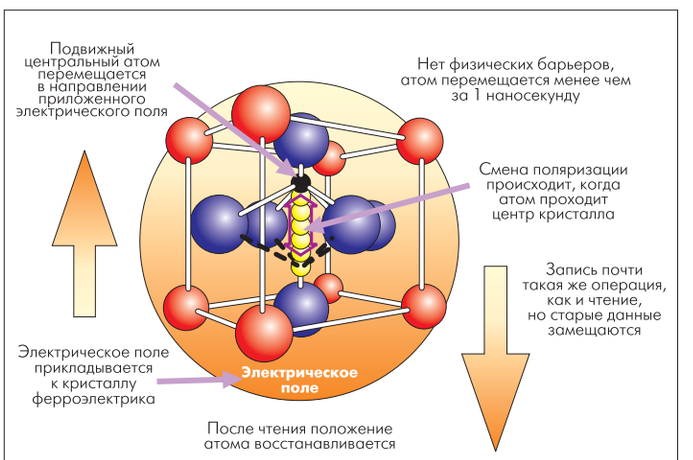

Рис. 1. Физическая основа ферроэлектрической памяти

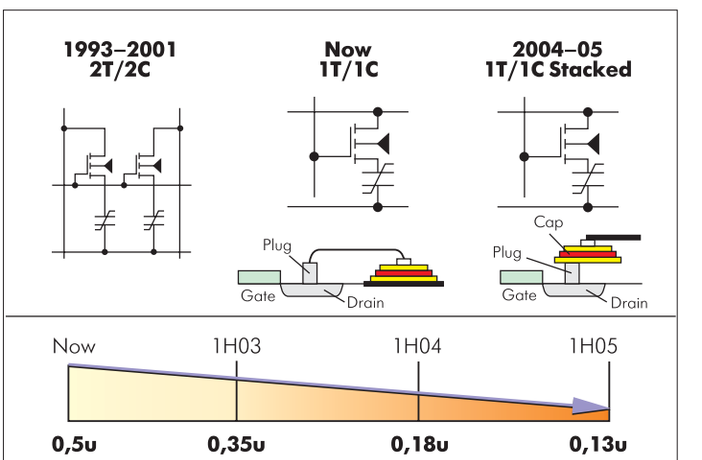

Рис. 2. Перспектива развития архитектуры FRAM

Быстродействие FRAM с параллельным интерфейсом соответствует стандартной асинхронной статической памяти. Доступные сегодня компоненты обеспечивают время доступа 70 и 120 нс. В этом году намечен выпуск FRAM с улучшенными параметрами быстродействия — 55 нс при произвольном и 25 нс при страничном обращении. Тактовые частоты FRAM с последовательными интерфейсами достигают 1 МГц (I^2C, все компоненты серии) и 20–25 МГц (SPI, компоненты, разработанные в 2002–2004 годах).

Неограниченный ресурс циклов обращения

Лучшие образцы современных EEPROM и Flash обеспечивают не более 1 млн циклов модификации данных. FRAM, рассчитанные на 3-вольтовый диапазон питающего напряжения, выдерживают практически неограниченное количество обращений. В этом году выходят первые серии микросхем FRAM (FM31xxx, FM32xxx, FM25Wxxx) с расширенным диапазоном питания — от 2,7 до 5,5 В, также обеспечивающие неограниченное количество обращений. FRAM, специфицированные для напряжения питания 4,5–5,5 В, обеспечивают ресурс от 10 млрд до 1 трлн циклов обращения.

Низкое энергопотребление

Компоненты FRAM более экономичны не только по сравнению с памятью статического типа, но превосходят также многие типы Flash или EEPROM. Экономичность FRAM основывается на эффективной архитектуре массива, особенностях технологии и процесса обращения к ячейке. Энергопотребление одинаково в циклах чтения и записи — по существу, это определение (чтение) или модификация (запись) полярности заряда конденсатора, очень краткие по времени (порядка 1 нс).

