

УДК 539.216

*К.В. Митрофанов, А.П. Авачёв, Н.С. Климов*

## ОСОБЕННОСТИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУКТУР $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ , ИЗМЕРЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

*Представлены результаты измерения температурных зависимостей электрических характеристик и параметров структур на основе  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  методами атомно-силовой микроскопии. Показаны зависимость максимального значения силы тока, протекающего в цепи, включающей в себя исследуемую структуру, и значения напряжений, при которых происходит резкое увеличение силы тока от температуры. Определены механизмы переноса носителей заряда в исследуемых структурах.*

**Ключевые слова:** наноэлектроника, наноматериалы, наноразмерные элементы памяти.

**Введение.** Одним из перспективных направлений наноэлектроники является модификация материалов и структур нанотехнологическими методами, в том числе методами зондовой микроскопии. Развитие этой области повлияет на многие отрасли науки и техники, предоставляя принципиально новые возможности. В первую очередь это найдет применение в сфере создания элементов памяти, увеличивая скорость ее чтения и записи, надежность, долговечность, плотность записи информации.

Для модификации структур широко используются методы зондовой микроскопии, которая делится на силовую, электрохимическую и электросиловую. Последняя подразумевает под собой создание зарядовых профилей и структурно-фазовых переходов [1].

Материалы, в которых возможно протекание фазовых превращений, могут быть успешно использованы для создания устройств хранения информации высокой плотности (phase-change material memory, PCM memory [2]). Принцип работы таких устройств принципиально отличается от традиционных полупроводниковых элементов памяти. Запись информации основана на изменении сопротивления материала, а не на манипуляции с электрическими зарядами [3].

Перспективными и в то же время недостаточно хорошо изученными материалами в области структурно-фазовой модификации методами зондовой микроскопии являются неупорядоченные полупроводники, одними из представителей которых являются халькогенидные стеклообразные полупроводники (ХСП), которые пред-

ставляют наибольший интерес в данном направлении. ХСП присущ эффект токового переключения, который и используется для их применения в этой области [1].

**Цель работы** заключается в исследовании вольтамперных характеристик (ВАХ) структур на основе  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ , определении механизмов переноса носителей заряда через исследуемую структуру. Использование атомно-силового микроскопа (АСМ) позволяет осуществлять измерения тока в локальных областях, при этом площадь контакта приближается к площади минимального сечения острия кантилевера. Выявление особенностей поведения ВАХ структур на основе  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  является важной составляющей для понимания закономерностей электрических процессов в таких структурах, в том числе процессов структурно-фазовой модификации.

**Методика эксперимента.** В ходе экспериментальных исследований использовались образцы структур на основе халькогенидных стеклообразных полупроводников  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  с нижним контактом из  $\text{SnO}_2$  на подложке из кварцевого стекла (рисунок 1).

Образец укреплялся на столике АСМ-микроскопа. С помощью металлического пружинного контакта осуществлялось заземление образца либо подавалось на него необходимое напряжение. Выбор области измерения осуществлялся с помощью оптического микроскопа с микронным разрешением. Для подключения внешнего источника напряжения ( $U > 10$  В) был сконструирован блок, схема которого показана на рисунке 2.

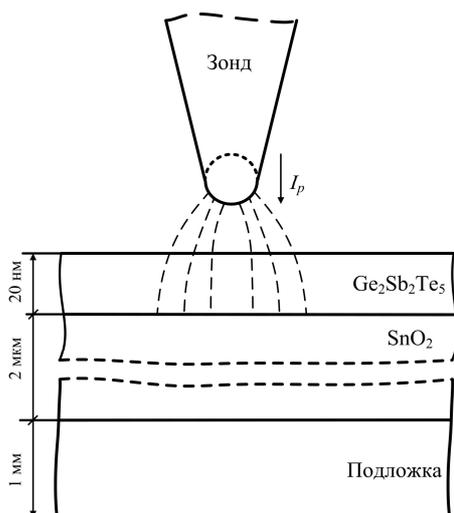


Рисунок 1 – Схема «Зонд-образец»

