

С.А. Фефелов, Л.П. Казакова, Н.А. Богословский, А.Б. Былев,
А.М. Анненкова

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ПАМЯТИ В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ АМОРФНЫХ ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ СОСТАВА GST225

Введение. В последнее время большое внимание направлено на разработку новых типов энергонезависимой памяти. Одним из наиболее перспективных материалов для решения этой задачи являются халькогенидные полупроводники (ХСП) состава $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST225), обладающие фазовой памятью, которая основана на фазовом переходе вещества из аморфного состояния в кристаллическое (эффект памяти) под воздействием электрического поля [Ovshinsky, 1968; Yamada et al., 1991]. В связи с этим активно изучается механизм такого перехода. Однако до настоящего времени процесс формирования фазовой памяти все еще не достаточно прояснен.

Данное исследование направлено на изучение эффекта памяти в тонких пленках $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ в условиях контролируемого тока в образце.

Методика исследования. В эксперименте ток пропускался через тонкую пленку халькогенидного полупроводника в направлении поперечном поверхности пленки. Первоначально полупроводник находился в аморфном стеклообразном состоянии. Пропускаемый ток ступенчато нарастал, а затем убывал по величине так, что в итоге формировался треугольный импульс тока длительностью около 2 мс. Длительность участков постоянного тока составляла примерно по 20 мкс. Величина треугольного импульса тока в максимуме могла меняться, длительность импульса не варьировалась. На один и тот же участок пленки площадью $\sim 10^{-4} \text{ см}^2$ подавались такие треугольные импульсы тока с последовательно увеличивающимся максимальным током I_{max} . Записывались синхронизированные осциллограммы тока и напряжения на пленке.

При такой постановке эксперимента появляется возможность опосредованно, через осциллограммы и построенные по ним вольт-амперные характеристики (ВАХ) для последовательных импульсов тока, сравнивая их друг с другом, изучать происходящие в структуре пленки изменения, вызванные пропусканием тока.

На рис. 1 приведена схема установки для измерений. Исследование ВАХ проводилось при использовании измерительной цепи с генератором тока [Фефелов и др., 2014].



Рис. 1. Схема установки

Fig. 1. Experimental measurements setup

Ток цепи при помощи операционного усилителя формировался в виде треугольных импульсов, описанных выше. Измерения проводились при следующих максимальных значениях тока в треугольных импульсах I_{\max} : 0,1 мА, 0,2, 0,565, 1,2, 1,9, 3,7 и 8,2 мА.

Исследуемые образцы представляли собой пленочную структуру типа «сэндвич». На подложке из термически окисленного кремния (слой оксида кремния составлял ≈ 1 мкм по толщине, сама подложка ≈ 1 мм) формировалось многослойное проводящее покрытие, выполняющее функцию нижнего электрода. Это покрытие состояло из слоя TiN толщиной 30 нм и напыленных затем слоев W толщиной 50 нм и TiN толщиной 15 нм. Поверх нижнего электрода методом магнетронного распыления поликристаллической мишени наносилась аморфная пленка $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ толщиной 130 нм. Площадь самой пленки была около 1 см^2 . В качестве верхнего электрода использовался золотой прижимной зонд с площадью контакта около 10^{-4} см^2 . Измерения повторялись при разных положениях прижимного зонда на верхней поверхности пленки. Эксперимент проводился на свеженанесенных пленках.

В [Якубов и др., 2018] методами Оже-спектроскопии, энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии, а также с помощью рентгенофазового анализа и просвечивающей электронной микроскопии [Шерченков и др., 2018] было установлено, что состав пленок, полученных методом магнетронного распыления, близок к составу $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ и для них характерно однородное распределение элементов. Анализ фазового состояния, проведенный методом рентгеновской дифракции, показал, что полученные пленки находятся в аморфном состоянии.

Результаты исследования. Установлено, что ВАХ, полученная при повторной подаче на образец треугольного импульса тока, повторяет ВАХ,

полученную по участку падающего тока при первой подаче импульса тока данной амплитуды. При последовательном увеличении I_{\max} подаваемого импульса, пока сила тока не достигала предыдущего максимума, ВАХ для этого участка повторяла падающую ветвь предшествующей ВАХ. Таким образом, падающая ветвь ВАХ запоминалась. Эксперименты повторялись на разных участках изготовленной пленки. Результаты экспериментов для разных участков пленки совпадали только качественно, что, скорее всего, обусловлено аморфным начальным состоянием пленки и сильной зависимостью количественных характеристик от конкретной структуры аморфной пленки. Несмотря на большой количественный разброс в результатах экспериментов для различных участков пленки, можно выделить общие черты, которые, в принципе, позволяют представить этапы формирования памяти.

Для иллюстрации экспериментальных данных приведем осциллограммы и построенные по ним ВАХ для двух из 32 исследованных точек на пленке. Назовем их точка 1 и точка 2.

На рис. 2 приведены осциллограммы тока и напряжения (а, в) и ВАХ (б, г) точки 1 для импульсов с $I_{\max} = 0,1$ мА и 0,2 мА.

