

Флэш-память – СТАНОВЛЕНИЕ, РАЗВИТИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

В.А. Шурыгин, Н.П. Васильев, В.В. Макаров (НИЯУ МИФИ)

Рассматривается история возникновения, современное состояние, а также перспективы развития флэш-памяти. Показаны, физические процессы, лежащие в основе работы флэш-памяти, разновидности ее архитектуры, приведена современная элементная база флэш-памяти.

Ключевые слова: флэш-память, транзисторы с плавающим затвором, FN-туннелирование, инжекция горячих электронов, архитектуры NOR и NAND.

Введение

С момента открытия флэш-памяти Фудзи Масуока в 1984 г. распространение и развитие этого вида памяти оправдывает название "флэш" – вспышка на английском языке или "in a flash" – в мгновение ока. В 1988 г. фирма Intel выпустила первый коммерческий чип флэш-памяти; следующую микросхему выпустила фирма Toshiba в 1989 г.

С тех пор интерес к флэш-памяти с каждым годом неуклонно возрастает. Крупнейшими производителями в настоящее время являются фирмы Intel, Micron Technology, Sony, Samsung. На сегодняшний день флэш-память – это самый быстрорастущий сегмент полупроводникового рынка с ежегодным ростом более чем на 15%, что превышает суммарный рост всей остальной полупроводниковой индустрии. Этот показатель не упал даже в условиях мирового экономического кризиса. Флэш-память используют в качестве носителя микропрограмм для микроконтроллеров HDD и CD-ROM, для хранения BIOS в ПК, в виде модулей SIMM и DIMM для факсимильных аппаратов, принтеров, а также в видеоплатах, роутерах, сотовых телефонах, электронных часах, записных книжках, телевизорах, видеокамерах и т.д. Список современных приложений флэш-памяти можно продолжать практически бесконечно.

Но одно из важнейших применений флэш – внешняя память ЭВМ (с перспективой замены механических жестких дисков и дисководов по мере уменьшения стоимости флэш-памяти больших объемов). Основное преимущество флэш-памяти перед жесткими дисками и носителями CD-ROM состоит в том, что флэш-память потребляет значительно меньше энергии (примерно в 10-20 раз) во время работы. Кроме того, флэш-память работает бесшумно, она компактнее большинства других механических носителей, устойчива к вибрациям, падениям, электромагнитным и другим видам излучения, что обуславливает применение ее в ответственных областях и экстремальных условиях (космос, военная техника, атомная промышленность), в том числе и для замены механических жестких дисков.

Занимая в начале своего появления лишь небольшую рыночную нишу, сейчас флэш – одна из основных технологий полупроводниковой памяти, и можно с уверенностью сказать, что в ближайшие 5...7 лет технологии флэш-памяти будут бурно развиваться.

Организация и принципы работы флэш-памяти

В простейшем случае каждая ячейка флэш-памяти хранит один бит информации и состоит из одного по-

левого транзистора со специальной электрически изолированной областью ("плавающим" затвором – floating gate), способной хранить заряд многие годы. Наличие или отсутствие заряда кодирует один бит информации. Плавающий затвор называется так потому, что он как бы "плавает" в толще изолятора (двуокиси кремния). Схема ячейки флэш-памяти на одном n-p-n транзисторе приведена на (рис. 1).

Такой тип полевых транзисторов получил наименование FLOTOX, аббревиатуру от английского выражения Floating Gate Tunnel-Oxide ("плавающий" затвор с туннелированием в окисле). Возникает основной вопрос, как размещать и удалять заряды на изолированном от внешних влияний "плавающим" затворе. Для этого используются два основных метода: инжекции "горячих" электронов и туннелирования электронов.

Путем длительных экспериментов было доказано что, если подать повышенное в 2...3 раза напряжение на сток и управляющий затвор (на исток – "минус", на затвор и сток – "плюс"), то возникнет канал проводимости. "Температура" (то есть кинетическая энергия) электронов превысит средний уровень, и они смогут "пробить" слой диэлектрика. Это явление называется инжекцией "горячих" электронов (CHEI – Channel Hot Electrons Injection), то есть процесс переноса заряда через энергетический барьер, образованный тонким диэлектриком, за счет увеличения кинетической энергии электронов в канале между истоком и стоком ячейки.

