

# Механизмы токопрохождения в структуре $\text{TiN}/\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5/\text{Au}$

© С.А. Фефелов<sup>1</sup>, Л.П. Казакова<sup>1,2</sup>, Н.А. Богословский<sup>1</sup>, А.Б. Былев<sup>2</sup>

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

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

E-mail: s.fefelov@list.ru

Поступила в Редакцию 10 октября 2024 г.

В окончательной редакции 27 декабря 2024 г.

Принята к публикации 16 января 2025 г.

Представлены результаты исследования пленок  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  субмикронной толщины от 40 до 800 нм. Измерены вольт-амперные характеристики структур  $\text{TiN}/\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5/\text{Au}$  и проведено их сравнение. Установлено, что сопротивление электродов и приконтактная область пространственного заряда оказывают значительное влияние на вольт-амперную характеристику. Показано, что область пространственного заряда, расположенная главным образом в пленке  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ , является той областью, где развивается процесс переключения. Дана оценка критической напряженности поля, при достижении которой в области пространственного заряда начинается процесс переключения. Предложен метод определения напряженности поля в массиве аморфной части пленки до переключения.

**Ключевые слова:** халькогенидные стеклообразные полупроводники,  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ , память с изменяемым фазовым состоянием, контактное сопротивление, переключение.

DOI: 10.61011/FTP.2024.12.59826.7194

## 1. Введение

В последние годы начали выпускать элементы энергонезависимой памяти на основе халькогенидных стеклообразных полупроводников (ХСП). Такие элементы памяти называют памятью с изменяемым фазовым состоянием (Phase Change Memory), или просто фазовой памятью. В основе их функционирования лежит значительная разница в проводящих свойствах халькогенидного полупроводника в аморфном и кристаллическом состояниях, а также то, что некоторые составы ХСП, в частности  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  (GST225), путем подачи соответствующего импульса тока можно быстро и многократно переводить из аморфного состояния в кристаллическое и обратно. Сами же аморфное и кристаллическое состояния могут сохраняться длительное время без потребления какой-либо дополнительной энергии. Применяемые конструктивные решения для элементов фазовой памяти описаны, например, в обзоре [1]. Подбором параметров импульсов тока можно добиться частичной кристаллизации вещества в ячейке памяти, что позволит перейти к многоуровневой записи данных и значительно повысить эффективность элементов фазовой памяти [2]. В силу этого же фазовая память рассматривается как перспективный кандидат для нейроморфных вычислений [3], так как возможность находиться в состояниях с промежуточным значением сопротивления является важным требованием к искусственным синапсам. Описание как существующих, так и перспективных областей применения материалов фазовой памяти и методов модификации ХСП для получения материалов с подходящими характеристиками можно найти, например,

в обзоре [4]. Однако, несмотря на то что ключевые свойства халькогенидных полупроводников — эффекты переключения и памяти — были обнаружены еще в 1960-х гг. Коломийцем и Лебедевым [5], Пирсоном [6] и Овшинским [7], физика происходящих в ХСП процессов при подаче импульсов тока до конца еще не понята. Обсуждение различных механизмов, предлагавшихся для объяснения эффектов переключения и памяти, приведено, например, в обзоре [8]. Кроме того, переход к субмикронным и, более того, к нанометровым размерам активной области ХСП в элементах фазовой памяти требует особого учета контактных сопротивлений, поскольку они могут влиять на работу устройств памяти. Этот вопрос привлекает в последние годы внимание исследователей и не получил еще своего решения [9,10]. Отсутствие однозначного описания процессов, происходящих в тонких пленках ХСП при подаче на них импульсов тока, тормозит развитие технологий изготовления и совершенствование элементов фазовой памяти. В силу сказанного исследование особенностей прохождения тока через тонкие пленки ХСП остается актуальной задачей.

В настоящей работе приведены результаты исследования пленок GST225 субмикронной толщины от 40 до 800 нм. Ток пропускался в поперечном направлении. При рассмотрении протекания тока в пленке GST учитывалось влияние контактов. Полученные данные по механизмам протекания тока в приконтактной области пространственного заряда (ОПЗ) могут представлять интерес для оптимизации конструктивных параметров элементов фазовой памяти.