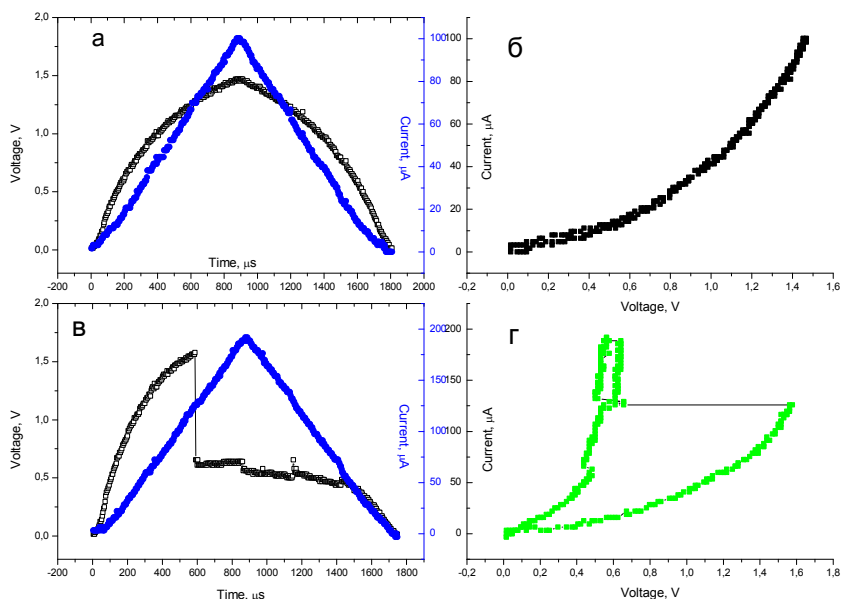


Рис. 2. Осциллограммы тока и напряжения и ВАХ точки 1 для импульсов тока с I_{\max} : 0,1 мА (а, б) и 0,2 мА (в, г)

Fig. 2. Current and voltage oscilloscope pictures and I-V curves of point 1 for current pulses with I_{\max} : 0.1 mA (a, б) and 0.2 mA (в, г)

На рис. 3 приведены совмещенные ВАХ для точки 1 с $I_{\max} = 0,1$ мА, 0,2 мА (а) и 0,2 мА и 0,565 мА (б).

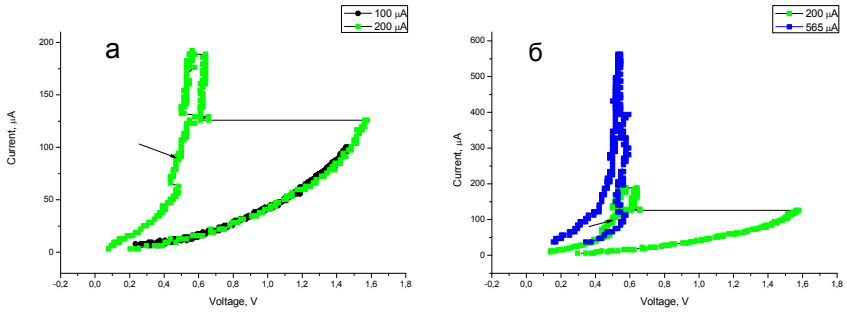


Рис. 3. Совмещенные ВАХ точки 1 для импульсов тока с I_{\max} : 0,1 мА и 0,2 мА (а) и 0,2 мА и 0,565 мА (б)

Fig. 3. I-V curves of point 1 obtained for current pulses with I_{\max} : 0.1 mA and 0.2 mA (a) and 0.2 mA and 0.565 mA (б)

На рис. 4 приведены совмещенные ВАХ точки 1 для импульсов с $I_{\max} = 0,1$ мА и 0,2 мА в полулогарифмическом масштабе.

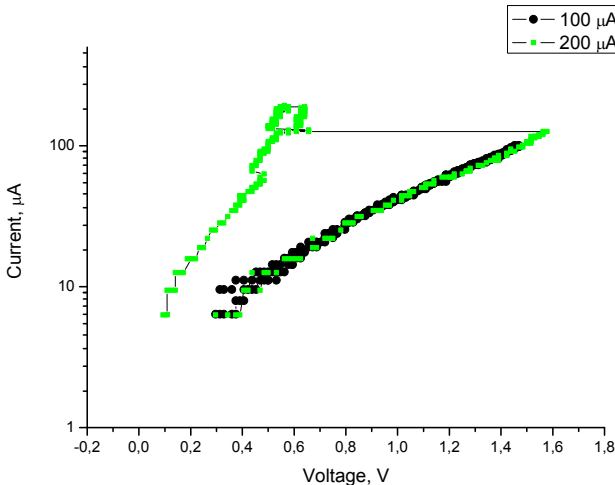


Рис. 4. Совмещенные ВАХ точки 1 для импульсов с I_{\max} : 0,1 мА и 0,2 мА в полулогарифмическом масштабе

Fig. 4. I-V curves of point 1 obtained for current pulses with I_{\max} : 0.1 mA and 0.2 mA in log-scale

Как видим из рис. 4, при токе выше ~ 50 мкА для случая с $I_{\max} = 0,1$ мА и для участка растущего тока в случае с $I_{\max} = 0,2$ мА зависимость $I(V)$ близка к экспоненциальной. При токе около 130 мкА напряжение скачком падает с 1,6 В до 0,6 В. ВАХ для следующего импульса с $I_{\max} = 0,565$ мА на участке растущего тока вплоть до $I = 0,2$ мА (рис. 3б) практически совпадает с ВАХ для $I_{\max} = 0,2$ мА на участке падающего тока после скачка напряжения. Небольшой же скачок напряжения, возникающий при импульсе с $I_{\max} = 0,2$ мА и отмеченный на рис. 3а и 3б стрелкой, также скачкообразно исчезает и на ВАХ с $I_{\max} = 0,565$ мА отсутствует.