Другой способ размещения и снятия заряда с плавающего затвора основан на эффекте квантово-механического туннелирования (FNT – Fowler-Nordheim Tunneling), впервые описанного немецкими учеными Фаулером и Нордхеймом в 1928 г. Если подать повышенное напряжение на исток и затвор (на исток – "плюс", на затвор – "минус"), то электрическое поле "вытолкнет" электроны к изолирующей подложке, придав им допол-

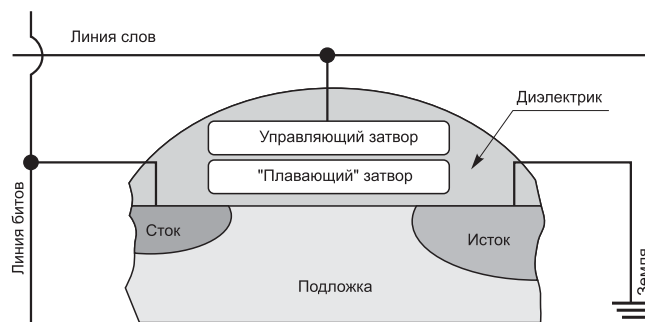


Рис. 1. Ячейка флэш-памяти

*Если теряешь интерес
ко всему, то теряешь и память.*

И. В. Гёте

нительную энергию. При правильно подобранном соотношении напряжений на истоке и затворе электроны возникнут уже с другой стороны диэлектрика, не проходя через диэлектрик (в смысле отсутствия какой-либо траектории, описываемой классической механикой). С точки зрения классической физики объяснить это нельзя, но с позиций квантовой механики это объясняется волновыми свойствами элементарных частиц и вероятностным характером их поведения. Чтобы приблизиться к пониманию этого парадокса, обратимся к некоторым базовым положениям квантовой механики.

Туннельный эффект (туннелирование) – преодоление микрочастицей потенциального барьера, когда ее полная энергия меньше высоты барьера. Это явление исключительно квантовой природы, невозможное в классической механике. Оно объясняется соотношением неопределенностей. Принцип неопределенности, сформулированный в 1927 г. Вернером Карлом Гейзенбергом, – фундаментальное положение квантовой теории, утверждающее, что любая физическая система не может находиться в состояниях, в которых координаты ее центра инерции и импульс одновременно принимают вполне определенные, точные значения. Отсюда следует, что чем точнее определена одна из входящих в систему величин, тем менее определенным является значение другой величины, при этом неопределенность в измерениях связана не с несовершенством экспериментальной техники, а с объективными свойствами материи.

Существенной чертой микроскопических объектов является их корпускулярно-волновая природа (дуализм). Состояние частицы полностью определяется волновой функцией: частица может быть обнаружена в любой точке пространства, в которой волновая функция отлична от нуля. Поэтому результаты экспериментов по определению, например, координаты или импульса, имеют вероятностный характер. Относительная частота появления тех или иных величин пропорциональна квадрату модуля волновой функции в соответствующих точках пространства. Поэтому чаще всего будут получаться те значения, которые лежат вблизи максимума волновой функции. Если максимум выражен четко (волновая функция представляет собой узкий волновой пакет), то частица "в основном" находится около этого максимума. Понятия координаты и импульса в классическом смысле не могут быть применены к микроскопическим объектам. Пользуясь этими величинами при описании микроскопической системы, необходимо внести в их интерпретацию квантовую поправку – соотношение неопределенностей.

Вернемся к туннельному эффекту. Классическая частица не может находиться внутри потенциального барьера высоты V , если ее энергия $E < V$, так как кинетическая энергия частицы $p^2/2m$ становится при

этом отрицательной, а ее импульс p – мнимой величиной (m – масса частицы). Однако для микрочастицы этот вывод несправедлив: вследствие соотношения неопределенностей фиксация частицы в пространственной области внутри барьера делает неопределенным ее импульс. Поэтому имеется отличная от нуля вероятность обнаружить микрочастицу внутри запрещенной с точки зрения классической механики области. Соответственно появляется определенная вероятность прохождения частицы сквозь потенциальный барьер, что и соответствует туннельному эффекту. Эта вероятность тем больше, чем меньше масса частицы, чем уже потенциальный барьер и чем меньше энергии недостает частице, чтобы достичь высоты барьера (то есть чем меньше разность $V-E$).

В случае флэш-памяти экспериментальным путем удалось определить параметры полевого транзистора, позволяющие реализовать туннелирование на практике.