## 2. Образцы и методика эксперимента

В данной статье представлены результаты исследования пленок ХСП состава GST225 разной толщины при подаче на них серии треугольных импульсов тока возрастающей амплитуды. Так как вольт-амперная характеристика пленок ХСП, как правило, имеет S-образный характер, в качестве управляемого параметра в эксперименте была выбрана сила тока. Преимущества использования генератора тока в измерительной схеме обсуждались в работе [11]. Исследуемые образцы имели „сэндвич“-структуру, состоящую из термически окисленной кремниевой подложки толщиной  $\approx 1$  мм (слой окисла  $SiO_2$  на поверхности имел толщину  $\approx 1$  мкм), нанесенной далее на подложку слоя сложного электрода суммарной толщиной 100 нм (25 нм TiN, 50 нм W, 25 нм TiN), напыленной поверх электрода пленки GST225 с толщинами 40, 130, 400 или 800 нм. В качестве второго электрода использовался прижимной золотой электрод. Площадь пленки составляла  $\approx 1$  см<sup>2</sup>. Верхний прижимной электрод имел площадь контакта с пленкой  $\approx 10^{-4}$  см<sup>2</sup>. Пленка GST225 наносилась методом магнетронного распыления поликристаллической мишени. Состав и характеристики пленки были проверены методами оже-спектроскопии, энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии, рентгеновской дифракции, рентгенофазового анализа и просвечивающей электронной микроскопии. Было установлено, что состав пленки близок к составу GST225 с однородным распределением элементов и пленка находится в аморфном состоянии [12,13].

На рис. 1 представлена схема измерительной установки. Место контакта с пленкой верхнего прижимного электрода можно было менять. Токоподводящий контакт к нижнему электроду также был прижимной, но его положение фиксировалось и далее не менялось. При одном и том же положении верхнего прижимного электрода на пленку подавалась последовательность треугольных импульсов тока с нарастающими амплитудными значениями. Для контроля импульс с данным амплитудным значением мог быть повторен. Максимальное значение силы тока в импульсах изменялось от 6 мкА до 8 мА, что охватывало допустимый интервал токов и напряжений, не вызывающих разрушения пленок. Длительность

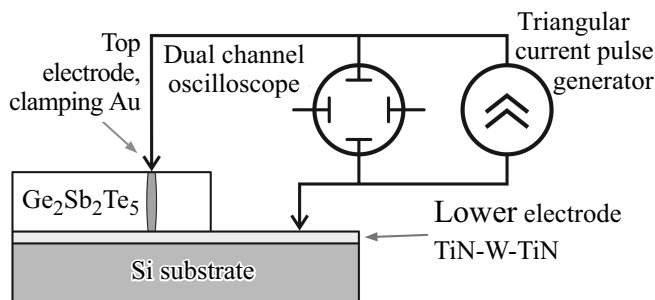


Рис. 1. Схема установки.

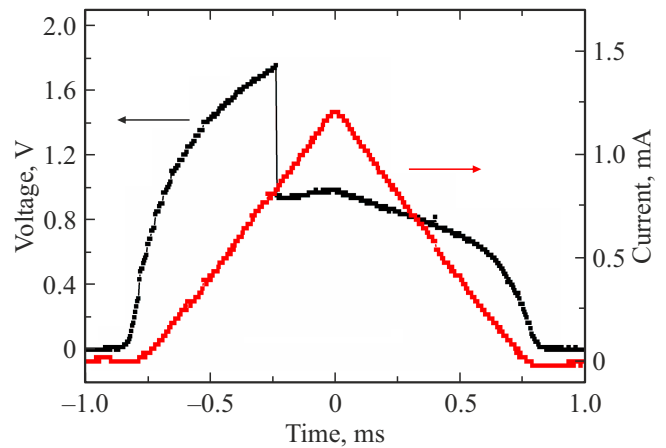


Рис. 2. Синхронные осциллограммы напряжения на образце и токового импульса.