Сила тока, напряжение, при которых происходили скачки напряжения, и величина скачка напряжения отличались для разных точек пленки. Скачков могло быть и несколько, как показано на рис. 5, где приведены совмещенные ВАХ точки 2 для импульсов с $I_{\max} = 0,1$ мА, 0,2 мА, 0,565 мА и 1,2 мА в линейном и полулогарифмических масштабах (а, б) и совмещенные ВАХ для импульсов с $I_{\max} = 1,2$ мА и 8,2 мА (в, г).

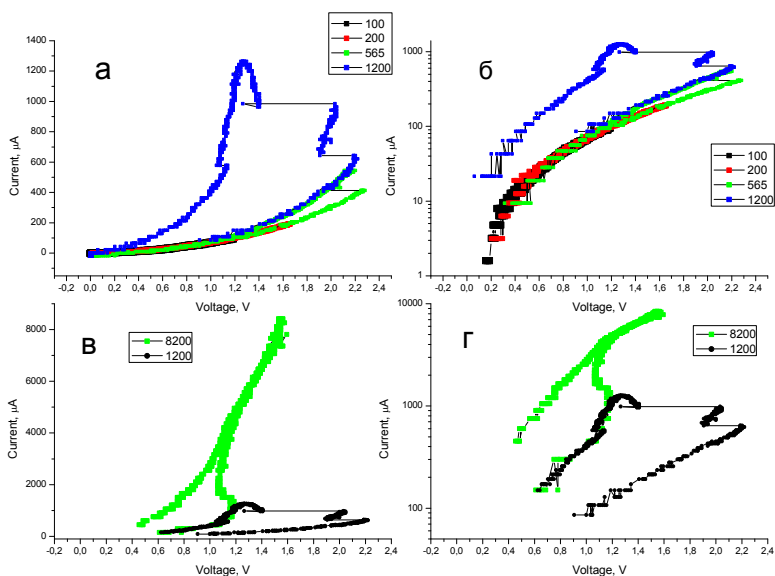


Рис. 5. Совмещенные ВАХ точки 2 для импульсов тока с I_{\max} : 0,1 мА, 0,2, 0,565, 1,2 и 8,2 мА в линейном (а, в) и полулогарифмическом масштабах (б, г) соответственно

Fig. 5. I–V curves of point 2 obtained for current pulses with I_{\max} : 0.1 mA, 0.2, 0.565, 1.2 and 8.2 mA in linear scale (a, в) and log-scale (б, г) correspondingly

Длительность одного скачка при экспериментах не определялась, но она составляла малую часть, по сравнению с дискретным шагом записи осциллограмм, равным ~ 2 мкс. Если величина скачка напряжения невелика, то характер зависимости $I(V)$ после скачка не меняется, оставаясь экспоненциальным, как это происходит, например, при первых скачках для точки 2 (рис. 5а, 5б), но меняются параметры экспоненты. Если скачок напряжения совсем мал, он мог скачкообразно исчезнуть, как видно на приведенных ВАХ для обеих точек (рис. 3 и 5, на рис. 3 участок с этими скачками отмечен стрелкой). После того как величина скачка или суммарная величина скачков составляла примерно половину от напряжения, при котором происходил начальный скачок, характер зависимости $I(V)$ менялся. Скачкообразных изменений напряжения больше не наблюдалось, но могли появляться участки с нулевым или отрицательным дифференциальным сопротивлением.

На рис. 6 приведены совмещенные ВАХ точки 1 для импульсов с $I_{\max} = 0,565$ мА, 1,2 мА и 8,2 мА в линейном и полулогарифмическом масштабах.