Отметим различия методов туннелирования Фаулера-Нордхейма (FN) и метода инжекции "горячих" электронов (СНЕИ):

- метод FN не требует большого напряжения. Ячейки, использующие FN, могут быть меньше ячеек, использующих СНЕИ;

- метод СНЕИ требует более высокого напряжения, по сравнению с FN; для работы памяти требуется поддержка двойного питания. В то же время программирование методом СНЕИ осуществляется быстрее, чем методом FN.

Разновидности ячеек памяти

При создании флэш-памяти используются различные с точки зрения схемотехнических и топологических инженерных решений типы ячеек. Все они являются полевыми транзисторами с "плавающим" затвором. Перечислим основные разновидности:

- однотранзисторная ячейка памяти (Stacked Gate Cell – ячейка с многослойным затвором) – простейшая ячейка, на примере которой рассматривались принципы действия и организации флэш-памяти. Ячейка имеет наиболее простую реализацию, именно на ее базе (путем модификаций и усложнений) создано большинство из известных ныне разновидностей ячеек флэш-памяти;

- двухтранзисторная ячейка памяти (Two Transistor Thin Oxide Cell – двухтранзисторная ячейка с тонким слоем окисла). Используются два транзистора – обычный CMOS-транзистор и транзистор с "плавающим" затвором. Обычный транзистор используется для изоляции транзистора с "плавающим" затвором от битовой линии. Такая структура позволяет улучшить масштабируемость. Все операции в двухтранзисторной ячейке основаны на эффекте туннелирования;

- SST-ячейка названа в честь компании-производителя – Silicon Storage Technology. Ячейки памяти SST получили также достаточно широкое распространение. В транзисторе SST-ячейки изменены формы плавающего и управляющего затворов. Управля-

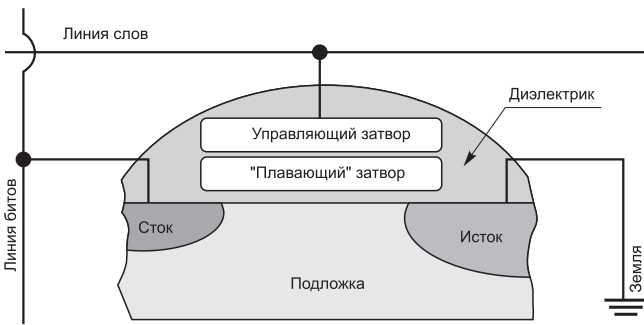


Рис. 1. Ячейка флэш-памяти

ющий затвор выровнен своим краем с краем стока, а его изогнутая форма дает возможность поместить плавающий затвор частично под ним и одновременно над областью истока. Это позволяет, с одной стороны, упростить процесс помещения на него заряда методом инжекции горячих электронов, а с другой – упростить процесс снятия заряда за счет эффекта туннелирования Фаулера-Нордхейма;

- **многоуровневые ячейки памяти (MLC – Multi-Level Cell).** Из принципа действия полевого транзистора с "плавающим" затвором вытекает возможность сохранять несколько бит в одной ячейке. В самом деле, ведь Flash-ячейка является аналоговым запоминающим устройством, а не цифровым. Она хранит заряд (квантованный с точностью до одного электрона), а не биты. Заряд ячейки (число электронов на "плавающем" затворе) вызывает изменение порогового напряжения транзистора, и при измерении величины этого порогового напряжения определяется содержимое ячейки флэш-памяти. Поэтому, если научиться помещать на плавающий затвор точное число электронов, например, устанавливать заряд в одно из четырех состояний, то можно запрограммировать два бита данных на одной ячейке. Каждое из четырех состояний соответствует одному из двухбитных наборов. На рис. 2 показано распределение порогового напряжения для ячеек, способных хранить два бита данных.

Для создания реальных многоуровневых ячеек необходимо уметь размещать точное количество заряда, а потом его точно измерять. В настоящее время мультитячейки широко используются в различных устройствах флэш-памяти. Следует отметить проблемы реализации, связанные с устранением шума и постепенной утечкой электронов при продолжительном хранении (не более одного электрона в день). Возникает задача поиска предельного числа бит, которое способна хранить многоуровневая ячейка, обеспечивая при этом надежную работу. Эти задачи решаются до сих пор, и, похоже, будут решаться постоянно.

Архитектуры флэш-памяти

Для перехода от отдельных ячеек к массиву памяти ячейки необходимо объединить. Основные типы соединений ячеек в массивы памяти на сегодняшний день – это NOR (ИЛИ-НЕ) и NAND (И-НЕ).

