

07  
**Особенности вольт-амперных характеристик в тонких пленках состава  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  при использовании измерительной цепи с источником тока**

© С.А. Фефелов,<sup>1</sup> Л.П. Казакова,<sup>1,2</sup> С.А. Козюхин,<sup>4</sup> К.Д. Цэндин,<sup>1</sup> Д. Арсова,<sup>3</sup> В. Памукчиева<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, 194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Институт физики твердого тела БАН, 1784 София, Болгария

<sup>4</sup> Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, 119991 Москва, Россия

e-mail: s.fefelov@list.ru

(Поступило в Редакцию 28 мая 2013 г.)

Сравнены традиционно используемая для исследования электрических свойств стеклообразных полупроводников измерительная цепь с генератором напряжения и альтернативный вариант, использующий генератор тока. Использование генератора тока позволило получить результаты, более полно отражающие взаимосвязь между эффектом образования памяти и изменениями электрических параметров. Выделен новый электрический параметр —  $U_{\text{hold}}$  (напряжение поддержки), ранее не описанный в литературе. Установлена связь  $U_{\text{hold}}$  с процессом формирования памяти при фазовом переходе. Обнаружен эффект возникновения колебаний в режиме ограничения тока канала проводимости в пленке.

**Введение**

В настоящее время производителями энергонезависимой памяти большое внимание уделяется разработке ячеек памяти на материалах, способных изменять фазовый состав под воздействием электрического импульса. Такой тип памяти получил название „фазовой“ (PCM — Phase Change Memory). В связи с этим является важным выяснение основных механизмов, приводящих к переходу слоев халькогенидных стеклообразных полупроводников (ХСП) из высокоомного состояния в низкоомное и формированию состояния памяти. С целью выяснения этих механизмов в настоящей работе было проведено исследование вольт-амперных характеристик (ВАХ) на слоях ХСП состава  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ , который является одним из наиболее перспективных для создания ячеек фазовой памяти. Измерения проводились как традиционным методом с генератором напряжения [1–4], так и альтернативным методом [5], использующим генератор тока. Последний метод позволил провести более детальное исследование ВАХ и получить наиболее полную информацию о процессах, происходящих при переключении и формировании состояния памяти.

**Образцы, методика и результаты измерений**

Образцы для измерений представляли собой тонкопленочные структуры  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  типа „сэндвич“, полученные термическим напылением в вакууме на подложки из стекла с проводящим покрытием из Au или ИТО,

которое также напылялось в вакууме и служило нижним электродом. В качестве верхнего точечного электрода площадью около  $10^{-4} \text{ cm}^2$  использовалось золото.

При измерении ВАХ традиционным методом использовалась электрическая цепь, содержащая источник напряжения (рис. 1). Для выявления уровней напряжения (тока), при которых начинают происходить структурные изменения в материале, формируется монотонно изменяющееся напряжение. Форма импульса треугольная, скорость нарастания определяется максимальным напряжением  $U_0$  и разрядностью формирующего цифроаналогового преобразователя (ЦАП). Применительно к описываемому случаю использовался 8-разрядный ЦАП. Период тактовой частоты счетчика  $4 \mu\text{s}$  выбран исходя из характерного времени задержки переключения [4]. Максимальное значение напряжения  $U_0 = 15 \text{ V}$ .

Измерение напряжения производилось с помощью двухканального осциллографа. Ток через образец рас-

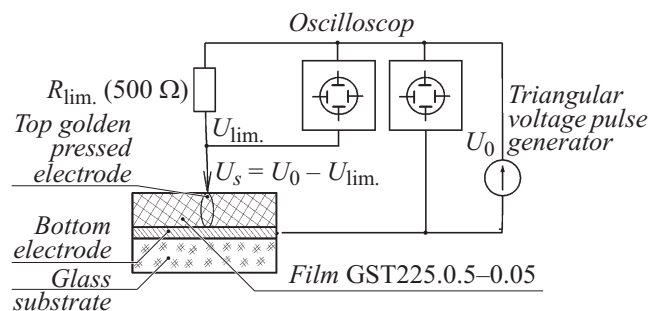


Рис. 1. Измерительная цепь с генератором напряжения.