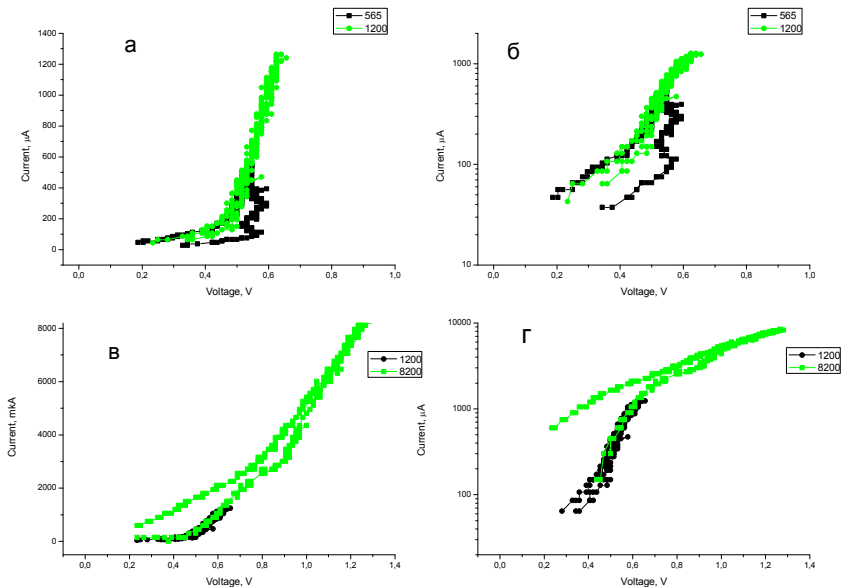


Рис. 6. Совмещенные ВАХ точки 1 в линейном и полулогарифмическом масштабах для импульсов тока с I_{\max} : 0,565 мА (а, б), 1,2 мА (а, б, в, г), 8,2 мА (в, г) соответственно

Fig. 6. I-V curves of point 1 in linear scale and log-scale obtained for current pulses with I_{\max} : 0.565 mA (a, б), 1.2 mA (a, б, в, г), 8.2 mA (в, г) correspondingly

Как следует из приведенных ВАХ, после пропускания импульса с самым большим значением тока в максимуме (в экспериментах это $I_{\max} = 8,2$ мА) зависимость $I(V)$ может иметь вид ломанной прямой (рис. 6, в, падающая ветвь ВАХ), а не просто прямой, отвечающей закону Ома.

К настоящему времени предложено несколько различных подходов – сугубо электрический, электронно-тепловой, индуцированной нуклеации – для объяснения процессов, лежащих в основе такого необычного поведения проводимости халькогенидных полупроводников. Подробный обзор этих подходов и моделей, которые их реализуют, приведен в [Богословский, Цэндин, 2012].

В рамках электронно-тепловой теории был рассмотрен сценарий формирования памяти в тонких пленках халькогенидных полупроводников [Фефелов и др., 2014], в котором скачку напряжения отвечает электронно-тепловой пробой. Возникший при этом токовый шнур при дальнейшем увеличении тока может расширяться, что отвечает участкам с мало меняющимся напряжением, и, наконец, при уменьшении тока происходит кристаллизация канала. Если электронно-тепловой пробой происходит при токе, меньшем критического, то кристаллизация канала не происходит в силу недостаточного джоулева тепла, при этом могут наблюдаться осцилляции напряжения [Фефелов и др., 2016]. Была сделана оценка температуры шнура тока [Фефелов и др., 2018].

Исходя из приведенных экспериментальных данных, можно также предположить, что формирование памяти может происходить поэтапно с постепенной кристаллизацией вещества пленки по толщине в зависимости от величины пропускаемого тока. Этот возможный сценарий мы рассмотрим далее, ограничиваясь только его качественной стороной. Скачки напряжения, как мы рассмотрим далее, можно будет также связать с особенностями процесса кристаллизации в дополнение к электронно-тепловому пробую.

Результаты экспериментов по термической кристаллизации тонких пленок GST допускают [Глухенькая и др., 2021], что процесс их кристаллизации из аморфного состояния в метастабильное кристаллическое (fcc) может происходить за счет перестроения атомов Ge и Sb из тетраэдрического и пирамидального окружения в аморфной фазе в дефектное октаэдрическое положение в fcc подрешетке, образованной атомами Te. В процессе кристаллизации пленки состава GST225 образуется фаза того же состава, что и аморфная. Такой вид кристаллизации осуществляется путем «единичных» прыжков атомов через фронт кристаллизации, т. е. по без-

диффузионному механизму. В этом случае кристаллизация может носить очень быстрый – «взрывной» характер [Шкловский, Кузьменко, 1989].

Перестроение атомов Ge и Sb может быть индуцировано и сильным электрическим полем.

В силу низкой проводимости вещества в исходном аморфном состоянии можно предположить, что при инжекции тока в пленку образуется пространственный заряд и имеет место ток, ограниченный пространственным зарядом (ТОПЗ) [Шерченков и др., 2017]. Экспоненциальная зависимость, наблюдающаяся на эксперименте, получается в этом случае при определенных допущениях о распределении ловушечных состояний по энергии [Lampert, Mark, 1970]. При ТОПЗ распределение поля по толщине пленки неоднородно: величина поля растет в направлении движения носителей тока (линейно при экспоненциальной зависимости). Величина поля логарифмически растет и по мере увеличения тока. Когда поле достигает критической величины у одного из электродов, там начинается процесс гетерогенной релаксации материала пленки из аморфного состояния к менее неравновесному метастабильному состоянию. Гетерогенная релаксация характеризуется наличием фазовых границ и осуществляется путем зарождения и роста равновесной или метастабильной кристаллической фазы. Как указывалось, такая кристаллизация может протекать очень быстро. В результате граница области кристаллизации быстро движется к другому электроду. Поле в закристаллизовавшейся области резко падает в силу высокой ее проводимости. Напряжение на образце также резко падает, поскольку схема работает в режиме постоянного тока. На осциллограммах и ВАХ этому процессу можно сопоставить скачки напряжения. Взрывная кристаллизация затухает, дойдя до области, где величина поля недостаточна для ее поддержания. Пока толщина закристаллизовавшегося участка пленки и, соответственно, его сопротивление невелики, дальнейший вид ВАХ будет определяться остающейся аморфной частью пленки. Для ТОПЗ, экспоненциально зависящих от напряжения, показатель экспоненты обратно пропорционален квадрату толщины аморфного слоя [Nardone et al., 2012], что согласуется с изменением параметров экспоненциальной зависимости, наблюдаемой на эксперименте (см. рис. 5б).

