

Задачи промышленной технологии flash-памяти 3D NAND

Технология 3D NAND является популярной темой на сайтах, в журналах, в рекламных объявлениях и на конференциях. В обсуждении, связанном с технологией 3D NAND, присутствует одна общая тема: данная технология имеет очень хорошие перспективы. В течение нескольких лет технология эволюционировала из первоначальных 32 уровней сначала до 48 уровней и затем до 64 уровней. В настоящее время в технологии 3D NAND имеется 96 уровней. Количество уровней продолжит увеличиваться со следующим поколением, лишь за несколько месяцев до выпуска оно достигнет 128 уровней.

Вертикальное расположение слоев с ячейками памяти было идеальным решением проблемы увеличения степени миниатюризации компонентов, рисков и растущих затрат. Размеры flash-памяти NAND менее 10 нм считались недостижимыми как коммерчески, так и технологически.

На рынке значительно упала стоимость твердотельных SSD-накопителей и карт памяти. Это было вызвано сочетанием сокраще-

ния производства памяти с небольшим количеством уровней и избыточным предложением на микросхемы с более высокой емкостью.

3D-ячейка обладала большей емкостью благодаря более совершенной физической конструкции по сравнению с 2D-ячейкой. Это открыло путь для внедрения продуктов QLC; 4 бита на ячейку с 16 уровнями напряжения, которые необходимо надежно разграничивать. В настоящее время уже ведется разработка исполнений с 5 битами на ячейку (PLC — ячейка пятого уровня).

Можно с уверенностью сказать, что технология 3D NAND завоевала мир хранения информации и имеет очень хорошие позиции. В частности, это относится к потребительским и корпоративным твердотельным SSD-накопителям, которые, как правило, располагаются в хорошо вентилируемых системах.

Тем не менее что происходит, если вы используете потребительский твердотельный SSD-накопитель 3D NAND в нестандартных промышленных областях применения? Например, в случае применения

внутри герметичных систем без вентиляции и частого применения на открытом воздухе при регулярном воздействии больших перепадов температуры. Или в случае, когда требуется регистрация данных от различных датчиков с высокой скоростью передачи небольших данных. И как технология 3D NAND выполняет данные требования?

Начнем с нескольких общих утверждений относительно технологии 3D NAND:

- технология 3D NAND надежнее технологии 2D NAND;
- технология 3D NAND быстрее технологии 2D NAND;
- технология 3D NAND дешевле технологии 2D NAND.

Последнее утверждение, несомненно, верно, учитывая современное исполнение технологии 3D NAND. В конце концов, это именно то, чего производители flash-памяти NAND хотели добиться, вложив миллиарды долларов в технологию. Два других утверждения требуют чуть более глубокого понимания.

Сравнение технологий 3D NAND и 2D NAND

Часто предполагается, что технология 3D NAND надежнее технологии 2D NAND, т. к. активная область ячейки и размер платы запоминающего устройства значительно больше в случае технологии 3D NAND. Ячейка в случае технологии 2D NAND состоит из небольшой плоской области; тогда как ячейка в случае технологии 3D NAND обрабатывается вокруг разрядной шины, обеспечивая возможность накопления большего заряда. В случае технологии 3D NAND можно снизить электрические помехи со сто-

