

Применение генераторов импульсов серии АКИП-3309 для тестирования полупроводников

О. Котельник¹

УДК 621.373.1 | ВАК 05.11.00

Спектр применения генераторов импульсов весьма широк. В частности, они применяются для тестирования полупроводниковых устройств и исследования характеристик материалов. Достаточно молодая, но зарекомендовавшая себя с лучшей стороны компания Active Technologies (Италия) в сотрудничестве с ведущими производителями контрольно-измерительного оборудования – LeCroy и Tektronix – разработала генераторы сигналов специальной формы ArbStudio и AWC4062, предназначенные для тестирования широкого спектра устройств. В Россию продукция компании (генераторы произвольной формы, генераторы импульсов и логические анализаторы) поставляется под торговой маркой АКИП. Рассмотрим примеры применения генераторов импульсов АКИП-3309, которые обеспечивают точное задание амплитуды и длительности импульсов, а также гибкое управление импульсными последовательностями, для тестирования ячеек энергонезависимой памяти и МОП-транзисторов. В состав серии АКИП-3309 входят две модели: 2-канальная АКИП-3309/1 и 4-канальная АКИП-3309/2.

ТЕСТИРОВАНИЕ ЯЧЕЕК ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМОЙ ПАМЯТИ

Сегодня проводятся исследования нескольких типов энергонезависимой памяти, сочетающих высокую скорость записи-считывания, присущую ОЗУ, с возможностью длительного хранения данных. Примерами могут служить FeRAM (ферроэлектрическая память), ReRAM (резистивная память), MRAM (магниторезистивная память), STT-MRAM (магниторезистивная память с использованием технологии переноса спинового момента) и PCM (память на основе фазового перехода). Технологии основаны на изменении проводимости материалов с использованием различных физических принципов, например, формирования и разрушения тонкого проводника в структуре, состоящей из нескольких слоев материалов; изменении фазового состояния материала из аморфного в поликристаллическое; изменении ориентации магнитного поля.

Рассмотрим тестирование ячеек энергонезависимой памяти на примере MRAM- и PCM-памяти.

Для хранения информации в MRAM-памяти используются магнитные туннельные переходы (Magnetic Tunnel Junction – MTJ), которые состоят из двух ферромагнитных слоев, разделенных тонким слоем диэлектрика.

Электроны могут туннелировать из одного слоя в другой через диэлектрик. Ориентация магнитного поля одного из ферромагнитных слоев постоянна, в то время как ориентация другого слоя может меняться под действием внешнего электрического поля (рис. 1). Чтобы записать или стереть бит данных, к такой структуре необходимо приложить импульс тока. Смена ориентации магнитного поля меняет проводимость структуры.

Эффективность процессов записи и стирания зависит от длительности и амплитуды приложенных к ячейке памяти импульсов, поэтому на этапах исследований

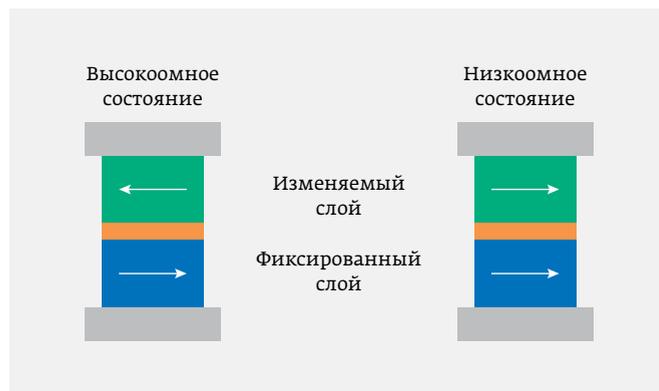


Рис. 1. Структура ячейки MRAM-памяти

¹ АО «ПриСТ», kotelnik@prist.ru.



