

И. В. Слободян

СКОРОСТЬ ПРОГРАММИРОВАНИЯ ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМОЙ ПАМЯТИ НА БАЗЕ ХСП

Проведено исследование влияния ряда факторов на скорость программирования энергонезависимой памяти (ЭНП) на базе халькогенидных стеклообразных полупроводников (ХСП). Описан метод определения скорости программирования включения устройства (кристаллизация, низкоомное состояние) и выключения (аморфизация, высокоомное состояние). Также показано, что скорость включения (выключения) ЭНП в основном зависит от электрического контакта устройства.

Ключевые слова: изменение фазы, скорость включения-выключения, кристаллизация-аморфизация.

Введение

Энергонезависимая память на базе ХСП (ЭНП) меняет фазовое состояние из высокоомного на низкоомное и наоборот под действием электрического сигнала. Считается, что такая ЭНП может в перспективе заменить существующие виды энергонезависимой памяти, даже те, которые имеют высокую скорость обмена информацией и стабильность работы, и превзойти их характеристики. Халькогенидный стеклообразный полупроводник (ХСП), используемый в данной ЭНП не имеет фундаментальных ограничений скорости перезаписи (до суб-наносекунд) и в размерах ячеек памяти (ЯП) (до 50 ангстрем). К преимуществам можно отнести и то, что достигнутый уровень тока перезаписи не повреждает память и не уменьшает циклов перезаписи, как это было в первых образцах памяти.

Технология фазовых изменений в ХСП (GeSbTe), которую изобрёл и развил Стэн Овшински, быстро приобрела коммерциализацию в области энергонезависимой памяти [1]. Усилия многих научных групп ускорили этот процесс [2]. Проводимость, а не рефлексивность является главной характеристикой изменения фазы сплава данного полупроводника, что в конце и стало главной причиной избрания ХСП базовым материалом для нового поколения ЭНП. Различные композитные сплавы ХСП, которые используются для ЭНП, имеют гораздо более широкий спектр, чем для оптических приборов персонального компьютера (ПК) [3].

Технология ЭНП для ПК основана на фазовых превращениях в среде полупроводника с объемной отрицательной дифференциальной проводимостью S-типа (S-ОДС), которая существует благодаря высокой плотности нитей тока, и именно это приводит к изменению фазового состояния полупроводника [4]. Существует общепринятая точка зрения, что нить тока в устройстве ЭНП хорошо сформирована и ее динамическое сопротивление равно нулю. Таким образом, любое отклонение от 0, измеренное на приборе (dU/dI при диапазоне тока перезаписи), обусловлено общей суммой всех резисторов в серии между зондами, включая сопротивление контактов.

В оптической памяти энергия программирования (записи, стирания, перезаписи) прикладывается непосредственно к поверхности устройства хранения информации с помощью лазерного луча. А в приборах электрической памяти энергия передается с помощью электрического сигнала, проходящего через металлические или полуметаллические контакты [2, 4]. Материал из S-ОДС повышает роль неоднородностей и имеет возможность сохранять стабильные состояния низкого и высокого сопротивления без приложения внешней энергии [4].

Зная материал контактов и геометрию прибора, ВАХ переключения ЭНП часто совпадает с практически полученными значениями сопротивления контактов и не зависит от толщины и температуры халькогенидов. Некоторые изменения значений ВАХ, которые могут случаться, вызваны изменениями входного и выходного сопротивлений интерфейса прибора.