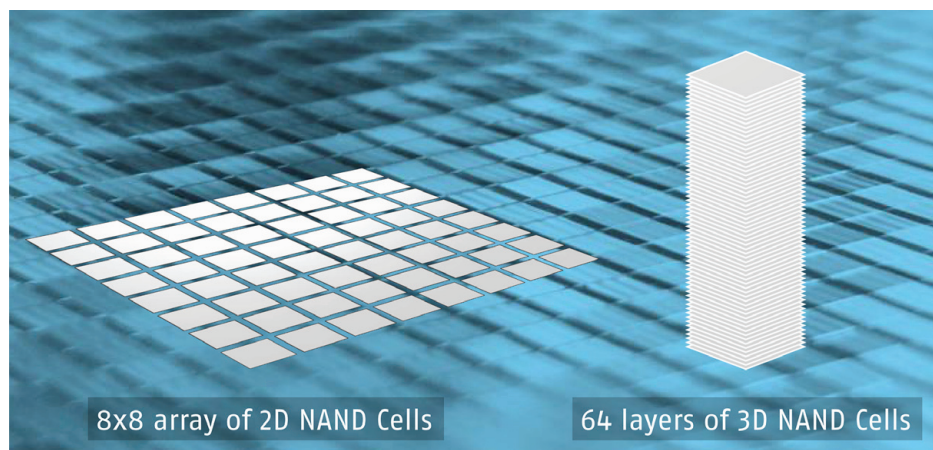


Рисунок 1. Сравнение пространственного расположения 64 ячеек памяти по технологии 2D и 3D NAND

роны прилегающей ячейки, а также улучшить соотношение сигнала к напряжению шумов; все это звучит многообещающе. Тем не менее данное преимущество было использовано для достижения большего числа битов на ячейку и снижения стоимости, а не обязательно для повышения надежности.

Технология MLC (многоуровневая ячейка) 2D NAND, как правило, обеспечивает 3000 циклов программирования/стирания, то есть каждый блок можно стирать и перепрограммировать 3000 раз до того момента, когда характеристики ячейки ухудшатся настолько, что ее возможность хранения информации в течение одного года больше не может быть гарантирована.

Технология 3D NAND должна достигать большего количества циклов программирования/стирания. Тем не менее, как правило, предлагаются только версии 3D TLC NAND. Повышение емкости ячейки было использовано для повышения количества битов на ячейку, в результате технология 3D NAND также обеспечивает 3000 циклов программирования/стирания, что идентично технологии 2D NAND. Этого удалось достичь лишь случайно, за счет различных модификаций, в частности за счет исправления ошибок.

В то время как 3000 циклов программирования/стирания в случае технологии 2D NAND достигаются простым 40-битным исправлением ошибок на 1 кибибайт BCH, для технологии 3D NAND требуется как минимум 120-битовое исправление ошибок, чтобы соответствовать 3000 циклов. Это новый процесс, называемый LDPC (код с низкой плотностью проверок на четность), который требует значительно большего количества контрольных битов и, как следствие, большей площади кристалла и больше вычислительного времени для корректирующего встроенного ПО. Это особенно актуально, когда количество ошибочных битов возрастает к концу срока службы. Более старые контроллеры не имеют необходимых ресурсов, поэтому они не будут работать с технологией 3D NAND.

С новой технологией 3D NAND в сфере flash-памяти появились новые механизмы возникновения ошибок. Соответственно, теперь требуются новые функции встроенного ПО, например Block RAID (матрица недорогих дисковых накопителей с избыточностью для блока). Данная функция предотвращает выход всего блока из строя, что ранее было невозможным и ненужным.

Без данной функции ошибки системы могут возникать в диапазоне до 1000 DPPM (1000 ошибок на миллион устройств). Это значение является приемлемым для потребительских продуктов, и функция Block RAID обычно не реализуется. Тем не менее такая частота ошибок неприемлема для промышленной продукции.

В этом случае исправление ошибок блока является обязательным и требует значительных усилий как при создании встроенного ПО, так и при обеспечении большей степени резервирования. Данная функция обеспечивает защиту заказчиков от неожиданного возникновения ошибок на месте эксплуатации. При частоте ошибок на уровне 1000 DPPM потенциальные риски невозможно обнаружить при обычных условиях. Заказчики должны полагаться на производителя твердотельных SSD-накопителей в том, что они предприняли все необходимые меры для минимизации ошибок на месте эксплуатации.

Тем не менее преимущество восстановления блоков имеет свою цену: требуется дополнительная память для сохранения информации о четности. Это повышает коэффициент усиления записи (WAF), который в свою очередь снижает срок службы твердотельного SSD-накопителя. Чем больше WAF, тем меньше ожидаемый срок службы. По этой причине во многих потребительских продуктах данная функция отсутствует. С другой стороны, для промышленных твердотельных SSD-накопителей требуется Block RAID или аналогичная функция обработки ошибок, что делает их более сложными и приводит к увеличению объема работ при проведении настройки.

Кросс-температура

Еще одним аспектом 3D-технологии является ее поведение при изменениях температуры, иначе называемых техническим термином — кросс-температура.