Тип соединения NOR (ИЛИ-НЕ) предполагает подключение ячейки к двум перпендикулярным лини-

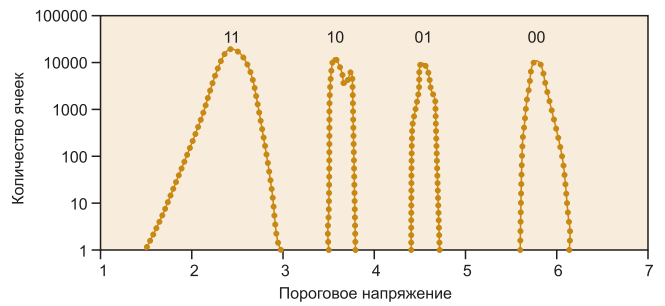


Рис. 2. Распределение пороговых напряжений для мультитячек

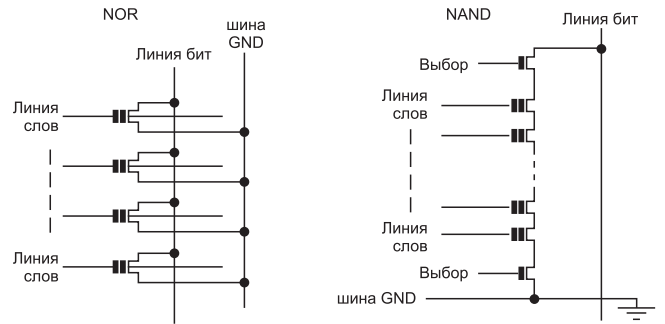


Рис. 3. Соединения ячеек

ям – битов и слов (рис. 3, слева). Если хотя бы один из транзисторов проводит ток, линия битов переходит в состояние "0". А с помощью линии слов происходит выбор читаемой ячейки. Все ячейки памяти NOR подключены к битовым линиям параллельно.

Тип соединения – NAND (И-НЕ) (рис. 3, справа) предусматривает переход битовой линии в состояние "0", если ток проводят все транзисторы. Ячейки в данном случае подсоединяются к битовой линии сериями. Основная специфика – архитектура размещения ячеек и их контактов. В отличие от NOR здесь имеется контактная матрица, в пересечениях строк и столбцов которой располагаются транзисторы. Чипы этого типа более компактны. Недостатки заключаются в более низкой по сравнению с NOR скорости работы в операциях побайтового произвольного доступа. Для преодоления низкой скорости чтения используется встроенный кэш.

Необходимо отметить, что архитектура флэш-памяти влияет на области ее применения. Адресное пространство NOR-памяти позволяет работать с отдельными байтами или словами (2 байта). В NAND-памяти ячейки группируются в небольшие блоки (по аналогии с кластером жесткого диска). Из этого следует, что при последовательном чтении и записи преимущество по скорости будет у NAND. Поэтому, а также из-за возможностей увеличения объема памяти без увеличения размеров микросхемы технология NAND нашла применение в качестве хранителя больших объемов информации и для ее переноса. Что касается NOR, то чипы с такой организацией используются в качестве хранителей программного кода (BIOS, RAM карманных компьютеров, мобильных устройств и т.п.), а иногда реализовываются и в виде интегрированных решений (ОЗУ, ПЗУ и процессор на одной мини-плате или

в одном чипе). Как пример такого использования приведем разработку компании Gumstix Technology — одноплатный компьютер Gumstix Verdex Pro XM 4 размером с пластинку жевательной резинки.

Выбраковка блоков

В реальном производстве с конвейера сходят чипы, имеющие в среднем до нескольких процентов нерабочих ячеек — это обычная технологическая норма. Со временем их число может увеличиваться за счет термического износа. Поэтому во флэш-памяти предусмотрен резервный объем. Если появляется плохой сектор, функция контроля подменяет его адрес в таблице размещения файлов адресом сектора из резервной области. Выявление дефектных ячеек реализует алгоритм ECC (Error Checking and Correction — проверка и корректировка ошибок), он сравнивает записываемую информацию с реально записанной информацией. Если есть совпадение, данные остаются в ячейке. В противном случае, данные переписываются в ячейку резервной области, а физические адреса преобразуются в логические адреса. Недопустимые блоки не влияют на работу нормальных блоков, потому что они изолированы от разрядной и общей шины питания транзистором выбора, у них блокируются адреса.