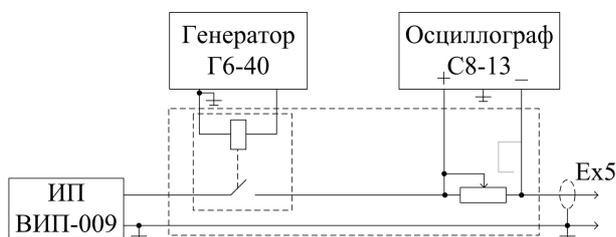


Рисунок 2 - Схема подключения блока подачи внешнего напряжения и проверки точности измерения тока

Величины тока, определяемые АСМ-контроллером и внешним блоком, различались не более чем на 5 %. В дальнейшем все измерения тока осуществлялись с помощью АСМ-контроллера.

**Результаты эксперимента.** В ходе эксперимента были исследованы вольтамперные характеристики образца (рисунок 3).

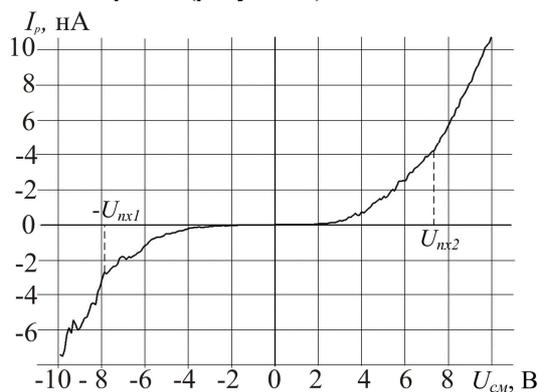


Рисунок 3 - Вольтамперная характеристика образца  $Ge_2Sb_2Te_5$ , полученная при комнатной температуре

Из графика на рисунке 3 видно, что для напряжения смещения  $U_{см}$ , лежащего в пределах от -10 В до 10 В, ток  $I_p$ , протекающий в цепи, включающей в себя исследуемую структуру, не

превышает  $\pm 10$  нА. При использовании внешнего источника (ВИП 009), управляемого генератором (Г640), напряжение смещения повышалось до 30 В, при этом значение силы тока, протекающего в цепи, включающей в себя исследуемую структуру, увеличивалось до 20 нА, но характер зависимостей не менялся.

Как видно из графика, представленного на рисунке 4, напряжение, при котором происходит резкое увеличение силы тока (назовем его напряжением перехода  $U_{пх}$ , так как при этом напряжении возникает переход от одного механизма переноса носителей заряда к другому), падает при увеличении температуры и стабилизируется при 100 °С, принимая значения около 1 В.

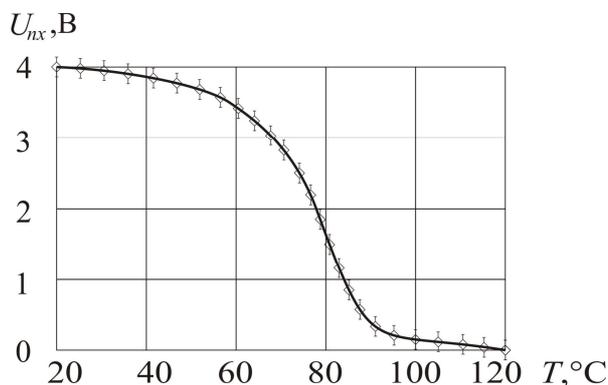


Рисунок 4 – Аппроксимированная зависимость экспериментальных данных напряжения перехода  $U_{пх}$  от температуры

Семейство ВАХ, полученное при различной температуре (рисунок 5), свидетельствует об увеличении тока, протекающего в образце при увеличении температуры, а значит и уменьшении сопротивления образца. Максимальное полученное значение тока составляло 50 нА, что является пределом токовой шкалы АСМ-прибора.