В случае технологии 2D NAND соответствие всех ячеек определялось точностью оптической литографии. Обоснованным предположением является то, что свойства всех ячеек в массиве были идентичными. Хотя ячейки не обладали большой емкостью, как минимум они были равны в пределах одной страницы.

Несмотря на то, что технология 3D NAND обладает лучшими свойствами ячеек, она также характеризуется большими вариациями.

Давайте изобразим разрядную шину технологии 3D NAND в виде микроскопического отверстия, протравленного через 64 уровня. В идеальном случае отверстие будет иметь одинаковый размер на верхнем и нижнем уровнях стека. Тем не менее реальная ситуация отличается: диаметр отверстия на верхнем уровне значительно больше диаметра на нижнем уровне, что приводит к совершенно различной емкости ячеек и пороговым значениям напряжения. Все 64 ячейки между верхним и нижним уровнями относятся к одной и той же разрядной шине и одному и тому же датчику напряжения. В результате уровни напряжения в пределах данной разрядной шины сильно различаются и должны постоянно компенсироваться. Теперь добавим изменения температуры, и работа датчика будет сильно затруднена. Например, при выполнении записи при низких температурах и считывания при высоких температурах отношение напряжений совершенно отличается от отношения напряжений при обратном порядке.

В целом все экстремальные температуры критичны для технологии 3D NAND. Работа при температуре ниже -10°C или при 85°C вызывает проблемы считывания из-за смещения уровня напряжения. При наличии дополнительных помех из-за интенсивного считывания или в случае сбоя питания потеря данных неизбежна.