В режиме хранения массив FRAM не требует энергии, она потребляется только схемотехникой обрамления и интерфейса. Уровень потребления компонентами FRAM с последовательным интерфейсом в режиме ожидания не превышает 1 мкА. FRAM с параллельным интерфейсом также экономичнее других технологий — 15–20 мкА.

Высокая устойчивость при работе в жестких условиях

Физический принцип хранения информации в электрически поляризованном материале с достаточно широкой петлей гистерезиса обеспечивает высокую устойчивость FRAM к внешним помеховым воздействиям — в первую очередь к электромагнитным полям, свойственным промышленным объектам. Кроме того, отсутствие задержки в цикле записи и короткое время, необходимое для фиксации данных и адреса, существенно снижают вероятность возникновения ошибок.

Устойчивость к электростатическим разрядам удовлетворяет международным стандартам: 4000 В (HBM, JEDEC A114-B) и 300 В (MM, JEDEC A115-A). Испытания в составе приборов, проведенные российскими разработчиками, показывают более высокую устойчивость, чем у EEPROM и Flash, к электростатическим разрядам до 70 кВ.

Вся продукция Ramtron специфицирована для промышленного температурного диапазона от –40 до +85 °С. Однако стопроцентная работоспособность сохраняется и в диапазоне от –55 до +125 °С. При высоких температурах (выше 85 °С) лишь сокращается длительность сохранности данных без питания до единиц лет (при +125°С — около 2–3 лет).

Качество и надежность мирового уровня

Корпорация Ramtron имеет сертифицированную систему менеджмента качества во всех процессах от разработки и проектирования до потребительского сервиса, что подтверждено сертификатами ISO9000-2000, ISO9002, ISO14001. С 1998 года корпорация Ramtron в силу многократно увеличившегося объема заказов отказалась от использования собственных производственных мощностей. Выпуск продукции сегодня осуществляется на заводах корпорации Fujitsu в Японии, бесспорный авторитет которой также является гарантией качества FRAM.

Выборочные испытания на надежность в каждом лоте (партия микросхем с одинаковым кодом, произведенная в едином производственном цикле) компоненты проходят в экстремальных условиях: при температурах от –65 до +200 °С, влажности до 100%, давлении до 200 кПа. Результаты испытаний позволяют отнести FRAM к высоконадежным компонентам.

Невысокая стоимость для возможности широкого применения

При наличии целого набора уникальных свойств, компоненты FRAM доступны для широкого спектра применений по весьма конкурентоспособным ценам. Например, уровни стоимости микросхем EEPROM и FRAM с последовательным интерфейсом I^2C, способные работать на тактовых частотах до 1 МГц (24FCxxx, Microchip и FM24xxx, Ramtron), практически равны. Объем поставок FRAM во всем мире — и, в частности, в странах Восточной Европы, — постоянно растет, что также свидетельствует о признании технологии производителями электронных приборов и эффективном уровне цен.

Существующие и перспективные области применения

В настоящее время память FRAM нашла наибольшее применение в вычислительной и измерительной технике, на автотранспорте и в бытовых электронных приборах. Развивающимися областями являются приложения FRAM в телекоммуникациях, связи, промышленной автоматике, науке и медицине.

В вычислительной, офисной технике, в телекоммуникационных приборах и устройствах связи FRAM выполняет функции хранения конфигурационных данных, настроек, виртуальных адресов, учета расхода ресурса, количества копий, некоторые другие функции, общими свойствами которых является не столько потребность в большом объеме памяти, сколько в быстрой, частой записи и энергонезависимом хранении. Во множестве современных принтеров, копиров, факсимильных и телефонных аппаратов, сетевых устройствах и в компьютерной технике сегодня применяется FRAM. Например, в августе 2002 года компания Quanta Computer, один из крупнейших производителей ноутбуков на Тайване, выбрала FRAM для использования в RAID-подсистемах материнских плат легких серверов.

