

# Основы импульсного режима тестирования новых типов энергонезависимой памяти

Питер Дж. Халберт, **Keithley Instruments, Inc.**  
 Материал предоставлен ООО «Универсал Прибор»

В статье описываются основные принципы измерения параметров различных видов энергонезависимой памяти и некоторые требования к измерительным приборам, предназначенным для проведения таких измерений. Показано, что использование специализированных измерительных систем позволяет с меньшими затратами производить тестирование, получая при этом результаты, более пригодные для сравнения характеристик различных типов памяти.

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 т.д. (см. рис. 1). Международный комитет по определению направлений развития полупроводниковой промышленности (ITRS) в 2010 г. рекомендовал уделить особое внимание исследованиям и разработкам еще двух технологий: памяти с передачей спинового

момента (STT-MRAM) и окислительно-восстановительной памяти (RRAM) [1].

Каждый исследуемый в настоящее время тип памяти отличается уникальными свойствами и характеристиками. К счастью, при общей оценке ячеек энергонезависимой памяти, созданных по различным технологиям, используются одни и те же параметры и методы их измерения. Подобная унификация позволяет исследователям измерять характеристики устройств памяти, изготовленных по новейшим технологиям, с помощью уже существующего контрольно-измерительного оборудования. Независимо от типа исследуемой памяти основная методика измерения заключается в подаче импульсного сигнала на ячейку с одновременным измерением напряжения и тока (то есть в получении импульсной вольт-амперной характеристики). Правильное понимание смысла параметров энергонезависимой памяти и методов ее тестирования гарантирует простую и быструю оценку 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 и амплитуда импульса, наличие выбросов, время нарастания/спада), использовались осциллографы. Очень важно измерение параметров импульса, поскольку они сильно влияют на состояние ячейки флэш-памяти. Тем не менее, даже в научных исследованиях осциллографы применялись сравнительно редко, поскольку осциллографическая схема измерений плохо подходит для точного измерения параметров импульсов и постоянного напряжения. Даже в тех случаях, когда осциллографы всё-таки использовались, при подаче импульса можно было измерить только напряжение из-за сложности измерений переходного тока.