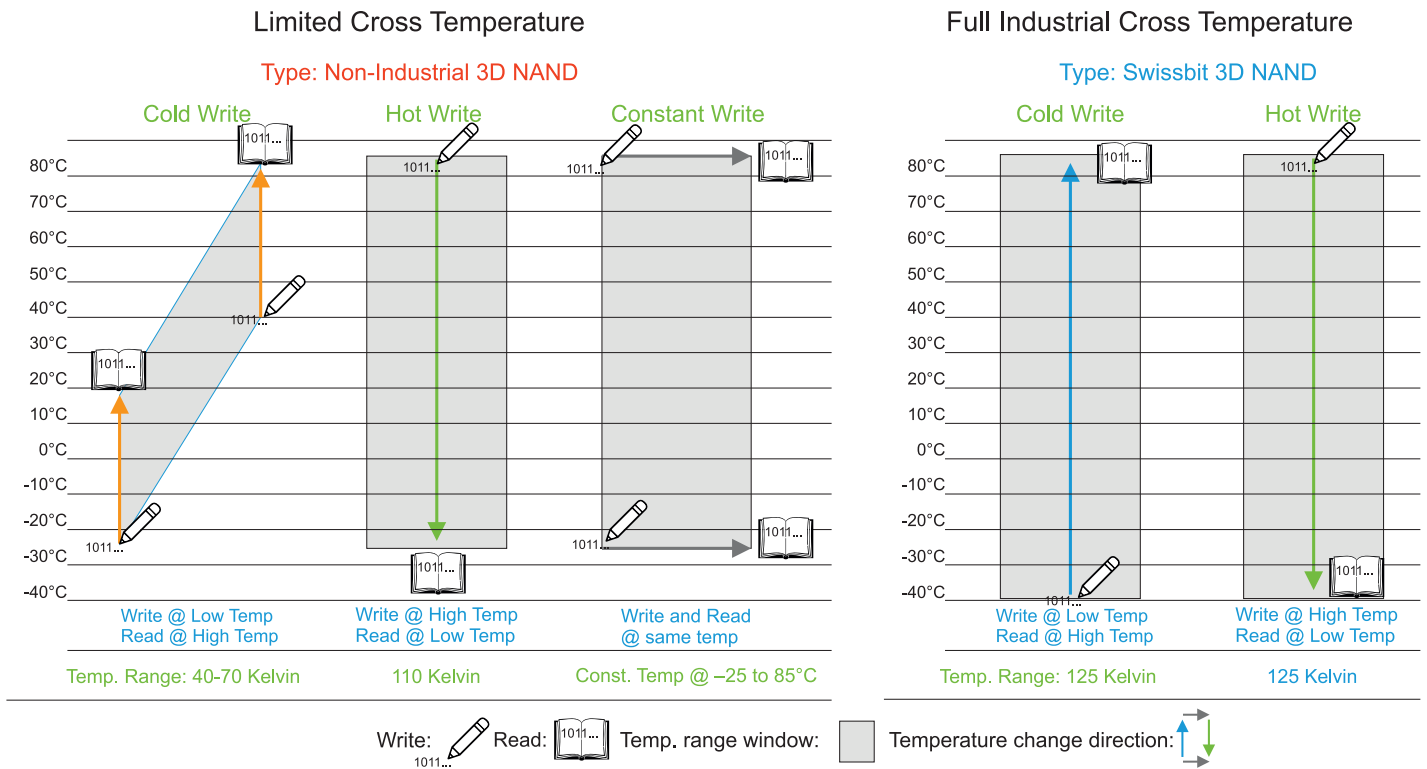


Рисунок 2. Поведение при кросс-температуре

Для стандартной потребительской технологии 3D NAND допустимый диапазон изменения температуры записи и считывания составляет примерно от 45 до 50 К. Это означает, что можно, например, выполнять запись при температуре 20 °С и считывание при температуре 65 °С, что является достаточным для потребительских продуктов.

Напротив, при применении в промышленности с указанным диапазоном температур окружающего воздуха от -40 до 50 °С легко достигается диапазон температур твердотельного SSD-накопителя от -40 до 85 °С. Это соответствует кросс-температуре 125 К и в 2,5 раза превышает диапазон потребительской карты памяти, которая с большой долей вероятности выйдет из строя при таких условиях.

На рынке имеется очень небольшое количество специально настроенных вариантов технологии 3D NAND, которые соответствуют данным спецификациям. Их стоимость значительно выше, но при этом они обеспечивают большую надежность относительно потери данных.

Технология 3D NAND обеспечивает более высокую надежность на уровне

отдельной ячейки по сравнению с технологией 2D NAND, но большое наложение уровней друг на друга и переход к TLC нивелирует любые улучшения рабочих характеристик, требуя, тем самым, дополнительных механизмов обеспечения надежности, сопоставимой с надежностью технологии 2D NAND. Производство продукции промышленной категории возможно только при внедрении корректной технологии flash-памяти NAND.

Быстродействие

Это правда, что технология 3D NAND обеспечивает более высокую скорость записи по сравнению с технологией 2D NAND. Это связано с тем, что запись во все три бита 3D-ячейки может быть выполнена за один этап процесса. Напротив, технология 2D NAND требует два этапа программирования для записи каждого бита — сначала младший (быстрый) бит, за которым следует старший бит на отдельном этапе программирования.

Несмотря на то, что в технологии 2D NAND каждый отдельный этап выполняется быстрее, технология

3D NAND быстрее по суммарному времени, необходимому для записи 3 страниц (3 битов).

Что если три готовые страницы для записи отсутствуют? Это часто происходит при случайных записях небольших пакетов данных. В этом случае для заполнения 3 битов требуется добавление фиктивных страниц. Запись фиктивных страниц снижает фактическую скорость передачи данных по сравнению с технологией 2D NAND.

Кэш динамического ОЗУ часто используется в качестве ответной меры для обеспечения возможности сбора страниц за более длительный период времени с целью записи трех информационных страниц за раз. Это повышает стоимость твердотельного SSD-накопителя. Кроме того, для контроллера требуется достаточное пространство буфера для трех страниц, которое не обеспечивается более старыми контроллерами.

Стандартным решением является использование небольшой части памяти в качестве SLC-кэша. Поначалу скорость записи очень высокая. Сразу после заполнения кэша 3 страницы из области pSLC

преобразуются в страницу TLC. Как только начинается выполнение данного процесса, карта памяти значительно замедляется. Каждая новая передача данных вызывает преобразование страницы рSLC в TLC. Другой вариант заключается в использовании всей памяти в режиме рSLC для начала процедуры. В данном примере кэш значительно больше по сравнению с предыдущим случаем. 1/3 емкости карты памяти доступна в качестве быстрой действующего запоминающего устройства. Дополнительные требования к емкости запускают процесс преобразования рSLC в TLC.