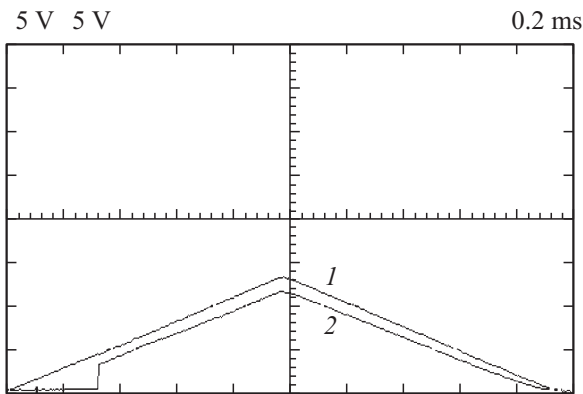


Рис. 2. Осциллограммы напряжения измерительной цепи с использованием генератора напряжения..

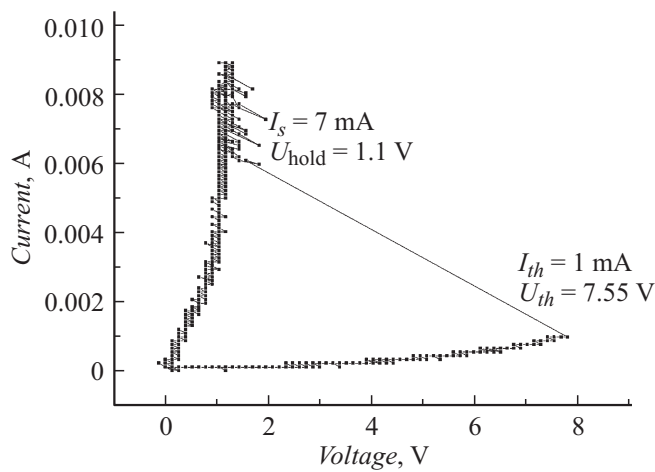


Рис. 3. Характерный вид ВАХ, полученный с использованием генератора напряжения.

считывался по падению напряжения ( $U_{lim}$ ) на резисторе  $R_{lim}$ , включенного последовательно с образцом. Этот же резистор служит для ограничения предельного тока через образец.

Резистор  $R_{lim}$  и сопротивление последовательно включенного с ним образца образуют делитель напряжения, напряжение на образце  $U_s = U_0 - U_{lim}$ .  $U_0$  задается внешним генератором напряжения, а падение напряжения  $U_{lim}$  и  $U_s$  (на  $R_{lim}$  и  $R_s$  соответственно) пропорциональны сопротивлениям этих элементов. Выбор величины  $R_{lim}$  является своего рода компромиссом между возможностью измерять малые токи, с одной стороны, и необходимостью ограничить его влияние на измерительную цепь, с другой. Начальное сопротивление образца превосходит сопротивление  $R_{lim}$  приблизительно в  $10^3$ , поэтому ток в цепи (до переключения) определяется в основном большим сопротивлением образца.

На рис. 2 приведены осциллограммы, полученные при использовании данной измерительной цепи. 1 — напряжение генератора, 2 — ток (напряжение на  $R_{lim} = 500 \Omega$ ). Разность мгновенных значений напряжения генератора и  $U_{lim}$  составляет напряжение, падающее

на образце. Ток образца

$$I_s = U_{lim}/R_{lim}.$$

ВАХ, соответствующая этим осциллограммам, приведена на рис. 3. Момент переключения ( $U_s = U_{th}$ ) сопровождается скачкообразным изменением сопротивления образца  $Ge_2Sb_2Te_5$ , оно уменьшается  $\sim$  в  $10^4$  раз. Это приводит к перераспределению напряжения между образцом и  $R_{lim}$ , происходит увеличение тока через образец

$$\Delta I_s = \Delta U_{lim}/R_{lim}.$$

На ВАХ, приведенной на рис. 3, ток через образец в момент переключения возрос в 6 раз.

