

ПРИНЦИПЫ ИМПУЛЬСНОГО ТЕСТИРОВАНИЯ НОВЫХ ТИПОВ ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМОЙ ПАМЯТИ

PULSE TESTING PRINCIPLES FOR EMERGING NON-VOLATILE MEMORY TECHNOLOGIES

Питер Дж. Халберт (Peter J. Hulbert), Keithley Instruments, Inc.

Флэш-память на транзисторах с плавающим затвором впервые получила широкое распространение в 1990-х гг. и до недавнего времени вполне отвечала требованиям, предъявляемым к энергонезависимой памяти в таких устройствах, как цифровые камеры, MP3 плееры и смартфоны. Тем не менее, определенные ограничения, связанные с ее скоростью, износом, потребляемой мощностью и объемом, заставляли исследователей обращаться к новым технологиям энергонезависимой памяти, таким как память с фазовым переходом (PCM/PRAM), флэш-память с ловушками заряда (CTF/SONOS), резистивная память (ReRAM), сегнетоэлектрическая память (FeRAM), магниторезистивная память (MRAM) и

KEITHLEY

общие методы и параметры. Подобная унификация позволяет исследователям измерять характеристики новых устройств памяти, изготовленных по самым новейшим технологиям, с помощью современного контрольно-измерительного оборудования. Независимо от типа исследуемой памяти основная методика измерения ее электрических характеристик заключается в подаче импульсного сигнала на ячейку при одновременном измерении напряжения и тока. Правильное понимание смысла параметров энергонезависимой

поскольку состояние ячейки флэш-памяти очень чувствительно к его уровню. Тем не менее, даже в научных исследованиях осциллографы применялись сравнительно редко, поскольку схема осциллографических измерений не подходит для измерения подаваемых импульсов и постоянного напряжения. Даже когда осциллографы использовались для измерения характеристик флэш-памяти, при подаче импульса можно было измерить только напряжение из-за сложности измерений переходного тока.

Исследователи искали интегрированный подход, позволяющий при подаче импульса на запоминающее устройство или исследуемый материал одновременно измерять и ток, и напряжение. Такая возможность была и раньше, но эта методика требовала применения нескольких приборов и написания программы, координирующей их работу. При этом всегда приходилось искать компромисс между стоимостью, производительностью и сложностью. Обычно такие специализированные системы создавались и обслуживались собственными специалистами, которые обладали необходимым опытом, квалификацией и временем для объединения различных приборов в работоспособную измерительную схему. Как правило, такие «доморожденные» системы были рассчитаны на решение только одной задачи, отличались ограниченными возможностями, сложностью управления и длительным временем обработки результатов измерения². Для измерения тока обычно использовалась образцовая нагрузка или резистивный датчик с осциллографом или дигитайзером. Этот метод хорошо проверен, но влияние нагрузки на напряжение, подаваемое на устройство, отрицательно сказывалось на результатах многих импульсных измерений. Кроме того, сопоставить результаты, полученные на разных системах, и обеспечить отслеживаемую калибровку на системном уровне было практически невозможно.



Рис. 1. Некоторые типы энергонезависимой памяти

т. д. (рис. 1). Международный комитет по определению основных тенденций развития полупроводниковой промышленности (ITRS) в 2010 г. рекомендовал уделять особое внимание исследованиям и разработкам еще двух технологий: памяти с передачей спинового момента (STT-MRAM) и окислительно-восстановительная память RRAM.¹

Каждый исследуемый в настоящее время материал или тип памяти отличается уникальными свойствами и характеристиками. К счастью, при общей оценке ячеек энергонезависимой памяти, созданных по различным вышеперечисленным технологиям, используются

памяти и методов ее тестирования гарантирует простую и быструю оценку характеристик ее ячеек даже в самых сложных случаях.

ЭВОЛЮЦИЯ МЕТОДОВ ТЕСТИРОВАНИЯ ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМОЙ ПАМЯТИ

Измерение электрических характеристик флэш-памяти с плавающим затвором традиционно выполнялось с помощью измерительных приборов постоянного тока, таких как источники-измерители (SMU), после того как импульсные генераторы записывали и/или стирали содержимое ячейки памяти. Для этого требовался коммутатор, попеременно подающий на тестируемое устройство постоянное напряжение или импульсный сигнал. Иногда для контроля характеристик импульсов, подаваемых на тестируемое устройство (длительность импульса, наличие выбросов, амплитуда, время нарастания/спада), использовались осциллографы. Измерение параметров импульса имеет очень важное значение,

1. Дж. Хатчбай и М. Гарнер, «Семинар и совещание рабочей группы ERD/ERM, посвященные оценке потенциала и готовности некоторых новых технологий памяти (6-7 апреля 2010 г.)», Международный комитет по определению основных тенденций развития полупроводниковой промышленности, 23 июля 2010 г. Ссылка: http://www.itrs.net/links/2010itrs/2010Update/ToPost/ERD_ERM_2010FINALReportMemoryAssessment_ITRS.pdf.