С другой стороны, для аморфных халькогенидных полупроводников имеет место эффект переключения [Коломиец, Лебедев, 1963; Ovshinsky, 1968], который состоит в том, что при достижении некоторого критического тока проводимость материала начинает резко расти по мере дальнейшего увеличения тока. Такая зависимость проводимости от силы тока находит

свое объяснение в рамках электронно-теплого подхода [Bogoslovskij, Tsendin, 2011]. И, таким образом, после того как определенная часть пленки закристаллизовалась, напряжение на аморфной части пленки, хотя и растущее по мере увеличения тока, может оказаться ещё недостаточным (толщина аморфной части мала), чтобы инициировать дальнейшую «взрывную» кристаллизацию, а ток уже достиг критической для начала эффекта переключения величины. Дальнейший ход ВАХ зависит от того, что больше при увеличении тока: уменьшение напряжения на аморфной части пленки из-за роста ее проводимости в результате переключения или омический рост напряжения на кристаллической части. В результате на ВАХ всего образца могут или появляться участки с отрицательным дифференциальным сопротивлением (рис. 5а и 5в), или не появляться (рис. 6а и 6в). ВАХ самой аморфной части пленки при эффекте переключения имеет S-образную форму: при достижении второго критического значения тока проводимость достигает насыщения и перестает меняться, а напряжение начинает опять расти по мере увеличения тока. Будет расти и напряжение на всем образце (рис. 5в). Кроме эффекта переключения для аморфного материала могут иметь место и различные перегревные механизмы возникновения S-образных ВАХ уже в кристаллической части пленки [Волков, Коган, 1968], что также может проявляться на ВАХ образца в виде участков с отрицательным дифференциальным сопротивлением при больших токах (рис. 6в). Наконец, при еще больших токах под действием джоулева тепла происходит постепенная кристаллизация оставшейся аморфной части полупроводника, инициированная повышением температуры. Если окончательно весь токовый канал переходит в кристаллическое состояние, то ВАХ приобретает омический вид.

Выводы. Полученные в работе результаты свидетельствуют о том, что исследование ВАХ в режиме контролируемого тока позволяет получать информацию о процессе формирования канала памяти в изучаемом материале.

Предложен возможный сценарий процесса кристаллизации токового канала в пленке под действием треугольных импульсов тока с увеличивающейся амплитудой.

На основании полученных данных можно сделать вывод также о том, что при последовательной подаче на образец треугольных импульсов тока с возрастающей амплитудой последовательно создаются состояния памяти, соответствующие каждому определенному значению I_{\max} , что, видимо, обусловлено все большей степенью кристаллизации канала памяти и, следовательно, уменьшением его сопротивления, т. е. образец может работать как мемристор.

Библиографический список

Богословский Н.А., Цэндин К.Д. Физика эффекта переключения и памяти в халькогенидных стеклообразных полупроводниках // Физика и техника полупроводников. 2012. Т. 46. Вып. 5. С. 577–608.

Волков А.Ф., Козан Ш.М. Физические явления в полупроводниках с отрицательной дифференциальной проводимостью // Успехи физических наук. 1968. Т. 96. Вып. 4. С. 633–672.

Глухенькая В.Б., Ромашкин А. В., Якубов А.О., Лазаренко П.И., Шерченков А.А., Козюхин С.А. Локальные структурные перестроения в тонких пленках $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ в процессе термической кристаллизации // Аморфные и микрокристаллические полупроводники: сб. тр. Междунар. конф., Санкт-Петербург, 05–07 июля 2021. СПб.: Политех-Пресс, 2021. С. 73–74.

Коломиец Б.Т., Лебедев Э.А. Вольтамперная характеристика точечного контакта со стеклообразными полупроводниками // Радиотехника и электроника. 1963. Т. 8. С. 2097–2098.

Фефелов С.А., Казакова Л.П., Козюхин С.А., Цэндин К.Д., Арсова Д., Памучиева В. Особенности вольт-амперных характеристик в тонких пленках состава $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ при использовании измерительной цепи с источником тока // Журнал технической физики. 2014. Т. 84. Вып. 4. С. 80–84.

Фефелов С.А., Казакова Л.П., Арсова Д., Козюхин С.А., Цэндин К.Д., Приходько О.Ю. Осцилляции напряжения при эффекте переключения в режиме токовой моды в тонких слоях халькогенидов системы Ge-Sb-Te // Физика и техника полупроводников. 2016. Т. 50. Вып. 7. С. 958–962.