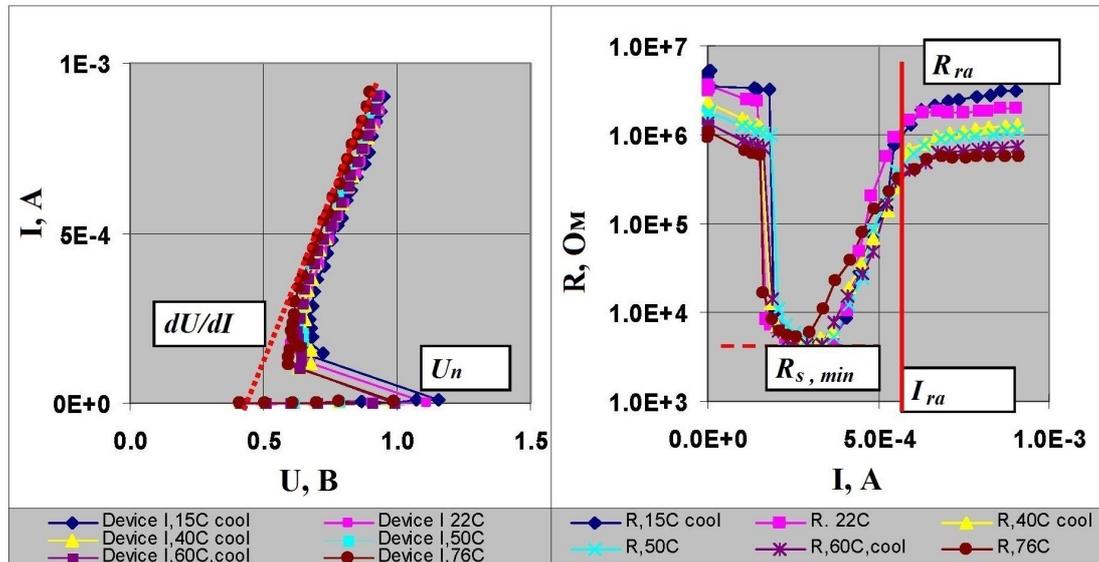


Рис. 1. ВАХ типовой ЭНП на базе ХСП типа BDL образца сплава № 225 ($Ge_2Sb_2Te_5$) с углеродными (карбоновыми) контактами

На рис. 1 показаны типичные зависимости сопротивления от тока (R/I) и тока от напряжения (I/U , ВАХ) для ЭНП при различных значениях температуры. Такие приборы имеют тип «пробой», что описано в работе [2]. Все последующие данные взяты из опубликованных результатов практического моделирования в ознакомительных целях для получения конкретных выражений. Текущее значение насыщенного (I_{ra} , красная линия) сопротивления выключения (R_r) и значение сопротивления в кривой минимумов зависимости R/I (пунктирная линия) показывает сопротивление включения (R_s), полученное на основании электрического низкополевого измерения суммы всех резисторов между зондами – R_s и сопротивлений контактов – dU/dI . Следовательно, минимальное сопротивление халькогенидного материала в ЯП:

$$R_{ХСП\ min} = R_{s\ min} - dU/dI, \quad (1)$$

где dU/dI измеряют по наклону кривой зависимости I/U от 50% до 100% тока отключения (стирание) в связи с возможной нелинейностью процесса.

Целью этой статьи является исследование влияния уровня тока перезаписи, изменения фазы композитного сплава образца и его толщины, материалов контакта электродов, геометрии прибора и температуры на скорость программирования ЭНП.

Экспериментальная часть

ЭНП работают на основе теории «пробой» с образованием структуры канальцев тока, что ведет к изменению проводимости. Вся информация о современных устройствах с использованием халькогенидов в качестве запоминающего слоя, который изготавливают электронно-лучевой литографией (ЭЛЛ) с образованием слоя электрического пробоя (BDL - break-down layer), имеет экспериментальное происхождение [3].

Метод измерения скорости выключения. Скорость стирания памяти обычно измеряют применением оптимизированных электрических импульсов включения и изменения продолжительности оптимизированных импульсов выключения, как показано на рис. 2.

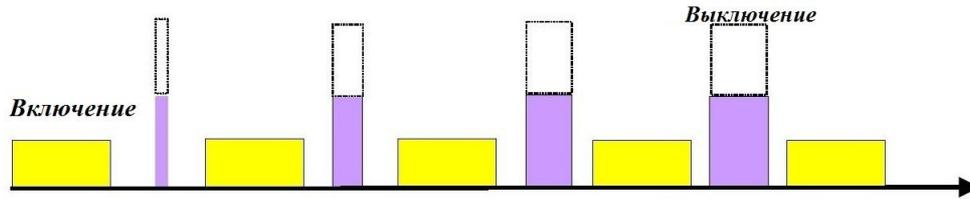


Рис. 2. Схема теста скорости стирания; фиксированные импульсы включения (длительность и амплитуда) и выключения (амплитуда)

Оптимизированные амплитуды рассчитывают на основе данных, полученных с измеренной ВАХ реального устройства. Причем информацию собирают с ее амплитудных значений в качестве параметров путем изменения длительности импульса стирания от 10 нс до 500 нс.