Перспективы развития флэш-памяти

Рассмотрим некоторые тенденции развития флэш-памяти.

Интегрированные решения. Одноплатные ЭВМ (типа упомянутой выше Gumstix) — лишь промежуточные этапы на пути к реализации всех функций в одной микросхеме. В настоящее время on-chip (single-chip) системы представляют собой комбинации в одном чипе флэш-памяти с контроллером, процессором, SDRAM, специальным ПО. Так, например, Intel StrataFlash в сочетании с ПО Persistent Storage Manager (PSM) дает возможность использовать объем памяти одновременно как для хранения данных, так и для выполнения программного кода. PSM по сути дела является файловой системой, поддерживающей ОС семейства Windows Mobile. Еще более сложные конфигурации класса "все — в — одном" анонсированы компаниями Intel, Samsung, Hitachi. Их изделия представляют собой многофункциональные устройства, реализованные в одной лишь микросхеме (стандартно в ней имеется процессор, флэш-память и SDRAM (System Dynamic Random Access Memory)). Ориентированы они на применение в мобильных устройствах, где важна высокая производительность при минимальных размерах и низком энергопотреблении.

Уменьшение энергопотребления и размеров с одновременным увеличением объема и быстродействия памяти. В большей степени это касается микросхем с NOR-архитектурой, поскольку с развитием мобильных компьютеров, поддерживающих работу в беспроводных сетях, именно NOR-флэш благодаря небольшим размерам и малому энергопотреблению станет универсальным решением для хранения и выпол-

нения программного кода. В частности, Intel уже представила разработку StrataFlash Wireless Memory System ("Слоеная" беспроводная система памяти) (LV18/LV30) — универсальную систему флэш-памяти для беспроводных технологий. Объем ее памяти достигает гигабитов, а рабочее напряжение равно 1,8 В.

Использование результатов исследований в области нанотехнологий. С увеличением емкости, уменьшаются расстояния между компонентами микросхем флэш-памяти. Это приводит к паразитным эффектам взаимовлияния, ухудшению надежности работы. Двумерная топология достигла своего предела. Оригинальное решение этой проблемы предложила компания Nanosys (США, Калифорния), специализирующаяся на исследованиях в области нанотехнологий и обладающая несколькими патентами на перспективные технологии выпуска полупроводниковых чипов. Среди партнеров Nanosys — корпорации Intel и Micron Technologies. Эта разработка, позволяет использовать металлические нанокристаллы при производстве микросхем памяти, не внося практически никаких изменений в технологический процесс.

Разработан материал, способный удвоить емкость обычных чипов флэш-памяти путем добавления на стадии производства микросхем самоформирующихся металлических нанокристаллов за счет введения третьего измерения в матрицу памяти.

Получен кристалл, который выглядит как пучок небоскребов. При этом "плавающий" затвор заменен нанокристаллами, что позволило, с одной стороны, радикально уменьшить объем диэлектрика, необходимого для надежной изоляции, а с другой — снизить высоту ячеек и, тем самым, уменьшить интерференцию.

Металлические нанокристаллы способны удерживать большой заряд в ячейке памяти, чем кремниевые нанокристаллы. Кроме того, для записи и стирания данных во флэш-память с металлическими частицами необходимо пониженное напряжение, что позволит экономить электроэнергию. Наконец, в отличие от полупроводниковой флэш-памяти, число циклов записи и стирания неограниченно.

В университете Беркли разработана технология получения упорядоченных наноструктур с размерами ячеек около трех нанометров, что позволяет достичь плотности записи 1,7 Терабит/см². В качестве основного материала выступает так называемый блок-сополимер PS-b-PEO. Молекулы этого соединения образуются, если соединить несколько видов полимерных блоков различной химической природы. В данном случае это были блоки полистирола и полиэтиленоксида. Эта технология позволит создавать носители с беспрецедентной плотностью записи. Так, например, на диск диаметром три сантиметра поместится >1400 Гб.

Заключение

Таким образом, в статье были рассмотрены вопросы, связанные с появлением и развитием нового направления в области запоминающих устройств —

флэш-памяти. Это направление, возникнув сравнительно недавно, в 80-е годы XX века, в наши дни пользуется заслуженной популярностью. Флэш-память применяется практически во всех средствах вычислительной техники и обработки информации (от суперкомпьютеров и до компактных и сверхкомпактных ЭВМ, смартфонов, цифровых фотоаппаратов и т.д.) в качестве недорогого и емкого хранилища информации. С каждым годом емкость и быстродействие таких устройств неуклонно растут, при этом геометрические размеры и цена элементов флэш-памяти постоянно снижаются. Развитие технологий и, в частности, нанотехнологий уже в ближайшем будущем должны еще в большей степени ускорить эти процессы.