импульса составляла  $\sim 2$  мс. Исследовались свеженанесенные пленки. Измерения повторялись в разных точках поверхности пленки, что давало возможность оценить разброс в значениях параметров, характеризующих прохождение токового импульса через пленку.

На рис. 2 для примера представлены синхронные осциллограммы напряжения на образце и тока через образец. Так как сила тока изменяется линейно со временем, ось времени на осциллограмме напряжения на образце фактически есть ось тока и осциллограмма напряжения фактически сразу дает вольт-амперную характеристику (ВАХ) образца на пропускаемом импульсе тока.

На приведенной на рис. 2 осциллограмме напряжения на образце виден резкий скачок напряжения (переключение). Длительность скачка на эксперименте не определялась. Запись напряжений, выдаваемых на цифровой осциллограф, велась с шагом  $\sim 1$  мкс.

Полученные по осциллограммам ВАХ состоят из части, построенной по растущей ветви импульса тока, и части, построенной по падающей ветви импульса тока. Тем самым можно сравнивать растущую и падающую ветви ВАХ одного и того же импульса, а также падающую ветвь ВАХ одного импульса с растущей ветвью ВАХ следующего импульса.

## 3. Экспериментальные результаты и обсуждение

Во всех случаях растущая ветвь ВАХ следующего импульса шла по падающей ветви предыдущего импульса в пределах совпадения сил токов. Повторная подача импульса тока с тем же амплитудным значением давала ВАХ, совпадающую с падающей ветвью ВАХ предшествующего импульса. Растущая и падающая ветви ВАХ для одного импульса с данным значением амплитуды тока, поданного впервые, могли различаться. Если

амплитуда тока в импульсе была меньше пороговой, т. е. переключение не происходило, растущая и падающая ветви ВАХ совпадали. После того как происходил эффект переключения, сопротивление образца уменьшалось при подаче импульса тока с большей амплитудой. Сопротивление образца после переключения определяется амплитудой поданного на него импульса тока.

По результатам наших измерений качественный вид ВАХ и характер изменения формы ВАХ, построенных по подаваемым импульсам тока, были одинаковы для всех исследуемых образцов с пленками всех толщин.

На рис. 3 представлена типичная для пленок всех толщин ВАХ на примере одной из ВАХ, полученной на образце с толщиной пленки 800 нм. Черным цветом показана ВАХ, измеренная на импульсе с переключением, красным цветом показана ВАХ, построенная по импульсу тока, следующему за импульсом с переключением. Отмечены характерные параметры ВАХ:  $U_{th}$  — напряжение переключения,  $I_{th}$  — ток переключения,  $U_h$  — напряжение поддержки,  $I_{up}$  — ток окончания вертикального участка ВАХ,  $U_8$  — напряжение при токе 8 мА,  $U_b$  — напряжение, характеризующее прямолинейную часть ВАХ, для падающей ветви импульса тока в 8 мА.

При первой подаче импульсов тока с нарастающей амплитудой, начиная с минимальной амплитуды в 6 мкА, пока ток в импульсе не превышает ток переключения  $I_{th}$ , растущая и падающая ветви ВАХ идут по участку 1–2. При достижении  $U_{th}$  происходит переключение, напряжение резко падает до  $U_h$ , и затем, как правило, на ВАХ следует вертикальный участок 3–4. ВАХ, отвечающая падающей ветви токового импульса, при котором произошло переключение, идет по линии 4–3–1. Если амплитудное значение следующего импульса не превышает  $I_{up}$ , то соответствующие ему растущая и падающая ветви ВАХ, как правило, идут по участку 1–3–4. При дальнейшем увеличении тока в импульсе ВАХ переходит на участок 4–5, растущая и падающая ветви ВАХ теперь различаются. В конце концов формируется частично прямолинейная ВАХ 1–5, которую можно охарактеризовать напряжением  $U_b$  и дифференциальным сопротивлением  $R_d$  для прямолинейного участка. Значения всех указанных величин имеют некоторый разброс в зависимости от положения верхнего прижимного электрода на поверхности пленки. Средние значения этих параметров по десяти точкам приведены в таблице для пленок разных толщин.