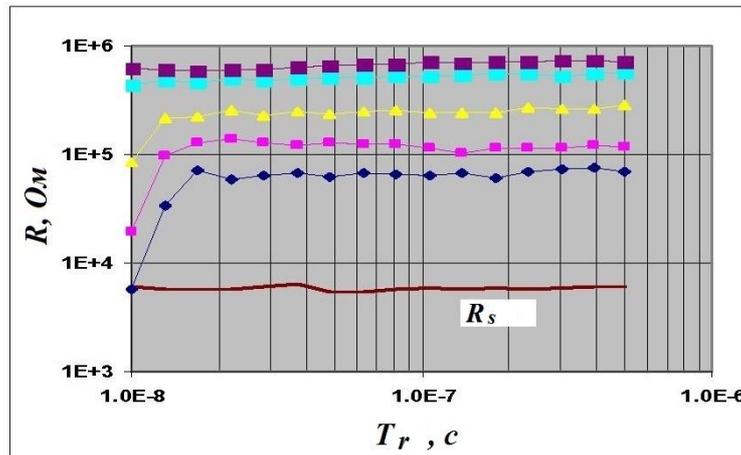


Рис. 3. Пример графика $Rr.t/Tr$ с разными амплитудами выключения

Сопротивление низкополевых устройств измеряют на постоянном токе, подающемся с незначительным его изменением после каждого импульса. Окончательно скорость стирания определяют как соотношение I_r к I_{r_a} , когда T_r падает ниже 20 нс. В этом случае ток насыщения достигает своего номинального значения, а начальное сопротивление выключения выбирается в границах 1 кОм...1000 кОм.

Метод измерения скорости включения. На рис. 4 показаны результаты тестирования ячейки памяти. С момента, когда прибор начинает включаться, необходимое значение сопротивления включения (R_{s_0}) достигается почти сразу. Следующее значение амплитуды выключения увеличивается (длительность импульса выключения остается фиксированной на протяжении всего теста), далее на устройство, чтобы его включить, передают все более широкие импульсы включения, и это приводит ко всё более быстрой смене фазы устройства.

Требуемое значение сопротивления включения определяют так:

$$R_{s_0} = 10^{\{\log(R_s) + [\log(R_r/R_s)]/6\}}, \quad (2)$$

Результаты вычислений приведены на рис. 5.