Фефелов С.А., Казакова Л.П., Богословский Н.А., Цэндин К.Д., Оценка температуры шнура тока, возникающего при переключении в халькогенидах системы GeSbTe // Физика и техника полупроводников. 2018. Т. 52. Вып. 12. С. 1503–1506.

Шерченков А.А., Козюхин С.А., Лазаренко П.И., Бабич А.В., Богословский Н.А., Сагунова И.В., Редичев Е.Н. Электрофизические свойства и механизмы переноса в тонких пленках материалов фазовой памяти на основе халькогенидных полупроводников квазибинарного разреза $\text{GeTe-Sb}_2\text{Te}_3$ // Физика и техника полупроводников. 2017. Т. 51. Вып. 2. С. 154–160.

Шерченков А.А., Козюхин С.А., Боргардт Н.И., Лазаренко П.И., Бабич А.В., Якубов А.О., Терехов Д.Ю., Зыбина Ю.С. Влияние метода осаждения на свойства тонких пленок материалов фазовой памяти // Аморфные и микрокристаллические полупроводники: сб. тр. Междунар. конф., Санкт-Петербург, 19–21 ноября 2018. СПб.: Политех-Пресс, 2018. С. 83–84.

Шкловский В.А., Кузьменко В.М. Взрывная кристаллизация аморфных веществ // Успехи физических наук. 1989. Т. 157. Вып. 2. С. 311–338.

Якубов А.О., Шерченков А.А., Бабич А.В., Лазаренко П.И., Терехов Д.Ю. Изучение особенностей кинетики кристаллизации тонких пленок материалов фазовой памяти по результатам измерений температурных зависимостей удельных

сопротивлений // Аморфные и микрокристаллические полупроводники: сб. тр. Междунар. конф., Санкт-Петербург, 19–21 ноября 2018. СПб.: Политех-Пресс, 2018. С. 96–97.

Bogoslovskij N.A., Tsendin K.D. Electronic–thermal switching and memory in chalcogenide glassy semiconductors // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2011. Vol. 357. P. 992–995.

Bogoslovskiy N.A., Tsendin K.D. Multiphonon tunnel ionization of negative-U centers – the origin of switching and memory effects in chalcogenide glasses // *Journal of optoelectronics and advanced materials*. 2011. Vol. 13, no. 11–12. P. 1423–1428.

Lampert M.A., Mark P. Current injection in Solids. Academic Press. New York, 1970.

Nardone M., Simon M., Karpov I. V., Karpov V. G. Electrical conduction in chalcogenide glasses of phase change memory // *J.Appl.Phys*. 2012. No. 112. 071101.

Ovshinsky R.S. Reversible electrical switching phenomena in disordered structures // *Phys. Rev. Lett*. 1968. Vol. 21. P. 1450–1453.

Raoux S., Welnic W., Ielmini D. Phase change materials and their application to nonvolatile memories // *Chem. Rev*. 2009. Vol. 110, no. 1. P. 240–267.

Yamada N., Ohno E., Nishiuchi K., Akahira N., Takao M. Rapid-phase transitions of GeTe-Sb₂Te₃ pseudobinary amorphous thin films for an optical disk memory // *J.Appl.Phys*. 1991. Vol. 69, no. 5. P. 2849–2856.

References

Bogoslovskij N.A., Tsendin K.D. Electronic–thermal switching and memory in chalcogenide glassy semiconductors. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2011, vol. 357, pp. 992–995.

Bogoslovskiy N.A., Tsendin K.D. Multiphonon tunnel ionization of negative-U centers – the origin of switching and memory effects in chalcogenide glasses. *Journal of optoelectronics and advanced materials*, 2011, vol. 13, no. 11–12, pp. 1423–1428.

Bogoslovskiy N.A., Tsendin K.D. Fizika efekta pereklyucheniya i pamyati v khalkogenidnykh stekloobraznykh poluprovodnikakh. *Fizika I tekhnika poluprovodnikov*, 2012, vol. 46, no. 5, pp. 577–608. (In Russ.)

Fefelov S.A., Kazakova L.P., Kozyukhin S.A., Tsendin K.D., Arsova D., Pamukchieva V. Osobennosti volt-ampernykh kharakteristik v tonkikh plenkakh sostava Ge₂Sb₂Te₅ pri ispolzovanii izmeritelnoi tsepi s istochnikom toka. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 2014, vol. 84, no. 4, pp. 80 – 84. (In Russ.)

Fefelov S.A., Kazakova L.P., Arsova D., Kozyukhin S.A., Tsendin K.D., Prikhodko O.Yu. Ostsillyatsii napryazheniya pri effekte pereklyucheniya v rezhime tokovoi mody v tonkikh sloyakh khalkogenidov sistemy Ge-Sb-Te. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 2016, vol. 50, no. 7, pp. 958–962. (In Russ.)

Glukhenkaya V.B., Romashkin A.V., Yakubov A.O., Lazarenko P.I., Sherchenkov A.A., Kozyukhin S.A. Lokalnye strukturnye perestroeniya v tonkikh plenkakh Ge₂Sb₂Te₅ v

protseste termicheskoi kristallizatsii. *Amorfnye i mikrokrystallicheskie poluprovodniki* / Proceedings of the International conference. Saint-Petersburg (Russia), July, 05–07, 2021. St. Petersburg (Russia):[Politech-Press], 2021, pp. 73–74. (In Russ.)