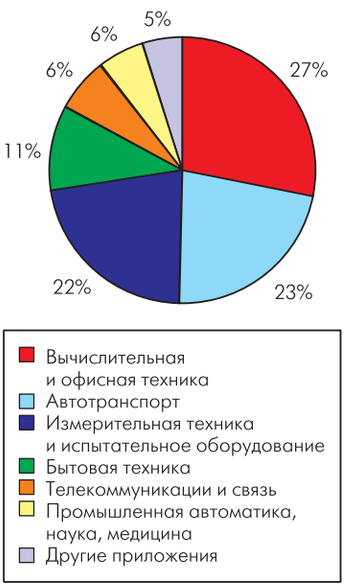

Диаграмма. Области применения FRAM

В измерительных приборах FRAM используется для хранения изменяемых или постоянных поправочных коэффициентов, постоянных физических величин, таблиц преобразования, накопления результатов измерений. Основные преимущества FRAM, используемые в этих приложениях, — низкое энергопотребление, быстродействие и энергонезависимость. Наиболее массовыми измерительными приборами, в которых применяется FRAM, являются счетчики электрической энергии — по всему миру, включая Россию, уже произведено более 14 миллионов бытовых и промышленных приборов учета электроэнергии.

Мощным потребителем памяти FRAM в последние два года стала автомобильная промышленность. Даже в несложные автомобили сегодня устанавливается 5–10 электронных устройств, в то время как в автомобилях класса «люкс» — до 50–60. Последние нововведения включают усовершенствованные системы ABS с функцией управления тягой, плавно изменяемую трансмиссию с электронным управлением, динамический кон-

Рис. 3. Более 14 миллионов микросхем уже поставлены для счетчиков электрической энергии

Рис. 4. Транспорт — интенсивно развивающаяся область применения FRAM

троль устойчивости пути, круиз-контроль, цифровые аудиоплатформы и т. д. В ближайшие годы функции автомобильных электронных устройств будут объединять адаптивный контроль движения и предотвращения столкновений, DVD-проигрыватель и навигационную систему, проводное управление и «черный ящик».

Практически в каждом из перечисленных приборов, вплоть до модулей мониторинга давления в шинах, может применяться и применяется FRAM. Основные преимущества FRAM, используемые в автомобильной электронике, — это устойчивость к жестким условиям эксплуатации, быстродействие и большой ресурс циклов обращения. Одним из ведущих разработчиков электронных систем для автомобилей, использующих FRAM, сегодня является международная корпорация Matsushita, всемирно известная по торговой марке Panasonic. Конструкторы Matsushita сделали выбор в пользу FRAM для применения в системах телематики, навигации и автомобильных аудиокомплексах.

В каких приложениях применение FRAM неоправдано

FRAM бесспорно является наиболее перспективной технологией запоминающих устройств. И, вполне вероятно, сможет вытеснить «традиционные» технологии из областей, в которых те сейчас доминируют. Однако не для всех приложений использование FRAM сегодня станет эффективным решением.

Во-первых, преимущества FRAM должны быть востребованы в проектируемом устройстве. Например, использование FRAM только в качестве памяти программ, когда код уже отлажен и не подлежит изменению по организационным (программный продукт, сертифицированный в контролирующих органах) или техническим (хорошо отлаженный код, модификация которого в выпущенных серийных устройствах нецелесообразна) причинам, менее эффективно, чем применение EEPROM или OTP EPROM.