Следует отметить, что вертикальный участок 3–4 на ВАХ практически отсутствует для пленки GST толщиной 40 нм и чем толще пленка, тем вертикальный участок длиннее. В таблице приведены также средние по поверхности значения напряжений для токов в 6 и 100 мкА для участка 1–2 на ВАХ.

Рассмотрим участок 1–5 на ВАХ образцов. Как следует из представленных в таблице данных, для образцов с пленками толщиной 40, 400 и 800 нм напряжение  $U_8$  при токе  $I = 8$  мА практически не зависит от толщины

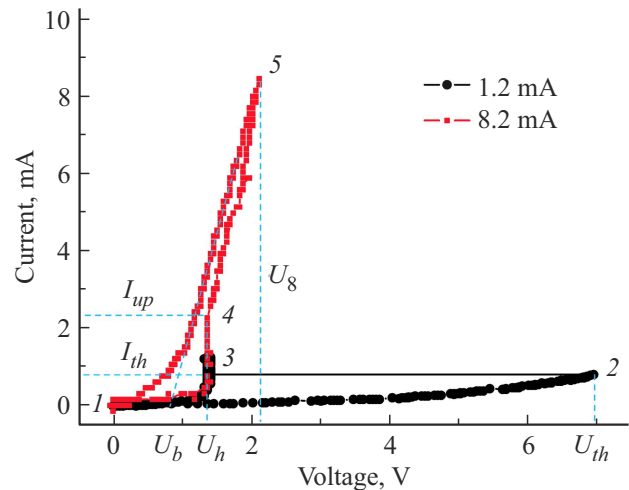
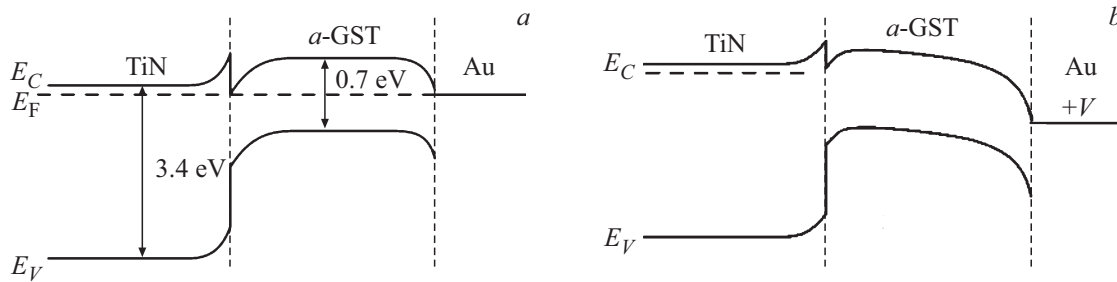


Рис. 3. ВАХ для пленки толщиной 800 нм, построенные по импульсу тока с амплитудой 1.2 мА (с переключением) и сразу следующего за ним импульсу тока с амплитудой 8.2 мА.

пленки. Так как падающая ветвь ВАХ (участок 5–1) для этого импульса тока практически прямолинейна в своей верхней части и ее наклон также слабо зависит от толщины пленки, это означает, что сопротивление пленки на этом участке ВАХ практически не вносит вклада в общее сопротивление образца, а  $R_d$  можно рассматривать как оценку для сопротивления электродов ( $\approx 200$  Ом). Для образца с пленкой 130 нм определенное из наклона ВАХ на участке 5–1 сопротивление оказалось равным  $\sim 100$  Ом, что объясняется другой толщиной нижнего электрода в этом образце. Разница в значениях сопротивлений электродов образцов (100 и 200 Ом) полностью объясняет отличие напряжения  $U_8$  для образца с пленкой 130 нм от напряжений  $U_8$  для остальных образцов в таблице. В самом деле, для верхней части участка 5–1 ВАХ, в силу ее прямолинейности,  $U \approx U_b + IR_d$  (см. рис. 3). Если бы сопротивление электрода для образца с пленкой 130 нм было также  $\sim 200$  Ом, то для напряжения  $U_8$  у такого образца мы получили бы  $U_8 \approx 0.47 + 8.0 \cdot 10^{-3} \cdot 200 = 2.07$  В вместо 1.29 В (см. таблицу), что хорошо соответствует напряжениям  $U_8$  остальных образцов. Это согласие служит дополнительным подтверждением того, что для