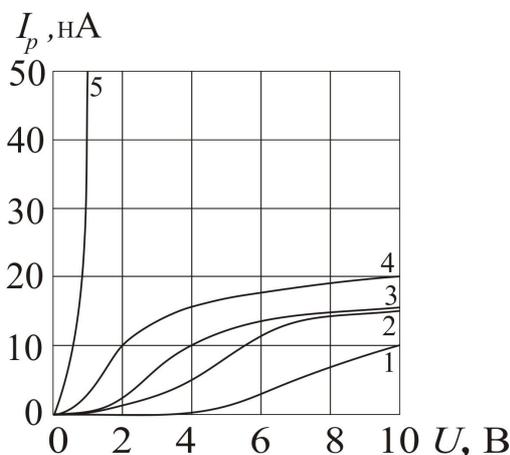


Рисунок 5 - Семейство вольтамперных характеристик, полученных при различных температурах нагрева образца: 1 – 40 °С, 2 – 60 °С, 3 – 80 °С, 4 – 100 °С, 5 – 120 °С

На рисунке 6 показана зависимость тока  $I_p$ , протекающего в цепи, включающей в себя исследуемую структуру, при напряжении 10 В от температуры.

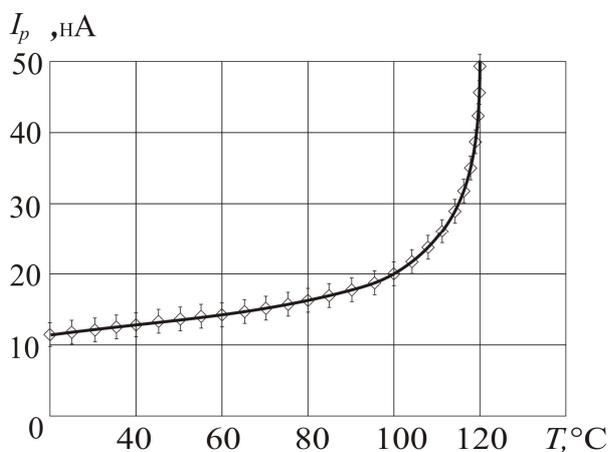


Рисунок 6 - Аппроксимированная зависимость экспериментальных данных тока  $I_p$  от температуры

Как видно из графика, при температуре менее  $100^\circ\text{C}$  ток, протекающий в цепи, включающей в себя исследуемую структуру, меняется незначительно, но при температуре около  $110^\circ\text{C}$  начинает резко возрастать и достигает 50 нА, что является максимальным значением, ограниченным возможностями прибора.

Анализируя характеристики, представленные на рисунке 5, можно сделать вывод о том, что характер механизма переноса носителей заряда через исследуемую структуру меняется как при увеличении прикладываемого напряжения, так и при увеличении температуры, чему соответствует наличие перегибов на ВАХ. Так как при проведении экспериментов зонд АСМ контактирует с исследуемой структурой, то в области контакта возможно образование барьера, перенос носителей заряда через который возможен по нескольким механизмам:

- надбарьерная эмиссия;
- квантово-механическое туннелирование электронов через барьер;
- рекомбинация в области пространственного заряда;
- токи, ограниченные пространственным зарядом (ТОПЗ).

Кроме того, вклад в полный ток могут давать ловушки вблизи границы раздела металл-полупроводник [4].

Рассмотрим математические выражения, характерные для каждой из этих моделей.

Классическое выражение ВАХ для надбарьерной эмиссии Шоттки выглядит так [5]:

$$j = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q(\phi_B - \sqrt{\frac{qE}{4\pi\epsilon}})}{kT}\right), \quad (1)$$

где  $A^*$  - постоянная Ричардсона,  $\phi_B$  - высота барьера,  $E$  - электрическое поле,  $\epsilon$  - диэлектрическая постоянная.

ВАХ, перестроенная в координатах  $\ln j$  от  $(U^{1/2})$ , должна представлять собой прямую линию в случае, если механизм переноса носителей заряда определяется надбарьерной эмиссией.