Наличие резистора  $R_{lim}$  в измерительной цепи создает положительную обратную связь, в результате чего в момент переключения происходит изменение сразу двух воздействующих факторов — и напряжения, и тока.

Очевидно, что наличие скачка тока ограничивает возможности измерительной цепи с генератором напряжения, не позволяя проследить изменения состояния пленки при промежуточных значениях тока после переключения.

Более целесообразным представляется использовать измерительную цепь с генератором тока (происходит формирование импульса тока  $I_0$  треугольной формы). Ее схема представлена на рис. 4.

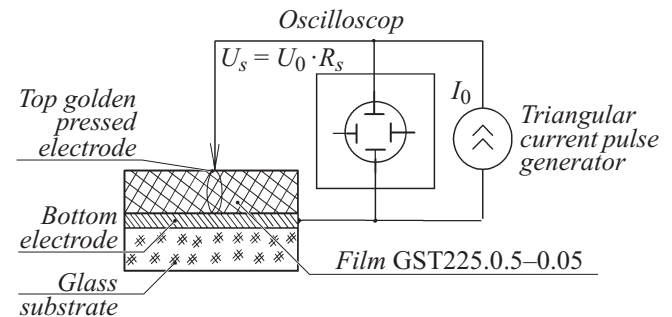


Рис. 4. Измерительная цепь с генератором тока.

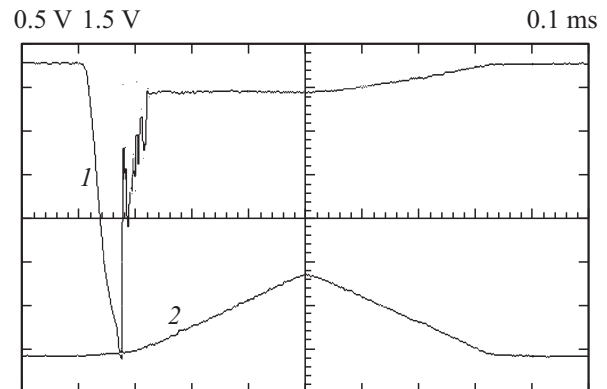


Рис. 5. Осциллограммы напряжений, снятых в измерительной цепи с источником тока: 1 — инвертированная осциллограмма напряжения на образце, 2 — осциллограмма тока, подаваемого на образец.

На рис. 5 приведены осциллограммы, полученные при использовании измерительной цепи с источником тока. 1 — инвертированная осциллограмма напряжения на образце, 2 — осциллограмма тока, подаваемого на образец. Соответствующая ВАХ приведена на рис. 6. Следует подчеркнуть, ВАХ соответствует падению напряжения на образце и характеризует сопротивление (проводимость) пленки, которое определяется током, задаваемым внешним источником.

На ВАХ рис. 6 выделяются 4 области, которые соответствуют действию различных физических механизмов, приводящих к переключению, а затем и к сохранению низкоомного состояния (памяти):

1 — область  $A-B$  определяется аморфной фазой образца (сопротивление аморфной и кристаллической фаз различается в  $10^3-10^4$  раз);

2 — область  $B-C$ , здесь происходит эффект переключения в низкоомное состояние с образованием шнура с повышенной плотностью тока;

3 — область  $C-D$  характеризуется постоянным напряжением на образце при нарастающем токе, названным  $U_{hold}$ . Как видно из рис. 7, этот параметр определяется толщиной и составом пленки и не зависит от начального сопротивления, а также от напряжения переключения образца, которые могут иметь значительный разброс значений по причине фазовой неоднородности по толщине;

4 — область  $D-A$  — зависимость между током и напряжением носит омический характер, при уменьшении тока низкоомное состояние сохраняется.