Параметры вольт-амперных характеристик

Толщина пленки GST	40 нм	130 нм	400 нм	800 нм
$U$ , В при $I = 6$ мкА	0.45	0.47	0.53	0.64
$U$ , В при $I = 100$ мкА	1.02	1.53	2.34	3.27
$U_{th}$ , В	1.41	1.89	6.94	7.49
$I_{th}$ , мА	0.40	0.27	1.09	0.49
$U_h$ , В	0.75	0.82	1.18	1.59
$U_8$ , В при $I = 8$ мА	2.18	1.29	2.05	2.15
$U_b$ , В	0.50	0.47	0.70	0.84
$R_d$ , кОм	0.21	0.10	0.18	0.15

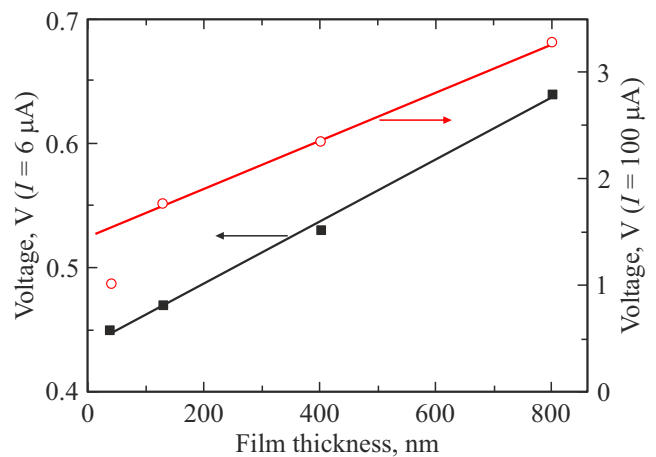


**Рис. 4.** Энергетическая диаграмма структуры TiN/a-GST225/Au: *a* — без приложенного напряжения, *b* — положительный потенциал на Au.

участков 1–5 на ВАХ образцов пленка находится уже в кристаллическом состоянии и дает очень малый вклад в сопротивление образцов. Начальная часть участка 1–5 на ВАХ обусловлена барьерными свойствами контактов, как обсуждается далее.

Обсудим участок 1–2 на ВАХ образцов. На этом участке пленка GST находится еще в аморфном состоянии. При токе 6 мкА напряжение для пленки в 40 нм составляет 0.45 В, что соответствует сопротивлению образца 75 кОм при средней напряженности поля в пленке  $\sim 10^5$  В/см. С учетом проведенной оценки сопротивления электродов такое большое сопротивление образца должно быть обусловлено пленкой GST. В работе [14] для аналогичных пленок было получено значение удельного сопротивления  $\rho = 2.8 \cdot 10^4$  Ом·см для комнатной температуры и напряженности поля  $10^3$  В/см, а с ростом температуры и напряженности поля удельное сопротивление падало. Если принять сечение токового канала равным площади контакта верхнего прижимного электрода ( $10^{-4}$  см<sup>2</sup>), то для пленки толщиной 40 нм сопротивление пленки будет  $\leq 1$  кОм. Таким образом, следует допустить, что сопротивление данного образца (толщина 40 нм) связано в основном с областью контакта пленки с электродами. С другой стороны, общепризнано, что ХСП имеют большую плотность ( $\sim 10^{19}$  см<sup>-3</sup>) разного рода дефектов, которые образуют ловушки для носителей заряда. Такие состояния могут вести к появлению поверхностных потенциальных барьеров блокирующего типа. Формирование блокирующих барьеров на контактах металл-ХСП экспериментально подтверждено для различных составов ХСП [15,16], причем величина барьера слабо зависела от работы выхода металла. Барьер Шоттки на контакте TiN/GST обсуждался в работе [17]. На рис. 4 схематически показана энергетическая диаграмма структуры TiN/a-GST225/Au, в которой учтено, что аморфный GST225 является полупроводником с преобладающим дырочным типом проводимости и шириной запрещенной зоны  $\sim 0.7$  эВ [18,19], TiN — широкозонный полупроводник *n*-типа с шириной запрещенной зоны  $\sim 3.4$  эВ и высокой концентрацией носителей заряда [20,21].