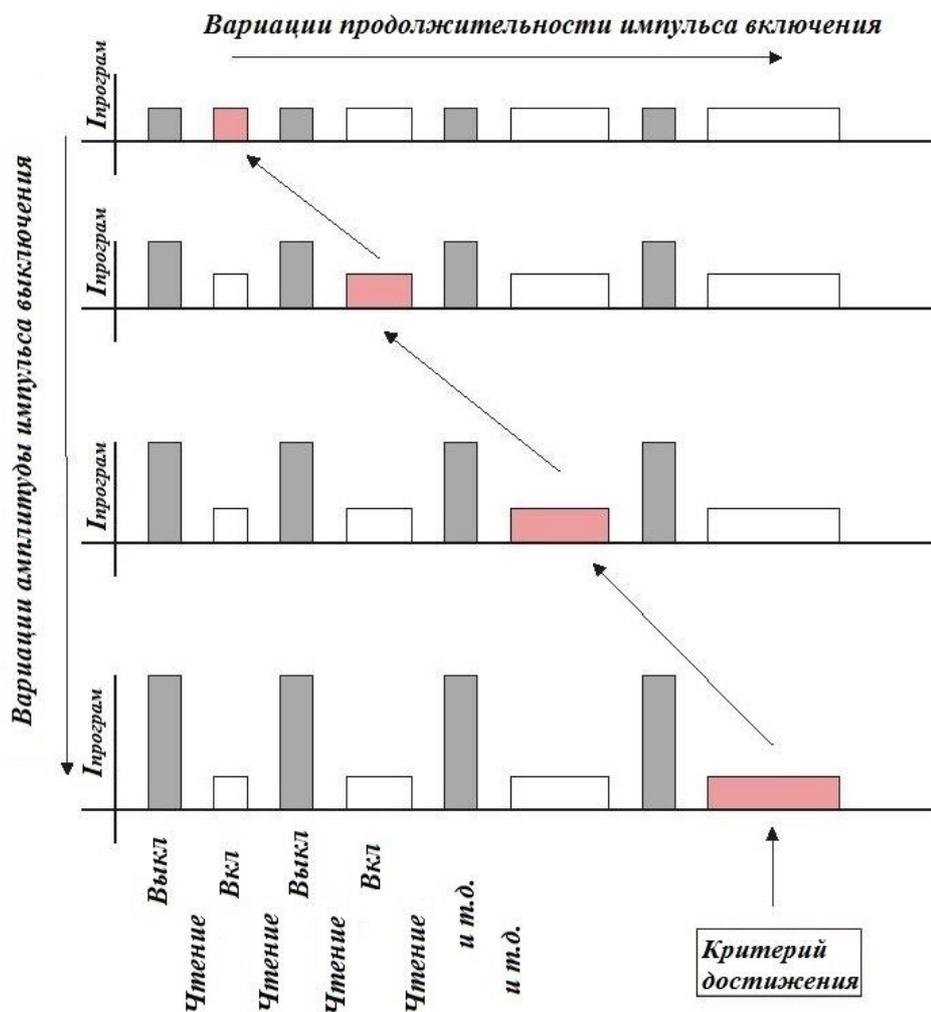


Рис. 4. Схема теста определения скорости включения

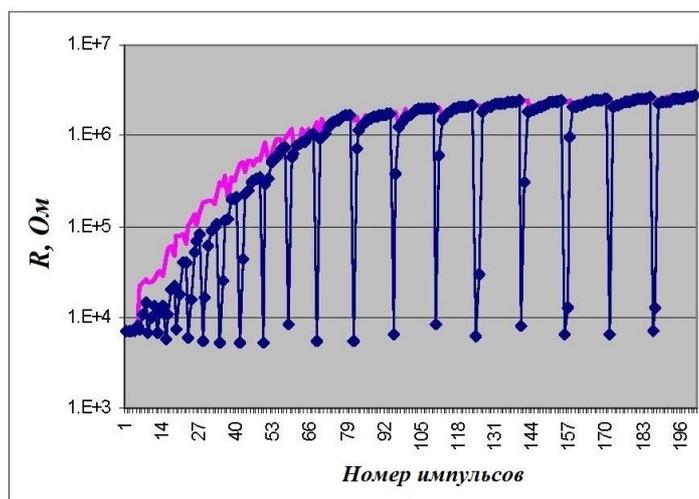


Рис. 5. Пример выходных данных

Результаты и обсуждение

Выше были приведены результаты экспериментального изучения кинетики изменения фаз ХСП из аморфного в кристаллическое состояние для пленки образца состава Наукові праці ВНТУ, 2014, № 3

GST № 225 с толщиной от 13 до 100 нм. Сначала необходимо показать, что сопротивление выключения устройства типа канальцев тока может быть рассчитано с геометрической фигуры, изображенной в форме перевернутого конуса со срезанной вершиной. В таком случае сопротивление будут рассчитывать по формуле [2]:

$$R = \frac{(\rho \cdot d)}{\pi \cdot r(r + d/\operatorname{tg}\alpha)}, \quad (3)$$

где r – радиус нижнего контакта, d – толщина пленки ХСП, α – связано с распространением нитки тока и берется 45° .

На рис. 6 показано экспериментальные данные и масштабирование Rr_a относительно толщины пленки ХСП.

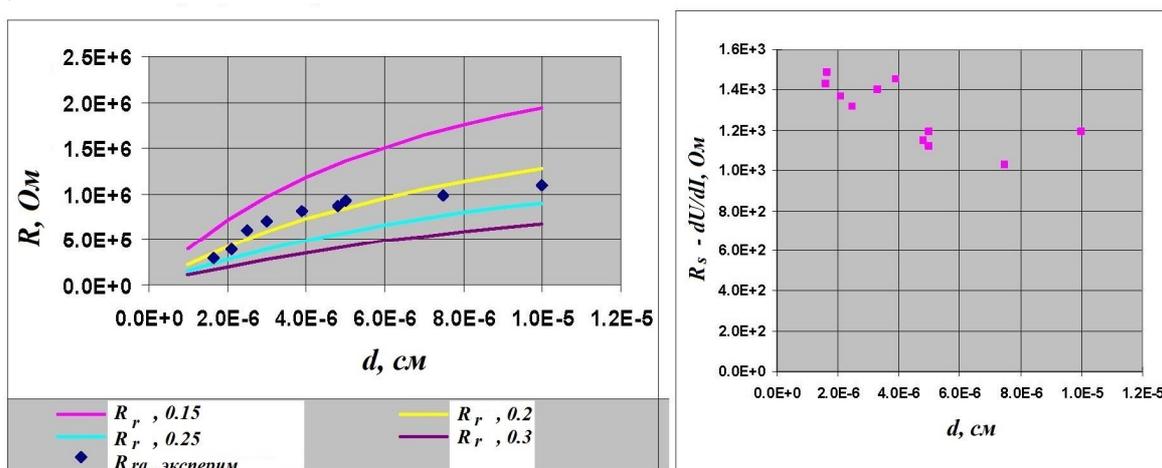


Рис. 6. Вычисленные и экспериментально полученные значения Rr_a и график масштабирования $R_s - dU/dI$ относительно d

Как видно, Rr_a удовлетворяет вышеприведенное выражение с диаметром токопроводящего канала $2r = 2000$ ангстрем. Сравнение порогового напряжения переключения ЯП ЭНП с толщиной пленки ХСП [3] также подтвердило, что вся толщина устройства сосредоточена в фазовом переходе. С другой стороны, сопротивление включения R_s после вычета dU/dI не сравнивают с толщиной d пленки ХСП. Это свидетельствует о наличии слоя с высоким значением низкосолевого удельного сопротивления, не зависит от толщины ХСП.