Список литературы

1. maxflash.net – (раздел "Все о флэш-памяти").
2. ixbt.com – (раздел "Комплекующие и технологии ЭВМ").
3. Flashboot.ru – (раздел "Работа с USB флэш как с жестким диском").
4. www.21mm.ru – (раздел "Почему флэшка помнит?").
5. www.icompas.ru – (раздел "Все о флэш – технологиях").
6. Pavan P., Bez R., Olivo P., Zanoni E. Flash Memory Cells-An Overview. Proceedings of the IEEE. Vol. 85. No. 8. August 1997.
7. Visconti A. Memorie Non Volatili. STMicroelectronics Central R&D – Non – Volatile Memory Process Development, Padova, a.a. 2001-2002.
8. Нойман Х. Автоэлектронная эмиссия полупроводников. Пер. с нем. М.: 1971.

Шурыгин Виктор Александрович – канд. техн. наук, доцент, Васильев Николай Петрович – канд. техн. наук, доцент, Макаров Виктор Валентинович – канд. техн. наук, доцент кафедры "Компьютерные системы и технологии" Национального исследовательского ядерного университета "МИФИ". Контактный телефон(495)323-92-83. E-Mail: nick@mephi.ru

Мультиядерные процессоры в промышленной автоматизации.

Часть 1: мультиядерность и виртуализация

П.Б. Панфилов (МИЭМ), Д.В. Пономарев (Binghamton University)

Законы физики и экономики заставляют разработчиков и производителей процессоров искать новые пути повышения их производительности. Одним из таких путей, который может оказаться особенно полезным для приложений промышленной автоматизации, является реализация концепции мультиядерности, то есть проектирование микросхем, объединяющих внутри два или более в значительной степени независимых исполнительных (вычислительных) узла. Ожидается, что системы управления на базе мультиядерных процессоров получат более высокую вычислительную мощность, надежность и более низкую общую стоимость, чем аналогичные одноядерные решения. В статье представлен краткий анализ причин начала разработки мультиядерных процессоров, исследуются характеристики, которыми должны обладать мультиядерные системы в приложениях промышленной автоматизации. Описываются преимущества, предлагаемые мультиядерными системами приложениям промышленной автоматизации.

Ключевые слова: мультиядерность, виртуализация, приложения промышленной автоматизации.

Введение

Инновационные технологии в области вычислительных систем воздействуют на рынок встраиваемых систем и предоставляют производителям устройств для сектора промышленной автоматизации серьезные возможности по развитию как их технических решений, так и бизнеса в целом. Умение воспользоваться преимуществами мультиядерных процессоров и технологий виртуализации может обеспечить серьезную базу для получения конкурентных преимуществ [1].

Доступность мультиядерных процессоров приводит к наиболее серьезному прорыву на рынке встроженных систем за последние годы, а также представляет собой одну из самых главных возможностей в повышении не только вычислительной мощности средств автоматизации, но и их надежности без увеличения стоимости новых технических решений.

Виртуализация – это технология, которая обеспечивает способность реализовать множество виртуальных машин на одной и той же физической вычислительной плате на основе абстрагирования процессорных ядер, памяти и устройств нижнего (физического) уровня.

Мультиядерность и виртуализация предоставляют возможности увеличения производительности, энергоэффективности и снижения затрат на материалы и операционные нужды за счет консолидации аппаратного обеспечения, а также позволяют наращивать приложения более эффективным по стоимости образом в течение всего "жизненного цикла" системы. Консолидация предполагает объединение в одном модуле того, что обычно было представлено множеством независимых устройств, выполняющих отдельные приложения.

Комбинация мультиядерности и технологий виртуализации может помочь производителям оборудования в решении задач промышленного контроля и автоматизации ТП различных отраслей промышленности, включая энергетику и транспорт, защитить их инвестиции в разработки новых решений. Эти технологии увеличивают производительность компьютерных систем, позволяют им одновременно и безопасным образом выполнять больше приложений, обеспечивают защищенность данных, масштабируемость и сертифицируемость решения. Высокая производительность мультиядерных процессоров может быть также использована