Туннелирование должно быть основным механизмом прохождения через барьер при низких температурах, пока сообщенной носителям энергии недостаточно для переноса их над барьером. Отличительной особенностью туннельной эмиссии являются слабая зависимость тока насыщения от температуры и, следовательно, малые углы наклона в координатах

$$\frac{d \ln j}{d \sqrt{U}} \left(\frac{1}{T}\right) \approx \text{const}.$$

Для генерационно-рекомбинационного механизма переноса носителей заряда имеет место выражение

$$j = j_n \exp\left(K_p \frac{qU}{kT}\right),$$

где  $K_p$  - коэффициент, зависящий от типа материала,  $j_n$  - ток насыщения.

Выражение (3) показывает, что для данного механизма тока ВАХ будет иметь экспоненциальную форму. В классическом случае плотность токов при реализации ТОПЗ описывается формулой Мотта - Генри:

$$j = \mu\epsilon \frac{U^2}{d^3}, \quad (4)$$

где  $\mu$  - подвижность носителей,  $\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость,  $d$  - толщина пленки,  $U$  - приложенное напряжение. Из (4) видно, что  $j \sim U^2$  или  $j^{1/2} \sim U$ , то есть характер вольт-амперной зависимости имеет степенной вид.

Для определения механизмов переноса носителей заряда необходимо сравнить экспериментальную ВАХ с аппроксимирующими функциональными зависимостями, построенными в соответствующих координатах. На рисунках 7-9 представлены участки ВАХ в соответствующих для каждого механизма координатах (так как механизм туннелирования имеет место при слабой зависимости от температуры, то этот механизм рассматриваться не будет).

Из графика на рисунке 7 видно, что на всем

участке ненулевых значений тока ВАХ имеет различный коэффициент наклона, то есть ее вид отличается от прямой, что говорит о незначительном вкладе механизма надбарьерной эмиссии Шоттки.

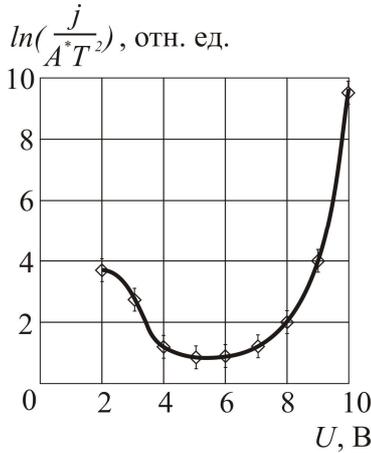


Рисунок 7 – Вид экспериментальной характеристики в координатах для механизма надбарьерной эмиссии Шоттки при ненулевом значении тока

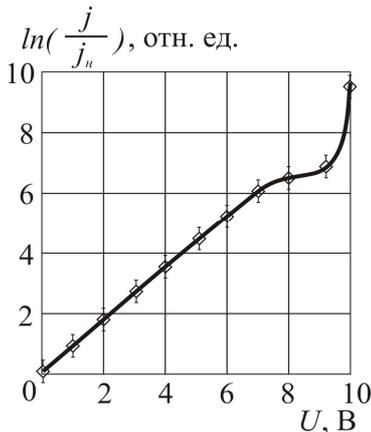


Рисунок 8 – Вид экспериментальной характеристики в координатах для генерационно-рекомбинационного механизма переноса носителей заряда

Из графика, представленного на рисунке 8, видно, что экспериментальная характеристика в координатах  $\ln(\frac{j}{j_n})$  от  $U$  в диапазоне напряжений от 0 до 7 В представляет собой прямую линию почти на всем диапазоне значений, кроме значений напряжения, близких к 7 В. (В диапазоне от 7 до 10 В прямолинейный характер не сохраняется.) Это означает, что на данном диапазоне напряжений основным механизмом переноса носителей заряда является генерационно-рекомбинационный.

Из графика, представленного на рисунке 9, видно, что экспериментальная характеристика в координатах для ТОПЗ в диапазоне напряжений от 7 до 10 В представляет собой прямую линию

почти на всем диапазоне значений, кроме значений напряжения, близких к 7 В. (В диапазоне от 0 до 7 В прямолинейный характер не сохраняется.) Это означает, что на данном диапазоне напряжений основным механизмом переноса носителей заряда является ТОПЗ.