Во-вторых, FRAM, разработанные до 2003 года и рассчитанные на диапазон питающего напряжения 4,5–5,5 В, обеспечивают ресурс 10 млрд — 1 трлн циклов обращения, включающих также операции чтения. Несмотря на кажущееся большим количество циклов, специфицированное к тому же для наихудших условий эксплуатации, в приложениях с интенсивным обращением к памяти ресурс может быть исчерпан за срок жизни прибора. Например, для обеспечения срока жизни прибора не менее 10 лет средняя интенсивность обращения по одному и тому же адресу 5-вольтовой памяти с ресурсом 10 млрд циклов (FM1808) не должна превышать 30 раз в секунду. Для систем с интенсивным обращением к памяти необходимо использовать компоненты FRAM, специфицированные для 3-вольтового диапазона питания, которые имеют практически неограниченный ресурс, — для исчерпания ресурса любой ячейки непрерывным циклическим обращением на максимально возможной скорости потребуется более 40 лет. В перспективных разработках Ramtron применяет низковольтные массивы FRAM, существенно меньше подвергающиеся износу. Уже сейчас доступны FM1608, специфицированные для диапазона 5 В, но имеющие ресурс 1 трлн циклов обращения (обеспечивает 3000 обращений в секунду для 10-летнего срока жизни прибора), в этом году начат выпуск компонентов с расширенным диапазоном питающего напряжения (от 2,7 до 5,5 В) и неограниченным ресурсом (серии Processor Companion FM31xxx, FM32xxx, и SPI FRAM FM25Wxxx).

Последний ограничивающий применимость FRAM фактор, который будет устранен в ближайшее время: максимальный объем массива памяти доступных сегодня FRAM — 32 кбайт. В июне-июле этого года начнется поставка образцов первых мегабитных FRAM — FM20L08 с организацией 128K×8, неограниченным ресурсом и 3-вольтовым диапазоном питания. В ноябре 2002 года Ramtron и Texas Instruments представили миру прототип FRAM объемом 64 Мбит. В настоящее время проходит разработка технологии массового производства FRAM большого объема.

Функции, в которых память FRAM наиболее эффективна

Регистрация и сбор данных

Под эти наименования подпадает очень широкий спектр задач, предъявляющий разные требования к подсистеме памяти. Во многих FRAM может стать идеальным решением. Приведем пару примеров приложений, доступных сегодня и в ближайшем будущем, исходя из параметров объема и быстродействия компонентов FRAM.

- Носимый терминал сбора данных (складской терминал)

Современные торговые предприятия оперируют с номенклатурой в тысячи и даже десятки тысяч наименований на площадях в сотни и тысячи квадратных метров. Элементы рентабельности торговли — эффективная внутренняя логистика и покупательский сервис — немыслимы без оперативного учета. Каждая ячейка на товарном стеллаже в торговом зале должна содержать достаточный оперативный запас товара, а покупатель должен затратить на покупку минимум времени при максимуме сервиса. Носимые складские терминалы упрощают выполнение рутинных операций, сокращают затраты времени, предоставляют нужную информацию о товаре на месте и в конечном итоге помогают повысить эффективность работы.

Объем параметров, характеризующий каждое наименование товара, может занимать многие десятки и сотни байт, что выливается в мегабайтные базы данных. Запись о товаре состоит из неизменных и модифицируемых полей. Неизменные поля это, например: наименование, штрих-код, сведения о норме упаковки, цена, коды ячеек хранения на складе и в торговом зале, служебные индексы и т. п. они составляют большую часть объема записи. Для их хранения в носимом терминале сегодня удобно использовать FLASH, так как эта информация может обновляться достаточно редко — до нескольких раз за смену, и удельная стоимость байта достаточно низка. А вот динамичная информация о движении товара, остатках, совершенных продажах изменяется существенно чаще, хотя и занимает существенно меньший объем. Но потеря этой информации может вызвать существенные проблемы. Для ее хранения идеальным решением является FRAM, так как обеспечивает надежное энергонезависимое хранение, быстродействие, огромный ресурс модификаций и низкое энергопотребление, столь критичное для мобильных устройств.