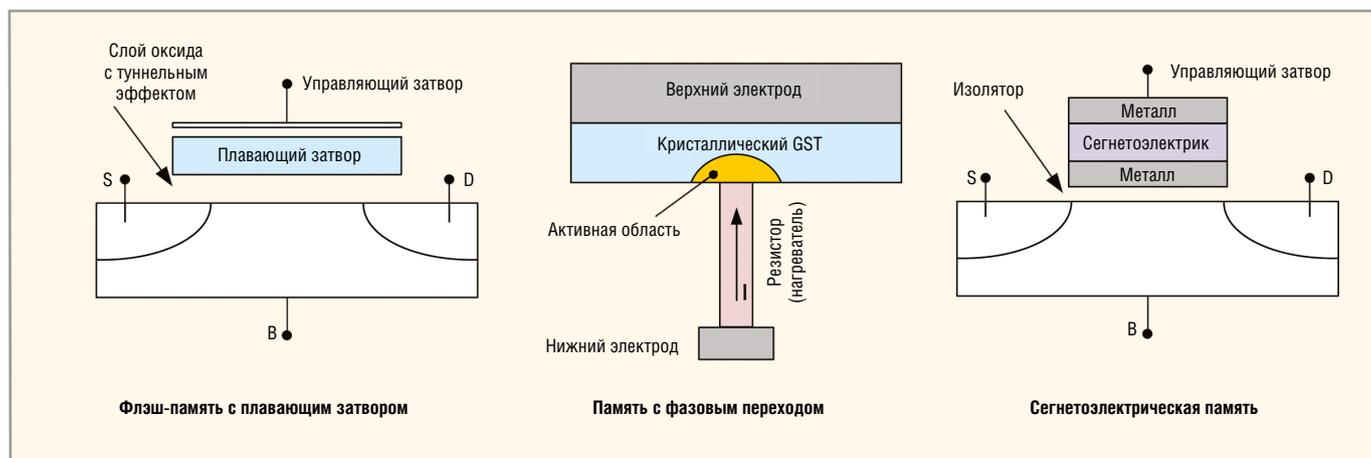


Рис. 1. Некоторые типы энергонезависимой памяти

Исследователи искали интегрированный подход, позволяющий при подаче импульса на запоминающее устройство или исследуемый материал одновременно измерять и ток и напряжение. Такая возможность существовала и раньше, но при этом требовалось применение нескольких приборов и программы, координирующей их работу. При этом всегда приходилось искать компромисс между стоимостью, производительностью и сложностью измерительной установки. Обычно такие специализированные системы создавались и обслуживались собственными специалистами, обладающих большим опытом, высокой квалификацией и временем для объединения различных приборов в работоспособную измерительную схему. Как правило, такие «доморощенные» системы были рассчитаны на решение только одной задачи, отличались ограниченными возможностями, сложностью в управлении и длительным временем обработки результатов измерения [2]. Для измерения тока обычно использовались образцовая нагрузка или резистивный датчик с осциллографом или АЦП. Этот метод хорошо проверен, но влияние нагрузки на напряжение, подаваемое на устройство, отрицательно сказывалось на точности измерений. Кроме того, сопоставить результаты, полученные на разных системах, и обеспечить отслеживаемую калибровку на системном уровне было практически невозможно.

К счастью, некоторые новые измерительные приборы обладают способностью генерировать импульсные сигналы с точно заданными параметрами и одновременно измерять ток и напряжение. Например, параметрический анализатор Keithley 4200-SCS, в сочетании с высокоскоростным модулем измерения вольт-амперных характеристик 4225-PMU, упрощает оценку электрических характеристик разрабатываемых устройств энергонезависимой памяти за счет одновременного измерения тока и напряжения при подаче точно контролируемых импульсов (см. рис. 2).

Такие инструменты предоставляют в распоряжение исследователей больший объем данных, позволяя с меньшими затратами времени лучше понять поведение материалов или запоминающих устройств. Формирование импульсов при одновременном измерении тока и напряжения с высокой частотой

той выборки позволяет глубже проанализировать электрические и физические явления, определяющие поведение ячеек памяти. Возможность же исследовать не только характеристики по постоянному току, но и переходные процессы позволяет получить фундаментальные сведения о свойствах материала и реакции устройства на различные сигналы.

Измерение электрических характеристик крайне важно для лучшего понимания физических аспектов используемой технологии. Для изучения поведения ячеек памяти любого типа в процессе переключения необходима подача импульсных сигналов, которая с одновременными измерениями параметров позволяет тщательно изучить динамические процессы при смене логического состояния ячейки. Для имитации условий работы конечного изделия процедуры записи информации должны выполняться в импульсном режиме со скоростью, соответствующей номинальному режиму работы памяти. При задании режимов измерения следует учитывать, что для описания схожих операций или методов в различных типах памяти могут использоваться несовпадающие термины. Например, для описания базовой операции записи единицы и нуля могут использоваться термины: «программирование/стирание», «установка/сброс» или «запись/стирание».

### ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ТЕСТИРОВАНИЮ ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМОЙ ПАМЯТИ

Существуют общие требования к оборудованию для тестирования энергонезависимой памяти, не зависящие от ее типа.

1. При тестировании памяти новых типов – с фазовым переходом или сегнетоэлектрической – необходимо одновременно и с высокой скоростью измерять ток и напряжение в динамическом режиме. Это вызвано тем, что запоминание информации в них основано на динамическом изменении сопротивления материала. Возможность таких измерений обеспечивается новыми типами измерительных приборов, обеспечивающих одновременное измерение тока и напряжения в процессе подачи программирующего импульса.

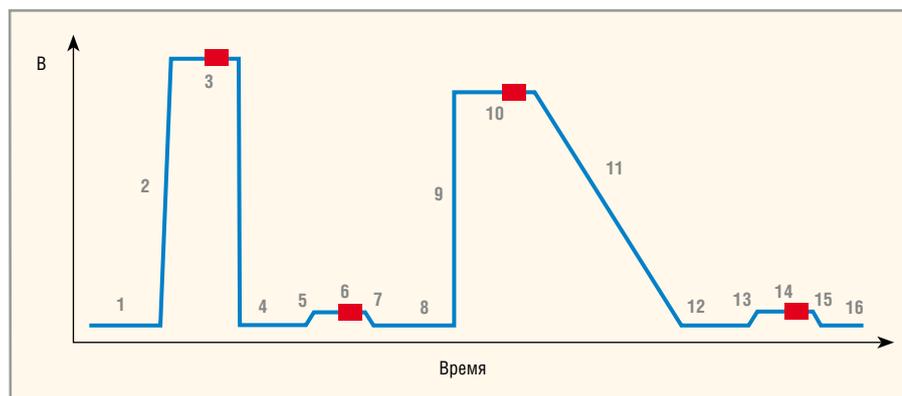
2. Необходимо формирование импульсов с заданной амплитудой, требуемой для записи и стирания содержимо-