Рис. 2. Меню установки параметров импульсов генератора АКИП-3309 для записи-стирания одной ячейки: длительность 50 нс, амплитуда 3,3 В

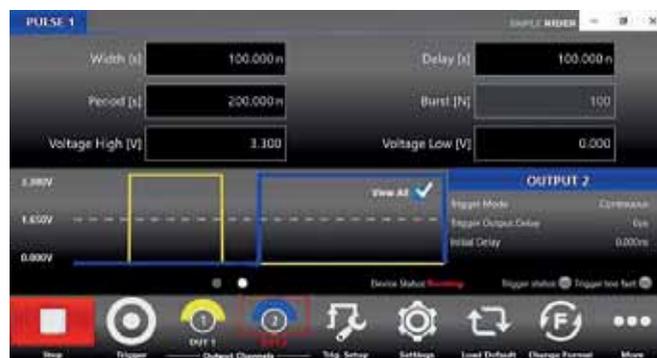


Рис. 3. Меню установки параметров импульсов генератора АКИП-3309 для записи-стирания массива ячеек: длительность 100 нс, амплитуда 3,3 В

и разработки устройств на основе MRAM-памяти тестируют различные комбинации параметров импульсов. Генераторы АКИП-3309, которые позволяют регулировать ширину, амплитуду и частоту повторения импульсов, дают возможность легко и быстро настраивать режимы и условия эксперимента (рис. 2–3).

PCM-память основана на уникальном свойстве халькогенидов, которые могут переходить из одного фазового состояния в другое – из кристаллического в аморфное и обратно. Фазовые состояния халькогенида различаются электрическим сопротивлением: для аморфного состояния характерно высокое сопротивление, для кристаллического – низкое. Чтобы записать или стереть бит данных, необходимо изменить фазовое состояние материала: импульс большой длительности, но малой амплитуды меняет аморфное состояние на кристаллическое, и наоборот, короткий импульс большой амплитуды меняет фазу с кристаллической на аморфную (рис. 4).

Как видно на рис. 4, возможность точного управления амплитудой и длительностью импульсов – важнейшее условие проведения экспериментов на ячейках PCM-памяти. По мере развития новейших технологий, используемых при создании энергонезависимой памяти, ужесточаются требования к параметрам импульсных последовательностей. Генераторы импульсов Active Technologies серии АКИП-3309 обеспечивают максимальное временное разрешение 10 пс, разрешение по вертикали от 10 мВ, время нарастания импульсов от 70 пс и амплитуду до 5 В_{п-п} (рис. 5–6). Поэтому они идеально подходят для такого рода приложений.

ТЕСТИРОВАНИЕ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ

В современных МОП-транзисторах в качестве подзатворных диэлектриков применяются материалы с диэлектрической проницаемостью – большей, чем у диоксида кремния (так называемые High-K-материалы). При их использовании значительно снижается ток утечки через диэлектрик, но в то же время появляются проблемы, обусловленные захватом заряда, из-за чего возникает нестабильность порогового напряжения, приводящая к деградации канала проводимости. В итоге снижается надежность устройства.

Захват заряда происходит, когда транзистор находится в открытом состоянии, и часть заряда в канале накапливается в слое диэлектрика, создавая встроенный потенциал поля, который изменяет пороговое напряжение. Эффективность захвата зарядов зависит не только от физических параметров подзатворного материала, таких как толщина

диэлектрика, но и от его диэлектрической проницаемости. Чем она выше, тем больше зарядов может накопиться в слое диэлектрика, что приводит к нестабильности порогового напряжения и, следовательно, к деградации канала проводимости. В итоге снижается надежность устройства.