В наших экспериментах на золотой электрод подавался „плюс“. Если считать GST225 полупроводником



**Рис. 5.** Зависимость напряжения на образце от толщины пленки при токах 6 и 100 мкА.

*p*-типа [18,19], то контакт (*a*-GST225/Au) при такой подаче внешнего напряжения оказывается обратно смещенным. С увеличением подаваемого напряжения область пространственного заряда, возникающая на этом контакте, главным образом со стороны пленки, расширяется вглубь пленки. Контакт же TiN/*a*-GST225 оказывается прямо смещенным. Согласно энергетической диаграмме этого контакта, ток через образец будет обусловлен в основном рекомбинацией электронов и дырок на центрах рекомбинации, которыми могут служить многочисленные дефекты в пленке GST. С ростом напряжения вклад в ток будет давать также поток электронов по зоне проводимости. Таким образом, поле в пленке GST является сильно неоднородным и в приконтактных областях будет больше, чем в объеме пленки. Эти соображения согласуются с выводом, что основной вклад в сопротивление образца вносит область пленки вблизи контактов.

Дополнительным подтверждением приведенной картины служит зависимость напряжения на образцах от толщины пленки. На рис. 5 представлены напряжения на образцах при токах 6 и 100 мкА в зависимости от толщины пленки для участка 1–2 ВАХ (данные из таблицы).

При токе 6 мкА наблюдается линейная зависимость напряжения от толщины. Такая линейная зависимость допускает следующее объяснение, если принять, что температура образцов одинакова независимо от толщины пленки. Поле в пленках при постоянной и одинаковой у всех образцов температуре будет определяться только током, а размеры ОПЗ не будут зависеть от толщины пленки. Если  $U_c$  — напряжение, приходящееся на контакты,  $E_f$  — напряженность поля в объеме пленки,  $l$  — толщина пленки,  $l_c$  — размер ОПЗ, то напряжение на образце можно представить в виде  $U = U_c + E_f(l - l_c)$ , что и дает линейную зависимость  $U$  от  $l$ , а напряженность поля в объеме пленки  $E_f$  определяет наклон этой прямой. Из графика получаем  $E_f = 2.5 \cdot 10^3$  В·см. С учетом значения плотности тока  $j = \frac{I}{S} = \frac{6 \cdot 10^{-6}}{10^{-4}} = 0.06$  А/см<sup>2</sup> находим удельное сопротивление материала пленки  $\rho = 4 \cdot 10^4$  Ом·см, что согласуется с результатом работы [14]. Это согласие оправдывает и сделанное допущение по температуре, температура образца — комнатная. При малых токах в силу хорошей теплоотдачи образца роль температуры, по-видимому, невелика.

При токе 100 мкА линейная зависимость напряжения от толщины также наблюдается, если исключить из рассмотрения образец с толщиной пленки 40 нм. Это можно связать с тем, что у образца с толщиной пленки 40 нм ОПЗ распространилась практически на всю толщину пленки. В остальных пленках напряженность поля в объеме пленок при этом токе, как следует из графика, будет  $E_f = 2.3 \cdot 10^4$  В·см, а удельное сопротивление —  $\rho = 2 \cdot 10^4$  Ом·см. Как видим, с ростом поля удельное сопротивление материала пленки уменьшается в согласии с данными работы [14], хотя это падение и несколько меньше, чем в [14].

Токи переключения для пленок всех толщин в нашем случае превышали 100 мкА. Для образца с толщиной 40 нм при таких токах ОПЗ простирается на всю толщину пленки и в этой области происходят процессы, которые инициируют переключение. В силу того что качественный вид ВАХ и характер изменения формы ВАХ, как указывалось, одинаковы для образцов с пленками всех толщин, можно заключить, что и для пленок других толщин переключение происходит в ОПЗ контакта GST225/Au. Анализ ВАХ на участке 1–2 в непосредственной окрестности напряжения переключения дает зависимость вида  $I \sim U^m$ , где значение  $m$  находится в диапазоне 4–6 для пленки толщиной 40 нм и падает до 3–4 по мере роста толщины пленки. Это может указывать на „мягкий пробой“, предшествующий переключению. Понижение  $m$  с ростом толщины пленки может быть связано с ростом вклада массива пленки в напряжение на образце. По поводу природы самого процесса переключения высказывались различные гипотезы [8], но однозначного мнения пока еще нет.