Рис. 2. Параметры чешский анализатор Keithley 4200-SCS с высокоскоростным модулем измерения вольт-амперных характеристик 4225-PMU

го ячейки памяти. Для записи в ячейку памяти с плавающим затвором (традиционная флэш-память) может потребоваться импульс амплитудой 15...20 В и даже более. Вновь разрабатываемые типы памяти должны использовать напряжение 3...5 В, поскольку одной из главных задач при совершенствовании энергонезависимой памяти является уменьшение уровня подаваемых на нее импульсов. Однако для опытных образцов, предшествующих пространственному масштабированию или оптимизации материала для серийного производства, может потребоваться подача импульсов с амплитудой 6...8 В. Кроме того, для некоторых типов памяти могут потребоваться двуполярные импульсы указанных выше уровней, хотя большинство современных измерительных приборов для импульсных измерений ВАХ не рассчитаны на формирование двуполярных импульсов большой амплитуды.

3. Очень важно обеспечение точности поддержания заданной формы импульсов, поскольку поведение памяти при изменении состояния носит нелинейный характер. Устройства памяти очень чувствительны к амплитуде импульса напряжения. На форму импульса влияют погрешности задания амплитуды и наличие звона, выбросов и провалов, минимизация которых очень важна. Современные приборы для измерения импульсных ВАХ гарантируют уровень выбросов и звона не более 3 % от амплитуды импульса. Помимо формирования прямоугольных импульсов с точно заданной амплитудой для тестирования новых видов энергонезависимой памяти зачастую требуются сигналы сложной формы, задаваемой исследователем. Например, для тестирования ReRAM часто требуется подача импульсов с плавно изменяющимся



**Рис. 3. Сложный импульсный сигнал, состоящий из 16 сегментов линейно меняющегося напряжения**

уровнем при одновременном изменении 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. На рисунке 3 показан сложный импульсный сигнал, состоящий из 16 сегментов линейно меняющегося напряжения (серые цифры). Измерения выполняются в четырех точках (красные прямоугольники). Новые генераторы импульсов позволяют создавать многосегментные сигналы, состоящие из нескольких импульсов, а также производить мгновенные измерения тока и напряжения.

### Временные характеристики

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 размеры ячеек энергонезависимой памяти становятся все меньше, возникает потребность в измерении меньших токов при подаче импульсного напряжения, для чего необходим быстродействующий усилитель. Для минимизации паразитного влияния емкости соединительного кабеля и точного регулирования энергии импульса приходится использовать выносной импульсный усилитель, устанавливаемый в непосредственной близости от тестируе-

мого устройства, особенно при изменении памяти с фазовым переходом (PCM) и ReRAM.

Ограничение или регулирование тока очень важно при тестировании таких типов энергонезависимой памяти, как ReRAM и PRAM. Проще всего оно реализуется в измерительных приборах постоянного тока и значительно сложнее (и реже) – в импульсных устройствах, требуя при этом дополнительных схем управления. При этом зачастую ограничители тока в измерительных приборах постоянного тока не обеспечивают достаточной скорости регулирования, соответствующей требованиям, предъявляемым конкретным типом памяти. Для регулирования импульсного тока желательно установить устройство управления как можно ближе к тестируемому устройству с целью предотвращения влияния паразитной емкости соединительного кабеля.

Огромную роль играет способность системы быстро переключаться между режимом измерения на постоянном токе и импульсным режимом. 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 желательна возможность переключения одного или нескольких каналов в высокоимпедансное состояние, которое 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 промежуток 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 канале генерации и измерения параметров импульсов.

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 ВАХ поддерживает подачу синхросигналов на внешние устройства или автоматическую синхронизацию с внешними устройствами по получаемым от них синхросигналам.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка новых материалов и типов устройств энергонезависимой памяти требует измерения электрических характеристик, которые раньше или вообще не выполнялись или выполнялись 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.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Хатчбай Дж. и Гарнер М. 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. [http://www.itrs.net/links/2010itrs/2010Update/ToPost/ERD\\_ERM\\_2010FINALReportMemoryAssessment\\_ITRS.pdf](http://www.itrs.net/links/2010itrs/2010Update/ToPost/ERD_ERM_2010FINALReportMemoryAssessment_ITRS.pdf).
2. Стауфер Л. Эволюция методов сверхбыстрого измерения вольт-амперных характеристик. Keithley Instruments, Inc. Официальный документ. 2011. <http://www.keithley.com/data?asset=55772>.