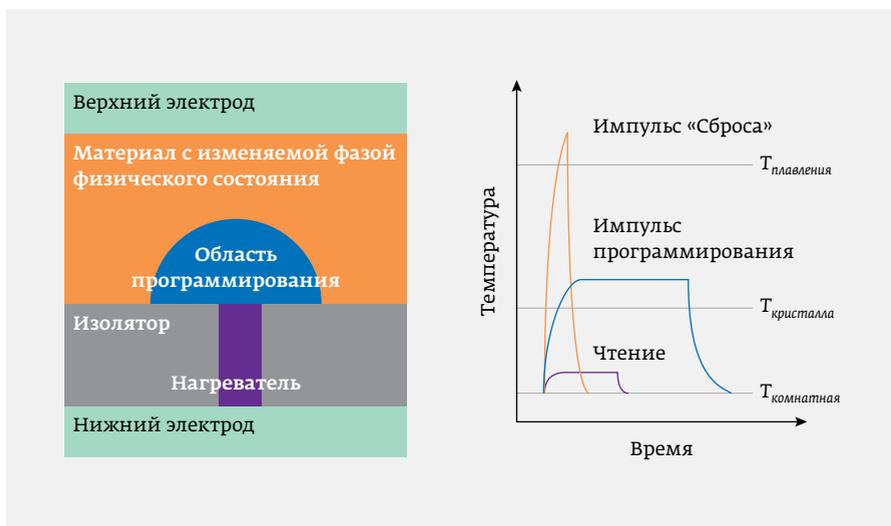


Рис. 4. Программирование ячейки PCM-памяти



Рис. 5. Меню установки параметров импульсов генератора АКПП-3309: импульс сброса 10 нс / 3,3 В



Рис. 6. Меню установки параметров импульсов генератора АКПП-3309: импульс установки 80 нс / 1,6 В

и тип диэлектрика, технологического процесса, но и от напряжения на затворе и параметров приложенной к затвору импульсной последовательности. Важно понимать механизм захвата заряда, чтобы совершенствовать технологию.

Учитывая, что порядок временных параметров процессов, исследуемых при захвате заряда, варьируется от долей мкс до десятков мс, а напряжение на затворе нестабильно, для тестирования High-K-МОП-транзисторов применяют различные виды импульсных измерений вольт-амперных характеристик (рис. 7).

В зависимости от параметров импульсного напряжения, приложенного к затвору МОП-транзистора, различают три метода измерения ВАХ (зависимости тока стока I_d от напряжения на затворе V_g) (рис. 8):

Ключевые особенности генераторов импульсов серии АКПП-3309:

- длительность фронта / среза: не более 100 пс (не превышает 70 пс на уровне 20–80%);
- максимальный выходной уровень: до 5 В_{п-п} на нагрузке 50 Ом;
- регулировка смещения ± 2,5 В;
- минимальная длительность импульса 300 пс;
- формирование одиночного, парных импульсов, последовательности из трех и четырех импульсов, формирование пакета импульсов, последовательность тактовых импульсов;
- максимальная частота: до 500 МГц (в режиме «четыре импульса» / quadruple);
- регулируемая задержка между основным и синхроимпульсом с разрешением 10 пс;
- высокая точность установки временных параметров: $5 \cdot 10^{-6}$;
- графический LCD-дисплей, диагональ 17,8 см, емкостная сенсорная панель.

- **ВАХ в режиме постоянного тока:** к затвору прикладывается постоянное напряжение, ВАХ строится путем многократных последовательных измерений, а результаты зависят от эффекта захвата заряда из-за смещения в диэлектрике. Данный вид измерений неприменим для исследования транзисторов, которые переключаются с высокой скоростью;
- **ВАХ в режиме быстрых импульсов:** используя короткие импульсы (длительностью единицы нс) с крутыми фронтами, можно исследовать собственные характеристики устройства, поскольку заряд не успевает накапливаться в диэлектрике. Повторяя измерения для различных точек смещения, можно построить искомую ВАХ. Данный вид измерений не позволяет оценить эффект захвата заряда;
- **ВАХ в режиме медленных импульсов:** используются широкие импульсы (длительностью порядка мкс) с плавно нарастающими фронтами. В случае, если фронт импульса нарастает достаточно