Контрольное тестирование часто основано на небольших емкостях запоминающего устройства и обычно выполняется с твердотельными SSD-накопителями, работающими по принципу «Новый из коробки (FOB) = еще не использованный». В этом случае все еще в доступе весь SLC-кэш, и можно провести впечатляющие измерения. С течением времени рабочие характеристики падают до уровня десятых долей указанных значений.

Третье решение называется «TLC direct». В этом случае SLC-кэш не используется, и программирование выполняется в виде одноэтапного процесса. Как указывалось ранее, для эффективного выполнения процесса требуется динамическое ОЗУ. Даже в этом случае предельная скорость снижается по сравнению с вариантом SLC-кэширования. Тем не менее рабочие характеристики в целом остаются неизменными на протяжении всего срока службы.

Как видно из приведенных выше описаний, скорость необязательно остается постоянной при использовании карты flash-памяти. Впечатляющие технические характеристики не означают то, что они будут сохраняться при заполнении карты памяти.

В случае промышленного применения стабильность рабочих характеристик является более важным фактором по сравнению с максимальными рабочими характеристиками. Для этого встроенное ПО необходимо оптимизировать в соответствии с эксплуатацион-

ными требованиями. Карты памяти для промышленного применения зачастую настраиваются на постоянные скорости передачи данных и длительный срок службы.

Долговечность

Измерение долговечности карт flash-памяти 2D NAND проводилось достаточно просто, посредством выполнения необходимых тестовых запусков в течение длительного периода времени. Затем с помощью инструментов определялось количество страниц, запись которых проводилась внутри и извне (термином для такого соотношения является коэффициент усиления записи (WAF)), и в завершение выполнялась экстраполяция ожидаемого возможного количества записанных терабайтов (TBW).

В случае технологии 3D NAND на долговечность карты памяти влияет множество новых аспектов. По сути, чем больше flash-памяти используется для внутренней записи в результате передачи данных от внешнего источника, тем меньше ожидаемое значение TBW.

- Долговечность снижается из-за:
- функции Block RAID, так как для четности требуются дополнительные страницы;
 - SLC-кэша, т. к. каждая логическая страница будет записана как минимум дважды в flash-памяти;
 - карт памяти без динамического ОЗУ, часто требующих записи фиктивных страниц.
- На долговечность также влияет:
- объем памяти, используемый при тестировании;
 - подготовка карты памяти (FOB и уже выполненная запись);
 - профиль тестирования (малый и большой размер блоков, применение TRIM, очистки кэша).

В целом долговечность твердотельных SSD-накопителей с технологией flash-памяти 3D NAND относительно ниже долговечности карты памяти 2D MLC, даже несмотря на то, что для обоих компонентов NAND указаны 3000 циклов стирания. Потребители больше заинтересованы в стоимости гигабайта,

а не в стоимости числа TBW (записанные терабайты). В случае промышленных карт памяти, которые используются на месте эксплуатации в течение многих лет, стоимость числа TBW (записанные терабайты) имеет большее значение в сравнении с начальной стоимостью приобретения карты памяти.

Исправление ошибок

Как уже упоминалось выше, в случае технологии 3D NAND требуется гораздо большее число битов для исправления ошибок. Вместо 40-битовой BCH требуется 120-битовый LDPC (код с низкой плотностью проверок на четность).

Изначально это может показаться не очень важным. Тем не менее последствия оказываются намного более сложными. Переход с 40-битовой BCH к 120-битовой BCH потребует не 3-кратного, а более чем 10-кратного увеличения площади микросхемы. Это не только очень дорого, но также трудно реализуемо.

Решение представляет собой новую процедуру кодировки, изначально использованной в 2D TLC: LDPC (код с низкой плотностью проверок на четность). Для генерации контрольной суммы используется лишь небольшое количество битов, но для этого требуется так называемая программная информация от flash-памяти NAND. Вместо получения всей информации об исправлении с помощью простого считывания теперь требуются три доступа к считыванию для восстановления 120 (макс.) битов с ошибками. Несмотря на то, что небольшое количество битовых ошибок может быть исправлено с помощью аппаратного обеспечения LDPC (код с низкой плотностью проверок на четность), контроллеру требуются программнореализованные алгоритмы в случае большего числа ошибок. В результате работа карты памяти значительно замедляется по мере возрастания частоты битовых ошибок из-за старения. Фактически данная технология значительно медленнее по сравнению с технологией 2D NAND.