2. Л. Стауфер, «Эволюция методов сверхбыстрого измерения вольт-амперных характеристик», Keithley Instruments, Inc., официальный документ, 2011. Ссылка: <http://www.keithley.com/data?asset=55772>.

К счастью, возможности новой измерительной техники (рис. 2) позволили одновременно измерять ток и напряжение одним прибором при подаче точно контролируемых импульсов. Новые инструменты предоставляют исследователям дополнительные данные, позволяя им лучше понимать поведение материалов или устройств энергонезависимой памяти за меньшее время. Подача импульсов при одновременном измерении тока и напряжения с высокой частотой выборки позволяет глубже проанализировать электрические и физические явления, определяющие поведение памяти. Возможность измерять не только характеристики по постоянному току, но и переходные процессы позволяет получить фундаментальные сведения о свойствах материала и реакции устройства на различные сигналы.



Рис. 2. Новейшие измерительные приборы, такие как параметрический анализатор Keithley 4200-SCS в сочетании с высокоскоростным модулем измерения вольт-амперных характеристик 4225-RMU, упрощают оценку электрических характеристик разрабатываемых устройств энергонезависимой памяти за счет одновременного измерения тока и напряжения при подаче точно контролируемых импульсов

Измерение электрических характеристик крайне важно для лучшего понимания физических аспектов используемой технологии. Независимо от типа исследуемой памяти, для изучения ее поведения в процессе переключения необходима подача импульсных сигналов. Подача импульсных сигналов с одновременными измерениями параметров позволяет получить данные, необходимые для изучения динамических явлений при смене логического состояния ячейки. В разных технологиях памяти используются разные термины для описания схожих операций или методов. Например, для описания фундаментальной операции записи единицы и нуля используются термины «программирование/стирание», «установка/сброс» и «запись/стирание». Для имитации условий работы конечного изделия эти процедуры записи/стирания выполняются в импульсном режиме со скоростью, соответствующей номинальному режиму работы памяти.

ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ТЕСТИРОВАНИЮ ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМОЙ ПАМЯТИ

Вне зависимости от типа энергонезависимой памяти существуют общие требования к ее тестированию:

- Необходимость одновременного высокоскоростного измерения динамического тока и напряжения при тестировании памяти новых типов — с фазовым переходом или сегнетоэлектрической. Новые измерительные приборы обеспечивают одновременное измерение тока и напряжения в процессе подачи импульса, что очень важно, когда физическим механизмом сохранения информации является динамическое изменение сопротивления материала.
- Обеспечение амплитуды импульса, необходимой для записи и стирания содержимого ячейки памяти. Для записи в ячейку памяти с плавающим затвором может потребоваться импульс амплитудой 15-20 В или более. Вновь разрабатываемые типы памяти должны использовать напряжение 3-5 В, поскольку главной задачей развития энергонезависимой памяти является уменьшение уровня подаваемых на нее импульсов. Но опытные образцы, предшествующие пространственному масштабированию или оптимизации материала для серийного изделия, могут потребовать подачи импульсов 6-8 В. Для тестирования различных типов памяти могут потребоваться биполярные импульсы указанных выше уровней, хотя даже многие современные решения для импульсных измерений ВАХ не могут подавать столь высокие напряжения в биполярном режиме.

лов очень важна для импульсного измерительного прибора. Современные системы измерения импульсных ВАХ ограничивают выбросы и звоны в пределах 3%. Кроме импульсов с точным уровнем для тестирования новых типов энергонезависимой памяти требуются создаваемые и настраиваемые пользователем сложные сигналы. Например, для тестирования устройств ReRAM часто требуется подача импульсов со свипированием вверх и вниз по уровню при одновременном измерении тока. Для тестирования FeRAM необходима последовательность из четырех импульсов PUND (положительный, вверх, отрицательный, вниз). Для тестирования новых типов энергонезависимой памяти может потребоваться подача сложных импульсных сигналов, состоящих из сегментов произвольной формы, с необходимостью выполнения нескольких измерений в пределах каждого сегмента (рис. 3).