- Удаленный терминал распределенной системы сбора данных

Многие промышленные объекты огромной протяженности (как нефте- или газопроводы, линии электропередачи) или большой площади (электростанции, автоматизированные производства) имеют множество узлов, состояние которых необходимо регистрировать для контроля общего состояния системы, но постоянное обслуживание человеком или обеспечение постоянно действующего канала связи к центральной системе нецелесообразно. Контроль параметров такого узла осуществляет удаленный терминал сбора данных. Его функция — регистрировать и накапливать данные о состоянии узла. Малые габариты, низкое энергопотребление, устойчивость к помехам и жестким климатическим условиям, а также долгий срок службы могут стать критическими требованиями при создании такого прибора. FRAM, как устройство хранения регистрируемых данных, является наиболее эффективным решением, так как удовлетворяет всем перечисленным требованиям. Как вариант реализации подобного терминала для протяженных магистральных линий, можно предложить структуру, построенную на микропотребляющих компонентах фирм Xemics и Ramtron. Оцифровка и первичная обработка измеряемых параметров может осуществляться контроллером XE88LC05 или XE88LC02 со встроенным многоканальным АЦП. Однокристальный трансивер XE1203, работающий в диапазонах 433, 868 или 915 МГц (свободных от лицензирования) обеспечит беспроводной доступ к терминалу на дистанциях до 4 км.

В зависимости от требуемого объема памяти, функции накопителя и почти все

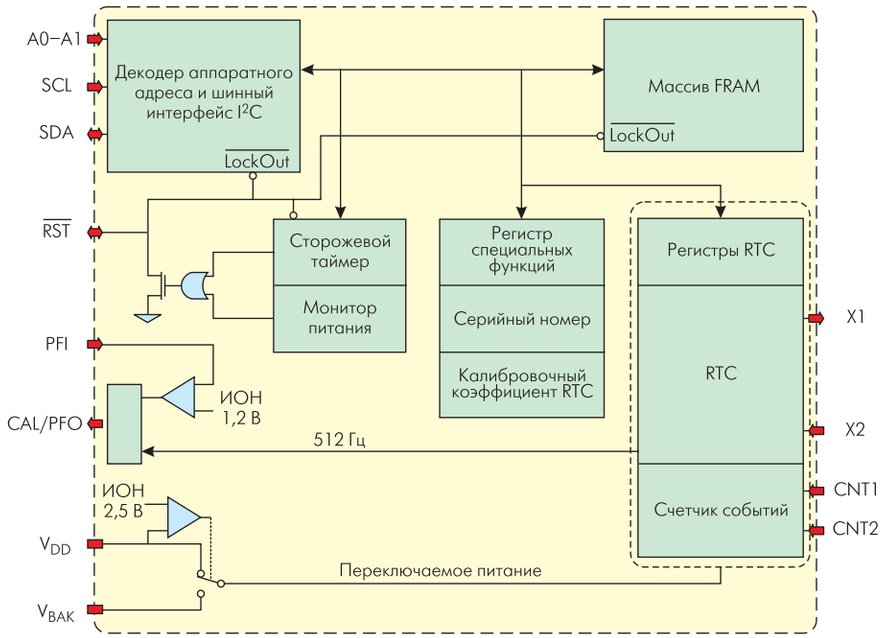

Рис. 5. Семейство Processor Companion — однокристальное сочетание множества системных функций

системные функции может выполнить один из компонентов семейства Processor Companion FM31xxx. В структуру кристалла микросхем серии FM31xxx входят: массив памяти FRAM объемом 4, 16, 64 или 256 кбит, часы-календарь, сторожевой таймер, монитор питания с программируемыми уровнями срабатывания, генератор сигнала сброса, компаратор PFI/PFO для раннего обнаружения аварий по питанию, счетчик внешних событий до 2^{32} и регистр серийного номера. Все узлы доступны по двухпроводному интерфейсу I²C с высоким быстродействием — до 1 МГц — и малым потреблением. Широкий диапазон питания (от 2,7 до 5,5 В) и низкое энергопотребление позволяют использовать FM31xxx в системах с автономным питанием.

Хранение конфигурационных данных, настроек и т. п.