С учетом представленной выше картины можно оценить напряженность поля в ОПЗ при переключении.

Согласно приведенному обсуждению, ОПЗ занимает всю толщину пленки для образца с толщиной 40 нм. В качестве оценки высоты поверхностного потенциального барьера контакта (*a*-GST/Au) примем  $\phi_b = 2/3 E_g/e \approx 0.5$  В. Добавляя значение  $U_{th}$  из таблицы, находим  $E_{th} = \frac{U_{th} + \phi_b}{l} \approx 5 \cdot 10^5$  В/см.

Так как в нашем случае переключение сопровождалось необратимым изменением ВАХ, переходом к участку 1–3–4, можно заключить, что при переключении происходила также перестройка структуры материала пленки, ее переход в метастабильную ГЦК кристаллическую фазу в области, где развивался процесс переключения.

Трактовка участка 3–4 на ВАХ зависит от выбранной модели переключения. В любом случае здесь, по-видимому, происходит расширение области пленки, находящейся в кристаллическом состоянии.

Что касается участка 4–5 на ВАХ, то с учетом прямолинейности для тех же токов участка 1–5, как отмечалось выше, определяющим на этом участке ВАХ становится вклад в сопротивление образца электродов при постепенном завершающем переходе пленки в низкоомное кристаллическое состояние. После этого ВАХ сводится к участку 1–5, который обусловлен практически только электродами, а нелинейность ВАХ на начальном участке связана с блокирующим со стороны TiN потенциальным барьером для электронов на контакте TiN/GST и барьером для дырок на границе *c*-GST/Au. Оценкой вклада этих барьеров может служить параметр  $U_b$  на ВАХ.

Разброс значений параметров, характеризующих ВАХ, получаемых для разных точек подачи импульса тока на поверхности образцов, может быть связан с переменной по поверхности пленки высотой потенциальных блокирующих барьеров в силу аморфной структуры пленки.

## 4. Заключение

Метод исследования, основанный на использовании треугольных импульсов тока, в применении к образцам с разной толщиной пленки халькогенидного стеклообразного полупроводника (GST225) позволил установить наличие блокирующих потенциальных барьеров на контактах GST/Au и TiN/GST. Установлено, что сопротивление электродов и приконтактная область пространственного заряда оказывают значительное влияние на ВАХ. Показано, что ОПЗ этих контактов, расположенная главным образом в пленке GST, является той областью, где развивается процесс переключения. Дана оценка критической напряженности поля, при достижении которой начинается процесс переключения в ОПЗ. Предложен метод определения напряженности поля в массиве аморфной части пленки до переключения.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