- Временные характеристики импульса, подаваемого измерительным прибором — время нарастания и спада, длительность — по-прежнему играют очень важную роль, особенно в свете общей тенденции повышения частоты импульсов и сокращения их длительности со 100 нс до 10 нс.
- По мере того как устройства энергонезависимой памяти становятся все компактнее, возникает потребность в измерении меньших токов при подаче импульсного напряжения, для чего необходим быстродействующий усилитель. Для минимизации паразитного влияния емкости кабеля и точного регулирования энергии, подаваемой

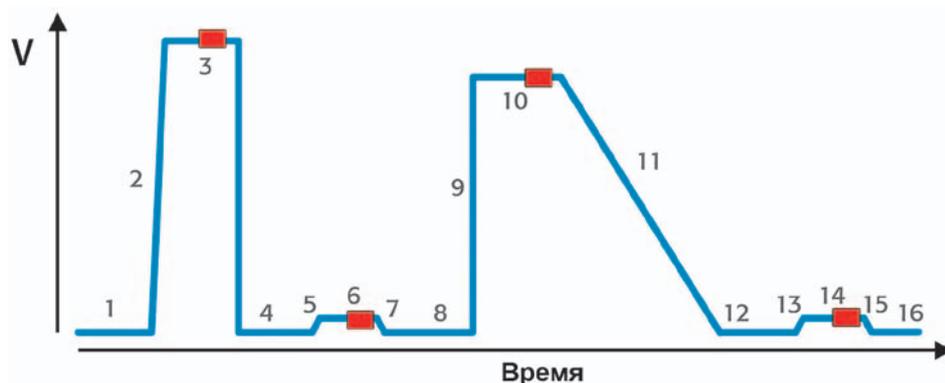


Рис. 3. Сложный импульсный сигнал, состоящий из 16 сегментов линейно меняющегося напряжения (серые цифры). Измерения выполняются в четырех точках (красные прямоугольники). Новые источники импульсов позволяют создавать многоэлементные сигналы, состоящие из нескольких импульсов, а также делать выборки тока и напряжения (не показано)

- Линейность амплитуды импульса очень важна, поскольку поведение памяти при изменении состояния носит нелинейный характер. Устройства памяти очень чувствительны к амплитуде импульса напряжения. На линейность амплитуды импульса влияют точность уровня и наличие звонов, выбросов и провалов. Минимизация этих звонов, выбросов и прова-

на тестируемое устройство, приходится использовать выносной импульсный усилитель, устанавливаемый в непосредственной близости от тестируемого устройства, особенно при измерении памяти с фазовым переходом (PCM) и ReRAM.

- Ограничение или регулирование тока очень важно при тестировании таких типов энергонезависимой памяти,

как ReRAM и PRAM. Обычно оно осуществляется в измерительных приборах постоянного тока и иногда реализуется в виде специальных импульсных схем. Нельзя утверждать, что ограничение тока в измерительных приборах постоянного тока обеспечивает достаточно быстрое регулирование, отвечающее типовым требованиям. Для регулирования импульсного тока желательно установить устройство управления как можно ближе к тестируемому устройству для предотвращения разряда паразитной емкости соединительного кабеля в тестируемое устройство.

- Огромную роль играет способность системы быстро переключаться между импульсными приборами и приборами постоянного тока. Переключение источника-измерителя в режим постоянного тока позволяет измерять соответствующие параметры запоминающего устройства, что важно для флэш-памяти и памяти других типов. Кроме переключения из импульсного режима в режим постоянного тока, для тестирования флэш-памяти полезна возможность переключить один или нескольких каналов в высокоимпедансное состояние. Это высокоимпедансное состояние используется на этапе стирания в ходе цикла

записи/стирания памяти при испытаниях на износ. Это значит, что переключение должно выполняться достаточно быстро, чтобы попадать в промежутки между импульсами записи и стирания и обеспечивать очень большое число циклов записи/стирания за короткий интервал времени. Подобным переключением должен управлять непосредственно импульсный генератор, а схема, выполняющая это переключение, должна находиться внутри импульсного прибора. Обычно это переключение выполняется полупроводниковым реле в каждом импульсном канале.

- Синхронизация каналов необходима для тестирования устройств энергонезависимой памяти, требующих нескольких каналов подачи и измерения импульсов. Традиционные импульсные приборы было трудно синхронизировать, но современная аппаратура для измерения импульсных ВЧ поддерживает подачу синхросигналов на внешние устройства или автоматическую синхронизацию с внешними устройствами по получаемым от них синхросигналам.