Востребованная в цифровых электронных приборах функция — восстанавливать состояние, предшествующее последнему выключению. Например, цифровые радиоприемные устройства могут при включении восстановить настройку на радиоканал последнего сеанса. Наиболее широко эта функция реализуется сегодня в автомобильных аудиокомплексах. FRAM для реализации этой функции более эффективна, чем EEPROM, использовавшаяся ранее, так как предоставляет больший ресурс для модификации данных, простой алгоритм обращения и меньшее энергопотребление. При включении EEPROM данные из нее переписывались в ОЗУ, модифицировались в сеансе, а в момент выключения записывались обратно. Резервное питание, требуемое для сохранения настроек после снятия основного питания, обеспечивалось конденсатором большой емкости. Применение FRAM позволило исключить из системы конденсатор большой емкости, ОЗУ и уменьшить площадь печатной платы.

Однокристальное хранение постоянной и изменяемой информации

Практически любая микроконтроллерная система работает с информацией двух типов — динамически изменяемой (оперативные данные) и статичной, редко изменяемой (код программы, константы, коэффициенты и т. п.). Основное требование к оперативной памяти — быстрый и простой алгоритм обращения в операциях записи и чтения. Для этой цели обычно используются микросхемы SRAM или DRAM. Основное требование для хранилищ статичных данных — энергонезависимость и защита от случайной модификации. Типовая реализация этих требований — PROM, EEPROM, Flash. Свойства FRAM удовлетворяют одновременно требованиям обеих групп памяти: она обеспечивает быстрый и простой доступ при любом типе операций и энергонезависимость. Таким образом, FRAM позволяет хранить в одном кристалле как оперативную, так и постоянную информацию. Защита от случайной модификации аппаратно реализована в микросхемах FRAM с последовательным доступом (серии FM24xxx и FM25xxx). Из FRAM с параллельным интерфейсом наиболее эффективной для хранения в одном кристалле программ и оперативных данных обещает стать FM20L08. Массив 128 кбайт в ней разделен на 8 блоков по 16 кбайт, каждый из которых может быть программно защищен от изменения. Незащищенные блоки могут использоваться как оперативная память с быстрым доступом (55 нс) и неограниченным ресурсом циклов обращения. FM20L08 обеспечит также режим страничного доступа к 8 смежным адресам. В этом режиме среднее время доступа составит 25 нс. Микросхема содержит дополнительно монитор питания, блокирующий доступ к массиву при низком напряжении питания. Образцы FM20L08 будут доступны с июня-июля этого года.

Энергонезависимый буфер

FRAM позволяет накапливать данные, обеспечивая быструю запись, малое энергопотребление и энергонезависимое хранение их до передачи в другую подсистему. Эта функция востребована, например, в распределенных системах сбора данных, где каждый удаленный модуль может записывать порции данных в локальный буфер, выполненный на FRAM, а по его заполнении передать весь пакет в центральный узел по проводному или радиоканалу. После передачи содержимого буфера нет необходимости очищать массив — данные, записываемые в ячейку FRAM, замещают предыдущие значения так же, как в ОЗУ. Таким образом, с помощью FRAM можно организовывать кольцевой буфер с функцией энергонезависимого хранения.

Применение FRAM в таких приложениях эффективно по энергопотреблению. Память FRAM одинаково мало потребляет и при записи, и при чтении, и может быть выключена без риска потери данных.

Например, удаленный модуль представляет собой измерительный прибор, регистрирующий параметры медленного (например, теплового) процесса, и для анализа состояния объекта достаточно осуществлять периодический контроль параметров. Тогда, после очередного сеанса измерения, контроллер модуля может записать результаты в память и перевести весь модуль в спящий режим до следующего сеанса, активизируемого таймером реального времени, внешним событием или командой по линиям связи.