При определенных условиях в области пробоя  $B-C$  регистрируется еще один участок, который не наблюдается на ВАХ, полученных при использовании генератора напряжения [6]. Это область неустойчивости, возникающая в условиях ограничения (дефицита) тока через образец. Если  $I_s$  менее некоторого  $I_{tr}$  (критического) значения, возникают колебания напряжения со стабильным периодом в интервале напряжений  $U_{hold} - U_{th}$ .

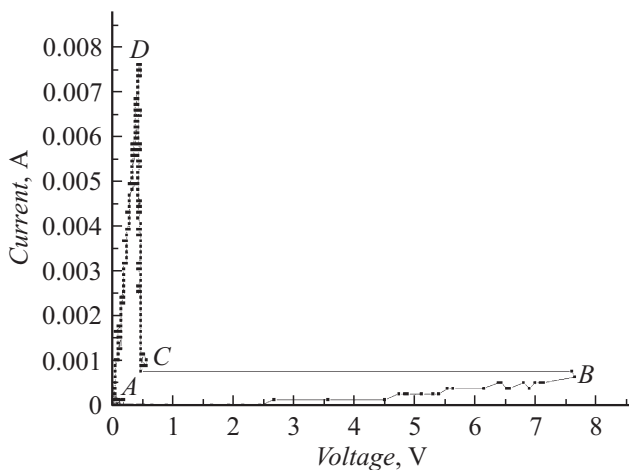


Рис. 6. ВАХ, полученная на образце  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  с использованием генератора тока.

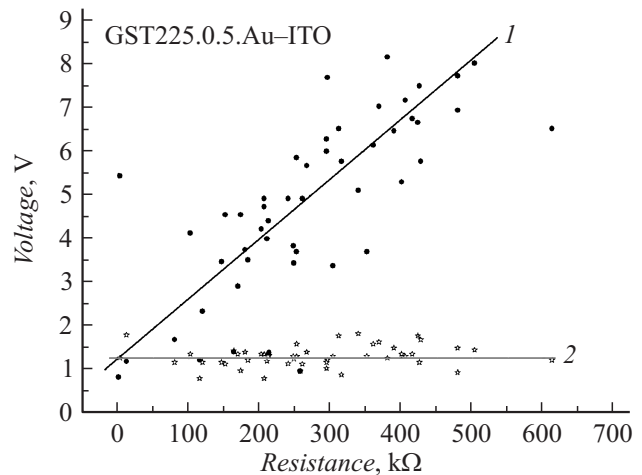


Рис. 7. Зависимость  $U_{th}$  (1) и  $U_{hold}$  (2) от начального сопротивления образца.

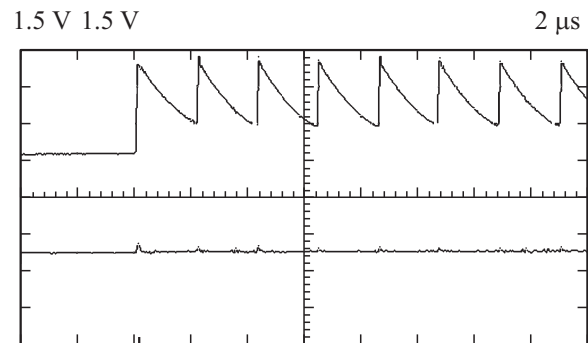


Рис. 8. Колебания проводимости при дефиците тока в проводящем канале ( $I_{tr} < I_{th}$ ).

Эти колебания в условиях стабилизации тока вызваны колебаниями проводимости образца и представлены на рис. 8. Следует отметить, что область неустойчивости в материале  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  также наблюдалась при подаче на ячейку памяти импульса считывания [7,8].

При  $I_s > I_{tr}$  колебания срываются, напряжение на канале стабилизируется на уровне  $U_{hold}$  — область  $C-D$ .

Измерения с использованием генератора тока проводились также на составах  $\text{Ge}_{15}\text{Sb}_5\text{Te}_{80}$  и  $\text{Ge}_{45}\text{Zn}_5\text{Te}_{9.5}\text{Se}_{40.5}$ . Исследовались пленки толщиной 50–750 нм.