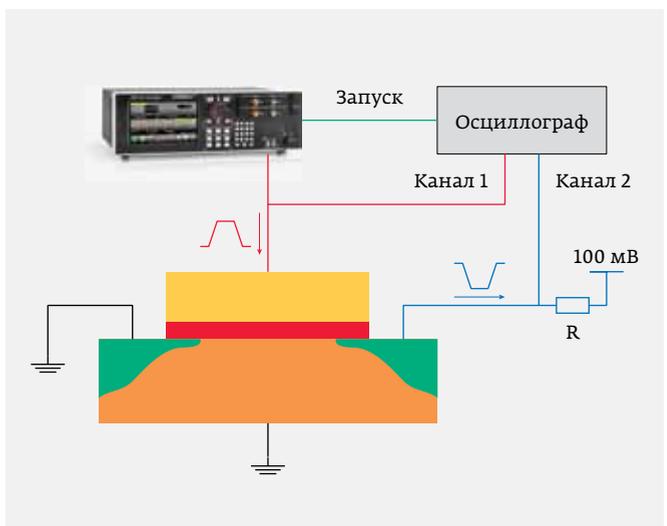


Рис. 7. Схема измерения ВАХ МОП-транзисторов

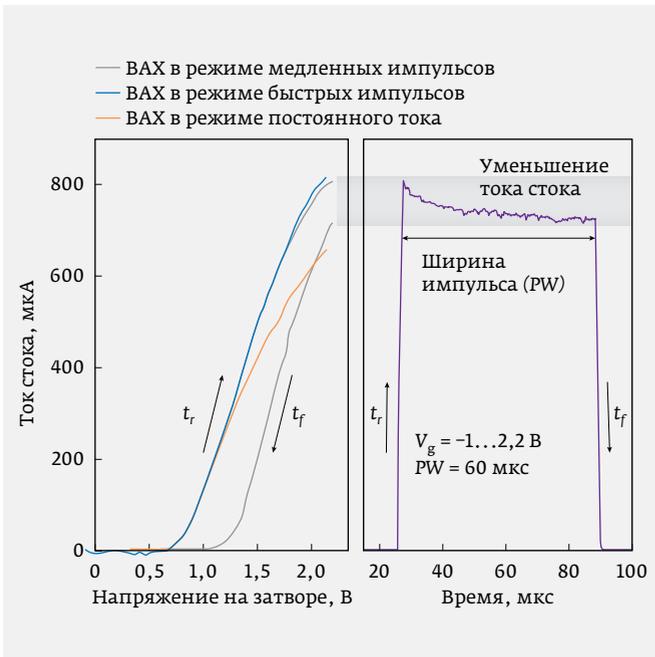


Рис. 8. Методы измерения ВАХ

быстро, можно получить корректную ВАХ устройства, поскольку заряд не успевает накапливаться в МОП-структуре. Использование широких импульсов позволяет оценить изменение тока стока с течением времени и проанализировать эффект захвата заряда. Если целью является исследование эффекта захвата заряда в определенной точке смещения, то скорость нарастания фронта сигнала не имеет значения, важно, чтобы фронт был достаточно быстрым. Если фронты достаточно резкие, то полученные результаты в данной точке смещения сопоставимы с результатами измерений в двух режимах – при постоянном напряжении и в режиме коротких импульсов, поскольку сразу после подачи импульса напряжения на затвор МОП-транзистора ток стока равен величине, измеренной в импульсном



Рис. 9. Меню установки параметров импульсов генератора АК ИП-3309 в режиме коротких импульсов: смещение -1 В, амплитуда 3,2 В, ширина импульса 30 нс, однократный запуск



Рис. 10. Меню установки параметров импульсов генератора АК ИП-3309 в режиме длинных импульсов: смещение 0 В, амплитуда 1,6 В, ширина импульса 60 мкс, однократный запуск

режиме. А затем ток стока, постепенно уменьшаясь, достигает значения, измеренного при постоянном токе (см. рис. 8). Метод медленных импульсов также подходит для прогнозирования срока службы устройства путем оценки изменения захваченного в диэлектрике заряда до и после переключения транзистора.

Генераторы Active Technologies серии АК ИП-3309 обеспечивают формирование импульсов со следующими параметрами: фронт от 70 пс, размах до 5 В_{п-п}, постоянное смещение ±2,5 В, длительность импульса от 300 пс до 8 с (рис. 9–10). Таким образом, эти приборы – идеальный инструмент для исследования ВАХ МОП-транзисторов в режимах быстрых и медленных импульсов.

ЛИТЕРАТУРА

Pulse Rider PG-1000 Series. Pulse Generator for Semiconductor Applications – Active Technologies Application Note