Теперь рассмотрим «время кристаллизации», которое определяют с помощью длительности импульсов включения, необходимых для достижения устройством необходимого уровня сопротивления, при котором начинается выключение, как показано на рис. 7 [2]. Длительность импульса выключения равна 20 нс. В момент, когда устройство почти достигло стадии включения, необходимая длительность импульсов включения растет практически в геометрической прогрессии:

$$T_s = T_{s_{\min}} \exp(G \cdot R_r), \quad (4)$$

где G – характеристика проводимости с некоторым промежуточным насыщением, изменяющимся по вертикали подобно Rr .

Рост продолжительности импульса включения наблюдают, когда остаточное количество фракций кристаллических частиц в устройстве уменьшается. Считается, что вертикальный рост длительности импульса появляется при сопротивлении отключения согласно потери скоплений кристаллической структуры. Стоит добавить, что T_s – это не Наукові праці ВНТУ, 2014, № 3

просто время кристаллизации, а время достижения всей кристаллической области определенного значения и создания более полного контакта с интерфейсом электрода для достижения нужного сопротивления R_{s_a} для полноценного переключения состояния.

Известно, что $T_{s_{min}}$ изменяется пропорционально толщине пленки ХСП [3], и это позволило нам предположить, что фронт кристаллизации распространяется через объем ХСП между контактами вдоль пути тока с примерной скоростью 600 см/с. Таким образом, с одной стороны минимальное сопротивление пленки халькогенидного полупроводника $R_{ХСП_{min}}$ не пропорционально толщине, но с другой стороны кристаллизация материала распространяется от одного контакта к другому. Эти два наблюдения, взятые вместе, позволяют предположить, что область кристаллизации в основном отвечает за R_s , локализованную на одном из контактов.

Значение амплитуды импульса включения с увеличением продолжительности U_{s_0} , график которой изображен на рис. 7б, необходимо установить ниже произведения требуемого значения сопротивления R_{s_0} и тока отключения I_r , кривая RI которых изображена на рис. 7.

$$U_{s_0} < R_{s_0} \cdot I_r \quad (5)$$

Значение насыщенного сопротивления выключения R_{r_a} определяют непосредственно с ВАХ устройства, а насыщенные токи отключения I_{r_a} и включения I_{s_a} должны иметь значение еще на 20% выше критических, при которых осуществляется переход материала запоминающего слоя ЭНП из одной фазы в другую.

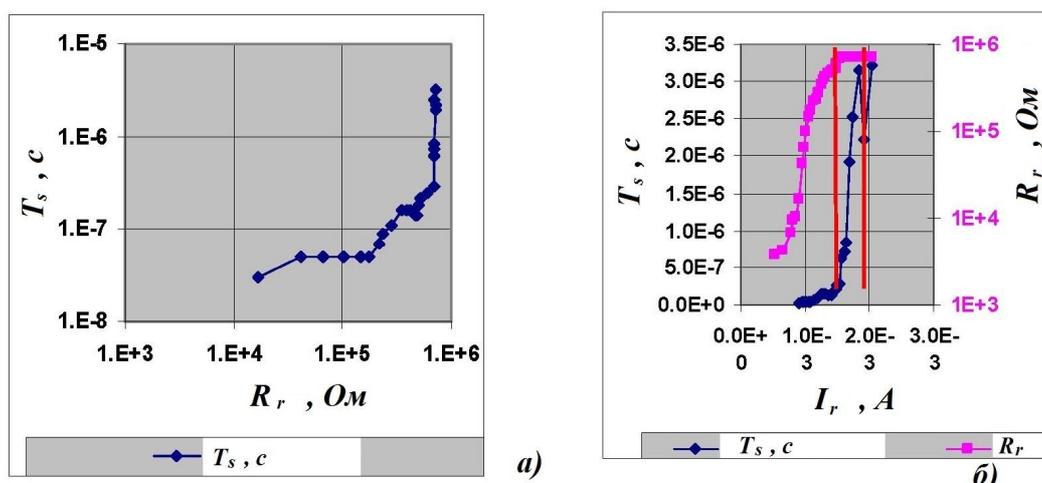


Рис. 7. Зависимость длительности импульса включения от сопротивления выключения (а) и тока программирования (б). Устройство имеет BDL-структуру с резистивными контактами типа С-С

Предположим, что доминирующая часть R_s расположена на поверхности электрода и кристаллический материал служит в качестве искусственно образованного (виртуального) контакта с пленкой ХСП. Тогда эффективная площадь виртуального контакта с электродом будет зависеть от низкополевого сопротивления электрода и $R_{off.nes}$. Наибольшее сопротивление электрода наблюдают при максимальном количестве кристаллического материала в объеме ХСП. Минимальное значение $R_{off.nes}$ также требует максимальной доли кристаллического материала. Если применить резистивный электрод, то процент кристаллического материала в пленке ХСП будет ниже. Таким образом, наличие резистивного интерфейса, образованного из карбона вида С-С (углерод-углерод), уменьшает эффект шунтирования кристаллических «нитей тока» в аморфном материале.