**Список литературы**

- [1] G.W. Burr, M.J. Breitwisch, M. Franceschini, D. Garetto, K. Gopalakrishnan, B. Jackson, B. Kurdi, C. Lam, L.A. Lastras, A. Padilla, B. Rajendran, S. Raoux, R.S. Shenoy. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **28** (2), 223 (2010).
- [2] G.W. Burr, M.J. Brightsky, A. Sebastian, H.-Y. Cheng, J.-Y. Wu, S. Kim, N.E. Sosa, N. Papandreou, H.-L. Lung, H. Pozidis, E. Eleftheriou, C.H. Lam. *IEEE J. Emerg. Select. Top. Circuits Syst.*, **6** (2), 146 (2016).
- [3] G.W. Burr, R.M. Shelby, A. Sebastian, S. Kim, S. Kim, S. Sidler, K. Virwani, M. Ishii, P. Narayanan, A. Fumarola, L.L. Sanches, I. Boybat, M. Le Gallo, K. Moon, J. Woo, H. Hwang, Y. Leblebici. *Adv. Phys.: X*, **2** (1), 89 (2017).
- [4] С.А. Козюхин, П.И. Лазаренко, А.И. Попов, И.Л. Еременко. *Успехи химии*, **91** (9), RCR5033 (2022).
- [5] Б.Т. Коломиец, Э.А. Лебедев. *РЭ*, **8** (12), 2097 (1963).
- [6] A.D. Pearson, W.R. Northover, J.F. Dewald, W.F. Peck, jr. *Advances in Glass Technology* (Plenum Press, N.Y., 1962) p. 357.
- [7] R.S. Ovshinsky. *Phys. Rev. Lett.*, **21**, 1450 (1968).
- [8] Н.А. Богословский, К.Д. Цэндин. *ФТП*, **46** (5), 577 (2012).
- [9] R. Huang, K. Sun, K.S. Kiang, R. Chen, Y. Wang, B. Gholipour, D.W. Hewak, C.H. De Groot. *Semicond. Sci. Technol.*, **29** (9), 095003 (2014).
- [10] K.A. Cooley, H.M. Aldosari, K. Yang, S.E. Mohny. *J. Vac. Sci. Technol. A*, **38**, 050805 (2020).
- [11] С.А. Фефелов, Л.П. Казакова, С.А. Козюхин, К.Д. Цэндин, Д. Арсова, В. Памукчиева. *ЖТФ*, **84** (4), 80 (2014).
- [12] А.А. Шерченков, С.А. Козюхин, Н.И. Боргардт, П.И. Лазаренко, А.В. Бабич, А.О. Якубов, Д.Ю. Терехов, Ю.С. Зыбина. *Сб. тр. Междунар. конф. (СПб., 2018)* с. 83.
- [13] А.О. Якубов, А.А. Шерченков, А.В. Бабич, П.И. Лазаренко, Д.Ю. Терехов. *Сб. тр. Междунар. конф. (СПб., 2018)* с. 96.
- [14] А.А. Шерченков, С.А. Козюхин, П.И. Лазаренко, А.В. Бабич, Н.А. Богословский, И.В. Сагунова, Е.Н. Редичев. *ФТП*, **51** (2), 154 (2017).
- [15] Д.И. Циуляну. *ФТП*, **22**(7), 1181 (1988).
- [16] Э.А. Сенокосов, В.Г. Суринов, В.С. Фещенко, В.И. Чукита. *Успехи прикл. физики*, **8** (4), 273 (2020).
- [17] R.-G. Nir-Narwood, G. Cohen, A. Majumdar, R. Haight, E. Ber, L. Gignac, E. Ordan, L. Shoham, Y. Keller, L. Kornblum, E. Yalon. *ACS Nano*, **18**, 8029 (2024).
- [18] T. Kato, K. Tanaka. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **44** (10), 7340 (2005).
- [19] H. Tong, Z. Yang, N. Yu, L. Zhou, X. Miao. *Appl. Phys. Lett.*, **107** 082101 (2015).
- [20] М.Н. Солован, В.В. Брус, П.Д. Марьянчук. *ФТП*, **47** (9), 1185 (2013).
- [21] И.Г. Орлецкий, М.И. Илащук, В.В. Брус, П.Д. Марьянчук, М.Н. Солован, З.Д. Ковалюк. *ФТП*, **50** (3), 339 (2016).

Редактор А.Н. Смирнов

**Mechanisms of current transport in TiN/Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub>/Au structure**

S.A. Fefelov<sup>1</sup>, L.P. Kazakova<sup>1,2</sup>,  
N.A. Bogoslovskiy<sup>1</sup>, A.B. Bylev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ioffe Institute,

194021 St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> St. Petersburg State Forest Technical University,

194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** The results of the study of Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> films of sub-micron thickness from 40 to 800 nm are presented. The current-voltage characteristics of TiN/Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub>/Au structures were measured and compared. It is established that the electrode resistance and the near-contact space charge region have a significant effect on the current-voltage characteristic. It is shown that the near-contact space charge region, located mainly in the Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> film, is the region where the switching process appears. The critical field strength at which the switching process in the space charge region begins is estimated. A method for determining the field strength in the amorphous part of the film before switching is proposed.