Новые контроллеры — новые особенности

Одним из улучшений, возникших в результате дополнительных требований, предъявляемых к современным контроллерам 3D NAND, является сквозная защита маршрута передачи данных, или E2E DP. В более старых контроллерах внутреннее ОЗУ для буферов страниц, маршрут передачи данных между различными блоками и содержимое динамического ОЗУ не были защищены от битовых ошибок (например, в результате облужения или воздействия альфа-частиц).

Необнаруженное повреждение данных представляет большой риск, т. к. это может привести к некорректным настройкам или ошибочным результатам. Единственная необнаруженная битовая ошибка может вызвать значительный финансовый или даже

физический ущерб, если такая ошибка возникнет при выполнении банковских транзакций, оказании медицинской помощи или управлении роботом.

В последних моделях контроллеров предусмотрена защита всех маршрутов передачи данных с помощью четности. Все буферные области и содержимое динамического ОЗУ защищены ECC (код с исправлением ошибок).

Ошибки больше не остаются незамеченными, и в большинстве случаев отклонение или повторение команды записи или маркировка считанных данных как ложных (поврежденных) может предотвратить дальнейшую обработку неверных данных.

Заключение

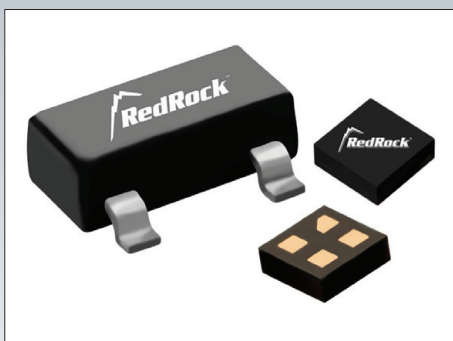
Для промышленных твердотельных SSD-накопителей требуется

тонкая настройка встроенного ПО и архитектуры NAND для обеспечения долговечности, стабильных рабочих характеристик и работы в промышленном температурном диапазоне.

Это требует определенных жертв: ограничение максимальных рабочих характеристик и более высокие закупочные цены. Тем не менее преимущества заключаются в получении надежных продуктов с низкими затратами в течение всего жизненного цикла за счет большей долговечности и более высокой надежности.

Компания Swissbit обладает более чем 20-летним опытом разработки продуктов для промышленного применения и предлагает широкий диапазон оптимизированных карт памяти, отличающихся долговечностью, низкими затратами в течение всего жизненного цикла и высокой надежностью.

Цифровой магнитный TMR-датчик семейства RedRock®: RR122-1B52



Coto Technology представила новый высокочувствительный цифровой омниполярный датчик с низким энергопотреблением семейства RedRock® - RR122-1B52-511/512, на основе тонкопленочной технологии туннельного магнитосопротивления (TMR).

Основные характеристики:

- Порог срабатывания: 30 Гс или 3 мТл.
- Самый низкий в мире средний ток потребления: <1,2 мкА.
- Широкий диапазон напряжения питания: от 1,7 до 5,5 В.
- Омниполярный двухтактный выход.
- Рабочая частота 250 Гц.
- Соответствие требованиям RoHS и REACH.

Датчик доступен в миниатюрном корпусе LGA-4, размером всего 1,4×1,4×0,45 мм для сверхкомпактных приложений или в стандартном промышленном исполнении — SOT23-3.

Диапазон рабочих температур -40...+85 °С, доступна улучшенная версия (RR122-1B53-511 / 512), позволяющая работать датчику при высоких температурах, до + 125 °С.

Области применения различны: датчики приближения и положения, датчики определения уровня жидкости, датчики открытия и закрытия дверей, приборы учета коммунальных ресурсов, контроллеры двигателей и бытовая электроника.

Принцип работы омниполярного датчика