Рассмотрим вопрос, каким образом можно изменить скорость включения устройства ЭНП. Естественно предположить, если установить омический контакт (низкое

сопротивление) электрода, то R_s , U_{in} и T_s будут снижены. Есть несколько альтернатив: изменить состав сплава с теми же материалами контактов, изменить материал контактов, ввести промежуточный контактный слой с низким омическим сопротивлением между ХСП и основным электрическим контактом или комбинировать эти методы.

В таблице 1 представлены некоторые экспериментальные данные [2].

Таблица 1

Экспериментальные данные

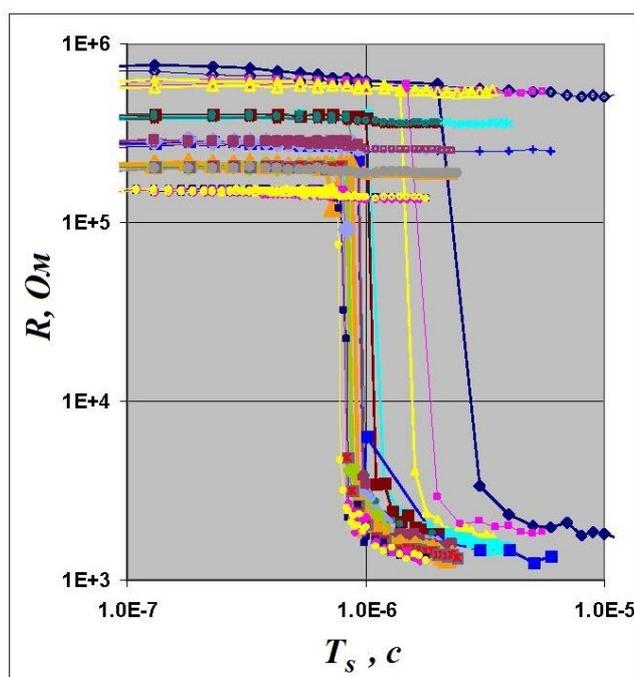
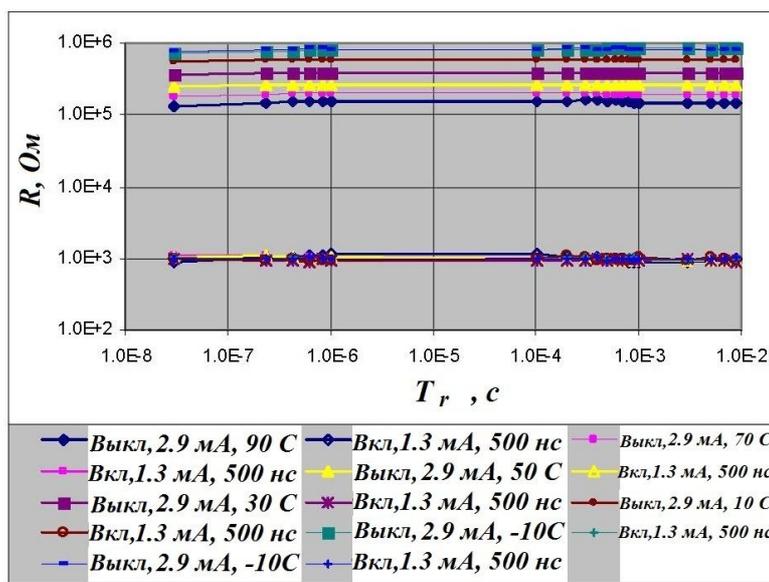
Сплав	Нижний электрический контакт (НЭК)	Верхний электрический контакт (ВЭК)	T_s (при I_{r_a}), с	T_s (при $1.2I_{r_a}$), с	Скорость включения: $I_{r_{min}}/I_{r_a} * 20$ нс
№225 СС BDL	С	С	3e-7	3e-6	0.4
№225 FF БП	TiAlN 2 мОм см	TiW	3e-7	2.8e-6	2.7
№225 FF BDL	TiAlN 5 мОм см	Ti-TiN-Ti	3e-8	7e-8	1.2
НРС FF BDL	TiAlN 5 мОм см	Ti-TiN-Ti	1.5e-8	4e-8	1.35
НРС FF BDL	TiAlN-C	Ti-TiN-Ti	2e-8	4e-8	1.1
НРС ЭЛЛ	С	С-MoN	4e-8	5e-8	1.2
НРС ЭЛЛ	MoN	С-MoN	5e-8	2e-7	1.5

где №225 – сплав $Ge_2Sb_2Te_5$, СС – углеродные контакты, FF – металлические контакты, БП – боковое переключения состояния ХСП, BDL – слой электрического пробоя ХСП, НРС – низкорезистивный сплав ХСП, ЭЛЛ – электронно-лучевая литография.