Разработка новых материалов и типов устройств энергонезависимой памяти требует измерения электрических характеристик, которые раньше или во-

обще не измерялись, или измерялись с помощью контрольно-измерительных систем собственной разработки, обладавших ограниченными возможностями. Сегодня появились новые измерительные приборы, которые подают импульсы и одновременно выполняют измерения. Они позволяют исследовать поведение энергонезависимой памяти в момент изменения логического состояния ячейки, что имеет ключевое значение для понимания ее характеристик.

Для более глубокого изучения проблем, связанных с измерением характеристик энергонезависимой памяти, скачайте бесплатно рекомендацию по применению Keithley № 3141 «Импульсные измерения вольт-амперных характеристик энергонезависимой памяти» по ссылке www.keithley.com/data?asset=56338. 

Emerging NVM materials and device types require electrical characterization that traditionally has not been available or required custom in-house test systems, which had limited capabilities. New instrumentation is now available that provides pulse sourcing with simultaneous measurement that permits characterization of the underlying switching behavior that is key to understanding NVM performance.

НОВОСТИ на www.kipis.ru

НОВЫЕ АНАЛОГОВЫЕ СВЧ ГЕНЕРАТОРЫ СИГНАЛОВ

Компания **Agilent Technologies Inc.** представила две новые модели генераторов сигналов, которые обеспечивают превосходные характеристики по фазовым шумам, выходной мощности и скорости переключения частоты. Новые аналоговые СВЧ генераторы сигналов **N5183B MXG** и **N5173B EXG** дополняют флагманские модели генераторов серии **PSG E8267D** (векторный генератор) и **E8257D** (аналоговый генератор), предоставляя возможность выбора оптимального решения по габаритным размерам, быстрдействию и стоимости.



 Agilent Technologies

Прецизионный аналоговый генератор спектрально чистых сигналов **N5183B MXG** представляет собой альтернативу высокопроизводительному генератору **PSG**. Генератор **MXG** имеет высоту всего 2U, но при этом гарантирует высокую точность, производительность и уровень характеристик, близкий к показателям генераторов серии **PSG**. Имея лучшие в своем классе характеристики по фазовым шумам (-124 дБн/Гц на частоте

10 ГГц при отстройке 10 кГц) и паразитным составляющим (-75 дБн), прибор позволяет выполнять тестирование устройств на системном и модульном уровне в диапазоне частот до 40 ГГц. Благодаря самой высокой в данной категории приборов скорости переключения (менее 600 мкс) генератор **MXG** обеспечивает существенное сокращение сроков калибровки сложных систем.



 Agilent Technologies

Недорогой аналоговый генератор сигналов **N5173B EXG** является лучшим вариантом в случаях, когда разработчикам измерительной системы необходимо выбрать решение с оптимальным соотношением стоимости прибора и его производительности. Обеспечивая наилучшее сочетание высокой выходной мощности (+20 дБм на частоте 20 ГГц) и низкого уровня гармоник (менее -55 дБн), генератор **EXG** отлично подходит для определения характеристик широкополосных СВЧ компонентов, например, фильтров и усилителей. Прибор охватывает диапазон частот до 40 ГГц и поддерживает функцию блокировки непрерывного гармонического сигнала при тестировании приемников или базовое

преобразование с повышением частоты гетеродина для магистральных СВЧ каналов связи.

Снижение стоимости эксплуатации генераторов сигналов **MXG** и **EXG** достигается за счет высокой надежности, а также простоты калибровки, технического обслуживания и ремонта. Рекомендованный трехлетний межкалибровочный интервал и стратегия самообслуживания помогают снизить расходы, связанные с поддержанием прибора в работоспособном состоянии, и увеличить время безотказной работы.

Генераторы сигналов серии **PSG** являются эталоном производительности и самыми популярными СВЧ генераторами сигналов в отрасли: тысячи этих приборов используются в сотнях проектов по всему миру. Они способны генерировать спектрально чистые непрерывные сигналы в диапазоне частот до 70 ГГц, сигналы мощностью до 1 Вт (+30 дБм), сложные сигналы с векторной модуляцией в диапазоне частот до 44 ГГц с полосой модулирующих частот до 2 ГГц и многое другое. Благодаря чрезвычайно низкому уровню фазовых шумов (менее -126 дБн/Гц на частоте 10 ГГц при отстройке 10 кГц) генераторы **PSG** могут использоваться в качестве эталонного источника сигналов в метрологических лабораториях.

www.agilent.ru