Kolomiets B.T., Lebedev E.A. Voltampernaya kharakteristika tochechnogo kontakta so stekloobraznymi poluprovodnikami. *Radiotekhnika i elektronika*, 1963, vol. 8, pp. 2097–2098. (In Russ.)

Lampert M.A., Mark P. Current injection in Solids. New York: Academic Press, 1970.

Nardone M., Simon M., Karpov I. V., Karpov V. G. Electrical conduction in chalcogenide glasses of phase change memory. *J. Appl. Phys.*, 2012, no. 112, 071101

Ovshinsky R.S. Reversible electrical switching phenomena in disordered structures. *Phys. Rev. Lett.*, 1968, vol. 21, pp. 1450–1453.

Raoux S., Welnic W., Ielmini D. Phase change materials and their application to nonvolatile memories. *Chem. Rev.*, 2009, vol. 110, no. 1, pp. 240–267.

Sherchenkov A.A., Kozyukhin S. A., Borgardt N.I., Lazarenko P.I., Babich A.V., Yakubov A.O., Trekhov D.Yu., Zybina Yu.S. Vliyanie metoda osazhdeniya na svoistva tonkikh plenok materialov fazovoi pamyati. *Amorfnye i mikrokrystallicheskie poluprovodniki* / Proceedings of the International conference. Saint-Petersburg (Russia), November, 19–21, 2018. St. Petersburg (Russia):[Politech-Press], 2018, pp. 83–84. (In Russ.)

Sherchenkov A.A., Kozyukhin S. A., Lazarenko P.I., Babich A.V., Bogoslovsky N.A., Sagunova I. V., Redichev E.N. Elektrofizicheskie svoistva i mekhanizmy perenosa v tonkikh plenkakh materialov fazovoi pamyati na osnove khalkogenidnykh poluprovodnikov kvazibinarnogo razreza GeTe-Sb₂Te₃. *Fizika I tekhnika poluprovodnikov*, 2017, vol. 51, no. 2, pp. 154–160. (In Russ.)

Shklovskii V.A., Kuzmenko V.M. Vzryvnaya krisstalizatsiya amorfnykh vetshestv. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1989, vol. 157, no. 2, pp. 311–338. (In Russ.)

Volkov A.F., Kogan S.M. Fizicheskie yavleniya v poluprovodnikakh s otritsatelnoi differentsialnoi provodimostyu. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1968, vol. 96, no. 4, pp. 633–672. (In Russ.)

Yakubov A.O., Sherchenkov A.A., Babich A.V., Lazarenko P.I., Trekhov D.Yu. Izuchenie osobennostei kinetiki kristallizatsii tonkikh plenok materialov fazovoi pamyati po rezultatam izmerenii temperaturnykh zavisimostei udelnykh soprotivlenii. *Amorfnye i mikrokrystallicheskie poluprovodniki* / Proceedings of the International conference. Saint-Petersburg (Russia), November, 19 – 21, 2018. St. Petersburg (Russia):[Politech-Press], 2018, pp. 96–97. (In Russ.)

Yamada N., Ohno E., Nishiuchi K., Akahira N., Takao M. Rapid-phase transitions of GeTe-Sb₂Te₃ pseudobinary amorphous thin films for an optical disk memory. *J.Appl.Phys.*, 1991, vol. 69, no. 5, pp. 2849–2856.

Материал поступил в редакцию 22.10.21

Фефелов С.А., Казакова Л.П., Богословский Н.А., Былев А.Б., Анненкова А.М. Исследование эффекта памяти в тонких пленках аморфных халькогенидных полупроводников состава GST225 // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022. Вып. 238. С. 228–242.* DOI: 10.21266/2079-4304.2022.238.228-242

Проведено исследование эффекта памяти в тонких пленках халькогенидных полупроводников состава GST225 путем пропускания через пленку последовательности треугольных импульсов тока с нарастающей амплитудой. Начальное состояние вещества пленки аморфное. Были получены синхронные осциллограммы импульса тока через образец и напряжения на нем в режиме заданного тока. По ним построены вольт-амперные характеристики. Характерными особенностями, наблюдаемыми на некоторых ВАХ, являются скачки напряжения и участки с отрицательным дифференциальным сопротивлением. После пропускания импульса тока самой большой амплитуды ВАХ образца становится почти омической. Анализ всех ВАХ позволяет предположить, что формирование памяти, по-видимому, происходит поэтапно с постепенной кристаллизацией вещества пленки по толщине в зависимости от величины пропускаемого импульса тока. Этот возможный сценарий обсуждается здесь только качественно. Скачки напряжения, по-видимому, могут при определенных условиях объясняться особенностями процесса кристаллизации («взрывной» кристаллизацией), находящегося в аморфном состоянии вещества пленки, причем кристаллизация инициируется сильным электрическим полем. Принимая также во внимание, что при инъекции тока в пленку, когда она находится в состоянии с низкой проводимостью, по-видимому, образуется пространственный заряд, и может иметь место неоднородное распределение поля по толщине пленки. Можно допустить, что кристаллизация начинается у одного из электродов, где поле имеет наибольшую величину. «Взрывная» кристаллизация аморфного вещества затухает, когда поле вблизи границы области кристаллизации оказывается недостаточным для ее поддержания. После того, как часть пленки по толщине закристаллизовалась таким способом и условия для взрывной кристаллизации далее не выполняются, дальнейшая кристаллизация может быть обусловлена электронно-тепловыми механизмами. Что касается участков ВАХ с отрицательным дифференциальным сопротивлением, то их, по-видимому, можно связать с эффектом переключения, присущим аморфным халькогенидным полупроводникам.