Из приведенных выше данных сделаем следующие *выводы*. Переход на сплав с более низким сопротивлением улучшает скорость включения, особенно при $1.2I_{r_a}$. Материал и сопротивление верхнего контакта имеет меньшее влияние на скорость включения. Добавление Ti-слоя к верхнему контакту значительно улучшает скорость включения. Это, вероятно, связано с тем, что включение Ti-слоя в пленку сплава GST № 225 обеспечивает хороший омический контакт. Скорость выключения мало зависит от модификаций верхнего контакта, но зависит от проводимости нижнего контакта и сплава ХСП. Проводимость слоя ХСП, изготовленного с помощью ЭЛЛ, выше, и поэтому скорость выключения ЭНП даже с использованием углеродных контактов возрастает.

Температурная зависимость скорости программирования. Сопротивление выключения изменяется с температурой потому, что генерация носителей тока в ХСП является активным процессом. На рис. 8 видно разные начальные уровни выключения. Поскольку длительность импульса включения увеличивается при уменьшении температуры, то каждая из соответствующих кривых RT падает до уровня включения. Длительность импульса, необходимого для достижения определенного уровня сопротивления, уменьшается при увеличении температуры, т. е. скорость включения устройства увеличивается [3].

Сделаем несколько *выводов*: (R_s-dU/dI), I_s та I_r практически не зависят от температуры; повышение сопротивления программирования сопровождается непрерывным ростом энергии активации; T_s уменьшается с увеличением температуры, т. е. с увеличением энергии активации в диапазоне от 0,05 до 0,3 эВ (рис. 8); для устройств с углеродными контактами СС T_r не зависит от температуры в диапазоне 20 нс – 10 мс (рис. 9).

Рис. 8. Зависимость скорости включения T_s от температурыРис. 9. Зависимость T_r в диапазоне температур 10 – 90 °С для устройства GST № 225 СС BDL

Материал электродов. Покажем, что углеродные контакты совершенно уникальны для применения в качестве материалов для электродов. Преимущество углерода в изменении сопротивления с относительно резистивного материала в материал с высокой проводимостью, но только в непосредственной близости от зоны контакта с ХСП. Нагревание при пропускании тока через стек C-SiNx-C вызывает изменения. При этом SiNx действует как слой электрического пробоя, который локализует работу устройства в непосредственной близости к области пробоя [3]. На рис. 10 показано, что при прохождении тока через устройство его проводимость постепенно возрастает, и такие изменения постоянны. Сначала сопротивление устройства примерно равно $1e6$ Ом, дальше, подавая электрический сигнал с током 2 мА и напряжением 3В, случается пробой, после чего

устройство меняет свое сопротивление на $1e4$ Ом. Дальнейшее увеличение тока вызывает постепенное снижение сопротивления устройства от $1e3$ Ом до 100 Ом.

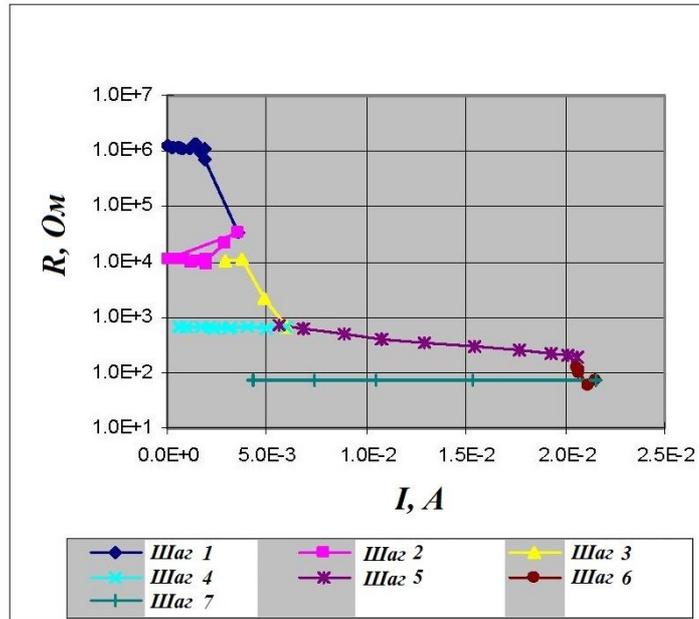


Рис. 10. Электрическое формирования ячейки C-SiNx-C

Прогревание таких устройств при температуре 350°C в течение 72 часов не приводит к дальнейшим изменениям. Для выключенного устройства прогревание при температуре ниже 350°C не вызывает повышения проводимости [3]. Результаты занесены в таблицу 2.