Основные параметры, использованные для сравнения: напряжение переключения —  $U_{th}$  и напряжение поддержки —  $U_{hold}$ . Напряжение  $U_{th}$  соответствует переходу образца в низкоомное состояние. Напряжение  $U_{hold}$  соответствует постоянному напряжению на образце в процессе формирования памяти.

Кроме того, измерялось удельное сопротивление образцов до ( $\rho_0$ ) и после ( $\rho_f$ ) переключения. Значения этих параметров для разных составов ХСП приведены в таблице.

Электрические параметры образцов составов  $Ge_2Sb_2Te_5$ ,  $Ge_{15}Sb_5Te_{80}$  и  $Ge_{45}Zn_5Te_{9.5}Se_{40.5}$ 

Состав (толщина, nm)	Электрические параметры					
	$U_{th}, W$	$U_{hold}, W$	Осцилляции	$\rho_0, \Omega \cdot cm$ ( $6.5 \mu A$ )	$\rho_f, \Omega \cdot cm$ ( $8.2 mA$ )	Память
$Ge_2Sb_2Te_5$ (500)	2–7	0.5	+	$2 \cdot 10^5$	50–70	+
$Ge_{15}Sb_5Te_{80}$ (750)	1.5–5	0.3	+	$4 \cdot 10^5$	50–10	+
$Ge_{45}Zn_5Te_{9.5}Se_{40.5}$ (420)	4–12	–	+/-	$4 \cdot 10^6$	100–16	+/-

Как видно из таблицы, на всех исследованных составах были обнаружены области осцилляции проводимости.

## Обсуждение результатов

Выбранный в работе режим измерений с использованием генератора тока позволил более четко выделить на ВАХ области, соответствующие различным процессам. Электропроводность пленки на различных участках ВАХ обусловлена структурным состоянием пленки. Таким образом, можно сделать предположения, касающиеся возможных физических процессов, протекающих в этих областях.

1. Область  $A-B$ . Пленка в аморфной фазе. Падение напряжения определяется высоким сопротивлением пленки и током, задаваемым внешним источником. При малых токах выполняется закон Ома.

Известно, что уровень Ферми и энергия активации проводимости в этой области определяются характерными дефектами халькогенидных стеклообразных полупроводников, так называемыми  $U$ -minus центрами [9]. В области высоких напряжений, предшествующих переключению, наблюдается сильная нелинейность проводимости.

Существует несколько точек зрения на природу этой нелинейности, отраженных в обзорах [10,11]. В работах [11,12–14] показано, что как сама нелинейность, так и характерные зависимости  $U_{th}$  от внешних параметров хорошо описываются в рамках электронно-тепловой теории эффекта переключения, учитывающей многофононную туннельную ионизацию  $U$ -minus центров. Поэтому мы в дальнейшем будем рассматривать результаты с точки зрения этой теории, трактующей эффект переключения как электронно-тепловой пробой.

2.1. Область  $B-C$ , случай  $I_s > I_{th}$ . Падение напряжения достигает значений, при которых электрическое поле достаточно для электронно-теплого пробоя пленки. Образованный при электронно-тепловом пробое канал локализуется, вследствие этого происходит увеличение плотности тока. При выполнении условия  $I_s > I_{th}$ , возникает токовый шнур, устанавливается напряжение  $U_{hold}$ .

2.2. Область  $B-C$ , случай  $I_s < I_{tr}$  ( $I_{tr} < I_{th}$ ). При этом условии ток не достаточен для нагрева образованного канала, остывая область пробоя восстанавливает высокое сопротивление, падение напряжения возрастает,

следует новый пробой. Так возникает неустойчивость, регистрируемая в виде колебаний напряжения на образце со стабильным периодом. При уменьшении тока колебания прекращаются, восстанавливается высокое сопротивление.

3. Область  $C-D$ . В случае  $I_s > I_{th}$  возникший токовый шнур расширяется в условиях нарастающего тока при  $U_{hold} = const$ .