Ключевые слова: халькогенидные полупроводники, фазовая память.

Fefelov S.A., Kazakova L.P., Bogoslovskiy N.A., Bylev A.B., Annenkova A.M. Study of memory effect in amorphous chalcogenide semiconductor GST225 thin films. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicoskoj Akademii*, 2022, iss. 238, pp. 228–242 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2022.238.228-242

We explored phase change memory phenomena in thin film of chalcogenide-glass semiconductors GST225 by passing through the film a sequence of triangular current impulses with increasing amplitude. Initially the film was in amorphous state. We took simultaneous oscilloscope pictures of the voltage across the thin-film “sandwich” type sample and the current passing through the above unit as a function of time. Then we got the current-voltage characteristics of the unit done. Distinctive features observed on some of the oscilloscope pictures and current-voltage characteristics are places with rapid decrease in voltage and negative differential resistance. After passing current impulse with the biggest amplitude the current-voltage characteristic of the unit is becoming almost ohmic. Analysis of all the current-voltage characteristics obtained allows us to suggest that the memory state formation apparently occurs in stages with gradual crystallization of amorphous substance of the film on thickness depending on amplitude of the triangular current impulses passing through the unit. This possible scenario is discussed here only from qualitative point of view. The rapid decreases in voltage apparently can under certain conditions be explained by peculiarities of crystallization process (“explosive” crystallization) while crystallization itself is initiated by electrical field. Taking also into account that under injection of current, when the film is in poorly conducting state, a space charge appears to form and as consequence a nonuniform distribution of field on thickness of the film can arise we can assume that crystallization starts at one of electrodes where the field is the biggest. “Explosive” crystallization of amorphous substance dies down when the field near the front of crystallization turns out to be not enough for holding it. After a part of the film is crystallized such a way and conditions for “explosive” crystallization are not more fulfilled the further crystallization can run by heating. As to a part of current-voltage characteristic with negative differential resistance they apparently are connected with switching phenomena that is characteristic of amorphous chalcogenide semiconductors.

Key words: chalcogenide semiconductors, phase change memory

ФЕФЕЛОВ Сергей Аркадьевич – ведущий инженер Физико-технического института имени А.Ф. Иоффе. ORCID 0000-0002-8815-4113.

194021, ул. Политехническая, д. 26, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: s.fefelov@list.ru

FEFELOV Sergey A. – lead engineer, Ioffe institute, St. Petersburg. ORCID 0000-0002-8815-4113.

194021, 26 Politekhnicheskaya. St. Petersburg, Russia. E-mail: s.fefelov@list.ru

КАЗАКОВА Людмила Павловна – доцент кафедры физики Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат физико-математических наук, доцент. ORCID 0000-0003-3818-7459.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: ljidakaz@yandex.ru

KAZAKOVA Lyudmila P. – PhD (Physics), Assistant Professor of the Department of Physics. St.Petersburg State Forest Technical University. ORCID 0000-0003-3818-7459.

194021, Institutsky per. 5, St. Petersburg, Russia. E-mail: ljudakaz@yandex.ru

БОГОСЛОВСКИЙ Никита Александрович – научный сотрудник Физико-технического института имени А.Ф. Иоффе, кандидат физико-математических наук. ORCID 0000-0002-2265-0245.

194021, ул. Политехническая, д.26, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: nikitabogoslovskiy@gmail.com.

BOGOSLOVSKIY Nikita A. – PhD (Physics), research fellow, Ioffe institute, St. Petersburg. ORCID 0000-0002-2265-0245.

194021, 26 Politekhnikeskaya. St. Petersburg, Russia. E-mail: nikitabogoslovskiy@gmail.com.

БЫЛЕВ Александр Борисович – заведующий кафедрой физики Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат физико-математических наук, доцент. ORCID 0000-0001-7845-9629.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: ab_bylev@mail.ru

BYLEV Aleksandr B. – PhD (Physics), Head of the Department of Physics. St.Petersburg State Forest Technical University. ORCID 0000-0001-7845-9629.

194021, Institutsky per. 5, St. Petersburg, Russia. E-mail: ab_bylev@mail.ru

АННЕНКОВА Александра Михайловна – доцент кафедры физики Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат физико-математических наук, доцент. ORCID 0000-0002-0633-7216.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: annenkovaaly@mail.ru

ANNENKOVA Aleksandra M. – PhD (Physics), Assistant Professor of the Department of Physics. St.Petersburg State Forest Technical University. ORCID 0000-0002-0633-7216.

194021, Institutsky per. 5, St. Petersburg, Russia. E-mail: annenkovaaly@mail.ru