Таблица 2

Результаты термообработки

Сопротивление до момента переключения C-SiNx-C, Ом	Сопротивление после применения электрических импульсов, Ом	Сопротивление тех же устройств после обжига при температуре 350°C в течение 72 часов (медленное охлаждение), Ом
1.96e6	444	511
1.25e6	3.46e4	3.42e4
8.15e5	1.5e4	1.4e4
1.56e6	210	289
2.7e6	814	886
1.7e6	Без переключения	1.3e5
1.2e6	Без переключения	9.1e4
1.4e6	Без переключения	9.4e4
9.6e5	Без переключения	8.5e4

Следовательно, можно сделать вывод, что углеродный контакт формируется в непосредственной близости от зоны пробоя, где температура программирования достигает $650 - 700^\circ\text{C}$. Это обеспечивает преимущество изотропной теплопроводности, при которой перпендикулярная к площади устройства теплопроводность значительно превышает ее значение к боковой стороне и помогает эффективно термически изолировать устройство. Этот эксперимент предполагает, что углеродные контакты меняют сопротивление только вдоль пути тока и остаются более электрически- и термически резистивными при отклонении от текущего пути. Таким образом, боковые теплотери через толщину контактов минимизируются. ЭНП типа BDL, где нижний контакт изготовлен из углерода,

переключается быстрее, чем с TiAlN. Но стоит отметить, что скорость выключения может вырасти, если нижний контакт использует сплав TiAlN с высшим значением сопротивления.

Выводы

Пороговое значение сопротивления переключения Rr_0 ЭНП меняется пропорционально толщине пленки ХСП. Для сопротивления устройства при низком электрическом поле $R_{ХСП}$ такая зависимость не подтверждается, хотя фронт кристаллизации материала распространяется от катода к аноду вдоль пути прохождения тока. Экспериментальные опыты показывают, что кристаллические области фазопеременного сплава GST № 225 являются виртуальными контактами к верхнему интерфейсу электрода (анода), что приводит к более быстрому переключению фазовых состояний ЯП, поэтому скорость *включения* не зависит от контакта катода, но существенно зависит от контакта анода. Если сделать связь анода с материалом ХСП более слабой, т. е. менее резистивной, то скорость *включения* увеличится. Выбор материала анода делают на основании проводимости сплава ХСП, непосредственно прилегающего к нему, с целью минимизировать низкополевое сопротивление интерфейса. Как показывают эксперименты, скорость *выключения* ЭНП с более низким сопротивлением материала контактов в основном определяется побочными теплотерями через нижний контакт (катод) и смежные области пленки ХСП, поэтому скорость выключения (перезаписи, сброса) может существенно зависеть от контакта катода (как его материала, так и геометрии), но быть нечувствительной к изменениям контакта анода. Это свидетельствует о наличии полярности прохождения тока через ЯП. Следовательно, более высокой скорости выключения ЭНП можно достичь при минимизации побочных потерь тепла на катоде. Аморфный углерод имеет свойство изменять сопротивление только по направлению протекания тока, поэтому использование аморфного углерода в качестве материала катода является оптимальным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ovshinsky S. R. Reversible electrical switching phenomena in disordered structures / S. R. Ovshinsky // Physical Review Letters. – 1968. – № 21. – P. 1450 – 1453.
2. Phase Change Memory / H.-S. Philip Wong [et al.] // Proceedings of the IEEE. – 2010. – Vol. 98, №. 12. – P. 2201 – 2227.
3. Phase change memory technology [Электронный ресурс] / Vipin Rajendran [et al.] / IBM Research. – 2009. Режим доступа: http://www.itrs.net/ITWG/Beyond_CMOS/2010Memory_April/Proponent/Nanowire%20PCRAM.pdf.
4. Костылев С. Электронное переключение в аморфных полупроводниках / С. Костылев, В. Шкут. – Наукова думка: Київ, 1978. – с. 203.

Слободян Иван Владимирович – ассистент кафедры телекоммуникационных систем и телевидения.

Винницкий национальный технический университет.