4. Область  $D-A$ . По мере уменьшения тока происходит кристаллизация канала. Низкоомное состояние сохраняется после снятия внешнего воздействия.

## Заключение

Таким образом, использование генератора тока в измерительной цепи для снятия ВАХ позволило получить дополнительную информацию, которая позволяет уточнить и детализировать отдельные физические механизмы процесса образования памяти.

Выделен новый электрический параметр —  $U_{hold}$ , ранее не описанный в литературе.  $U_{hold}$  отличается от параметра  $U_h$  — напряжения обратного перехода, используемого в литературе [9] при описании эффекта переключения. Так, если  $U_h$  — минимальное напряжение, при котором еще удерживается низкоомное состояние, то  $U_{hold}$  соответствует процессу формирования канала памяти.

Стабилизировав процесс образования канала проводимости, удалось проследить связь между подводимым током и образованием канала с однородным фазовым составом, предшествующим кристаллизации.

Отметим, что благодаря использованию измерительной цепи с генератором тока были обнаружены области возникновения колебаний (осцилляций) проводимости. Сформулированы условия их возникновения в режиме дефицита тока канала проводимости в системе  $Ge-Sb-Te$ .

Настоящая работа поддержана программой фундаментальных исследований Президиума РАН № 24, грантами РФФИ № 10–03–00456-а, 11–03–00269 и проектом Министерство образования и науки Казахстана 0938/GF2.

## Список литературы

- [1] Коломиец Б.Т., Лебедев Э.А. // Радиотехника и электроника. 1963. Т. 8. С. 2097–2098.
- [2] Pearson A.D. // Techn. Pap. VI Int. Congress of Glass. Washington, 1962. P. 357–371.
- [3] Ovshinsky S.R. // Phys. Rev. Lett. 1968. Vol. 21. N 20. P. 1450–1453.
- [4] Лебедев Э.А., Козюхин С.А., Константинова Н.Н., Казакова Л.П. // ФТП. 2009. Т. 43. Вып. 10. С. 1383–1386.
- [5] Фефелов С.А., Казакова Л.П., Яковлев С.А., Козюхин С.А., Цэндин К.Д. // Тр. междунар. симпозиума МФГФП-1 „Физика межфазных границ и фазовые переходы“. Ростов-на-Дону: Изд-во ФГОУ ВПО ЮФУ, 2011. С. 155–157.
- [6] Фефелов С.А., Казакова Л.П., Козюхин С.А., Цэндин К.Д., Арсова Д., Памукчиева В., Петков К. // Тр. междунар. симпозиума (LDS-3) „Физика низкоразмерных систем“. Ростов-на-Дону: Изд-во ФГОУ ВПО ЮФУ, 2012. С. 120–123.
- [7] Nardone M., Karpov V.G., Karpov I.V. // J. Appl. Phys. 2010. Vol.107. N 054 519. P. 107–115.
- [8] Kozyukhin S., Voronkov E. // Phys. Stat. Sol. C. 2010. Vol. 7. N 3–4. P. 865–868.
- [9] Электронные явления в халькогенидных стеклообразных полупроводниках / Под ред. К.Д. Цэндина. СПб.: Наука, 1996. 487 с.
- [10] Tsendin Konstantin D. // Phys. Stat. Sol. 2012. Vol. B. 249. N 10. P.1962–1965.
- [11] Богословский Н.А., Цэндин К.Д. // ФТП. 2012. Т. 46. Вып. 5. С.577–608.
- [12] Bogoslovskiy N.A., Tsendin K.D. // J. Opt. Adv. Mat. 2011. Vol. 11–12. P. 1423–1428.
- [13] Tsendin K.D., Bogoslovskiy N.A. // J. Opt. Adv. Mat. 2011. Vol. 11–12. P. 1429–1432.
- [14] Almasov N., Bogoslovskiy N., Korobova N., Kozyukhin S., Fefelov S., Kazakova L., Jakovlev S., Tsendin K., Guseinov N. // J. Non-Crystal.Sol. 2012. Vol. 358. P. 3299–3303.