Приведем еще один пример применения FRAM в качестве кольцевого буфера. В некоторых приложениях важно состояние контролируемой системы в критический момент и его предыстория на несколько шагов назад. Это может быть, например, носимый пациентом малогабаритный монитор физиологических параметров или автомобильный «черный ящик». В обоих случаях измеряемые параметры могут записываться по кольцу до некоторого критического события. Когда физиологические параметры у пациента достигают заданных порогов или за заданный промежуток времени будут свидетельствовать об ухудшении состояния, прибор может передать анамнез и сигнал тревоги. В случае с автомобильным применением, содержание буфера будет отражать состояние контролируемых систем автомобиля перед аварией. Статистика аварий показывает, что бóльшая часть серьезных аварий сопровождается практически мгновенным обесточиванием всех систем. Поэтому данные должны храниться в истинно энергонезависимой памяти и до пропадания питания.

Компания Ramtron входит в комитет IEEE P1616, определяющий промышленные стандарты для Motor Vehicle Event Data Recorders (MVEDR — автомобильный регистратор событий). Требования к аварийным регистраторам были учтены при проектировании FRAM. Сегодня FRAM объемом от 16 до 64 кбит, обычно с интерфейсом SPI (например, FM25640), используется в промышленных разработках «черных ящиков» для автомобилей.

Замена NV SRAM

До появления FRAM для реализации быстрого и простого алгоритма обращения к памяти в операциях как чтения, так и записи применялись в основном только гибридные модули, состоящие из микросхем статической памяти, монитора питания и литиевой батареи. Недостатки такого технического решения могут быть устранены с использованием FRAM. Три главных преимущества, которые предоставит FRAM в качестве альтернативного решения:

- надежность монолитного прибора, меньшие габариты и более простой монтаж;
- гарантированная сохранность данных не менее 10 лет во всем специфицированном диапазоне температур (на практике литиевую батарею в NV SRAM приходится заменять не реже 1 раза в 3 года);
- в два-три раза меньшая стоимость FRAM.

Перспективные приложения

Как уже отмечалось в начале статьи, FRAM с высокой вероятностью может потеснить в ближайшие годы основные типы используемой сейчас памяти — SRAM, DRAM, Flash. Соответственно, множество приложений, в которых сегодня применяются эти типы памяти, смогут использовать FRAM как память универсального назначения. Главные факторы, которые сегодня не дают FRAM занять место «главного» типа памяти, — это небольшие пока объемы массивов и быстродействие. Инженеры Ramtron сконцентрировали сейчас все усилия на ускорении развития технологии, Ramtron сотрудничает в совершенствовании FRAM с ведущими мировыми производителями полупроводниковых компонентов. Стратегические направления развития FRAM — это увеличение плотности массива, создание многофункциональных компонентов высокой степени интеграции, увеличение номенклатуры и быстродействия FRAM.

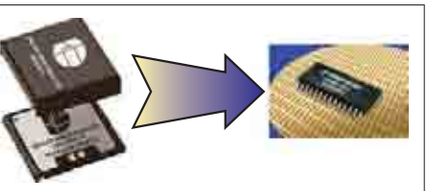

Рис. 6. FRAM — эффективная альтернатива NV SRAM

Низкое энергопотребление уже сейчас ориентирует разработчиков на применение FRAM, в первую очередь, в мобильных, портативных устройствах с автономным питанием. Увеличение плотности массива расширит область распространения FRAM на сотовые телефоны, карманные персональные компьютеры, аудиоплееры и т. п.

Неограниченный ресурс низковольтных FRAM предоставляет уникальную возможность для создания недорогих периферийных исполнительных микроконтроллерных устройств с загружаемыми центральной системой задачами для автоматизированных производств и робототехники. В таких приложениях контроллер может иметь небольшой объем встроенной памяти, даже однократно программируемой, содержащий монитор операционной системы многофункционального исполнительного узла. Хост-процессор для выполнения различных задач из перечня доступных для данного исполнительного узла может загружать во FRAM узла программу, состоящую из команд высокого уровня. Texas Instruments предполагает оснастить ближайшие поколения сигнальных процессоров встроенной ферроэлектрической памятью универсального назначения с неограниченным количеством циклов обращения. Это позволит создавать интеллектуальные исполнительные устройства на недорогих и экономичных сигнальных процессорах.