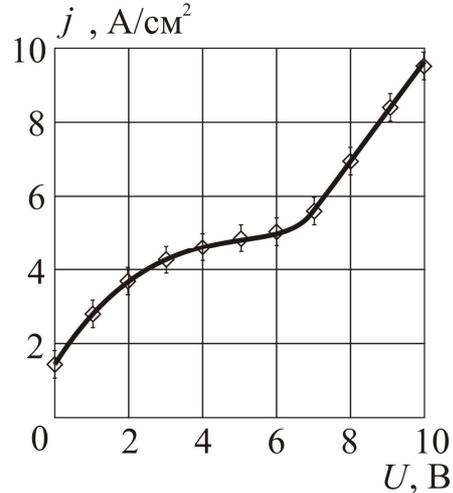


Рисунок 9 – Вид экспериментальной характеристики в координатах для ТОПЗ

Графики результирующей аппроксимации экспериментальной ВАХ показаны на рисунке 10.

На первом участке экспериментальная кривая аппроксимируется экспонентой [выражение (3)], на втором участке кривая аппроксимируется параболой [выражение (4)].

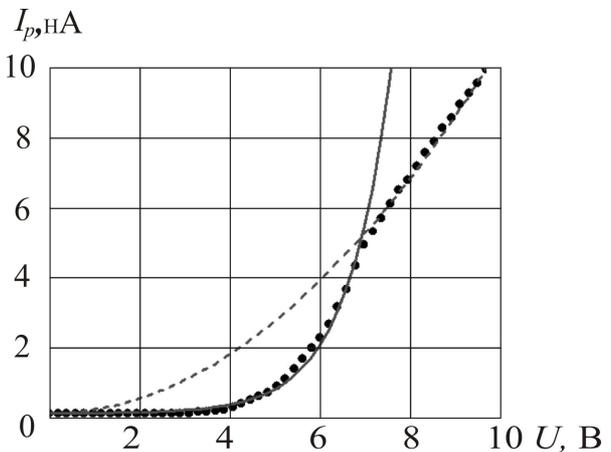


Рисунок 10 – Аппроксимирующие кривые для экспериментальной ВАХ (показана точками): сплошная – генерационно-рекомбинационный механизм, штриховая - ТОПЗ

Основываясь на данных аппроксимации, можно сделать вывод о том, что на участке от 0 до 7 В преобладает генерационно-рекомбинационный механизм токопереноса, а на участке от 7 до 10 В - токи, ограниченные пространственным зарядом [4]. Анализ ВАХ, полученных при повышенной температуре, дает те же результаты, однако переход от одного механизма к

другому происходит при меньших напряжениях.

В результате проведенных исследований было установлено следующее:

1) величина тока, протекающего в структурах  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ , при использовании АСМ-методик при комнатной температуре составляет около 20 нА, даже при напряжениях  $U_{см} = 30$  В и повышенной температуре (исключением является резкое увеличение тока при температурах более 110 °С);

2) наблюдается эффект резкого увеличения тока при достижении некоторого значения  $U_{nx}$ ;

3) значение величины  $U_{nx}$  уменьшается с ростом температуры;

4) эффект переключения не наблюдался; для достижения эффекта переключения необходимо использовать токи большей величины, так как таким образом будет увеличена мощность, приводящая к образованию фазовой модификации локальной области образца; при этом рациональным является использование повышенной температуры для достижения больших токов при меньших напряжениях, что было подтверждено представленными экспериментальными зависимостями;

5) среди механизмов токопереноса преобладает генерационно-рекомбинационный и при больших напряжениях - токи, ограниченные пространственным зарядом.

Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального агентства по образованию.

#### **Библиографический список**

1. *Асеев А.Л.* Наноматериалы и нанотехнологии для современной полупроводниковой электроники // Российские нанотехнологии. 2006. № 1-2, декабрь. С. 97-110.

2. *Gotoh T., Sugawara K., Tanaka K.* Minimal Phase-Change Marks Produced in Amorphous  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  Films // Japanese Journal of Applied Physics Vol. 43. No. 6B. 2004. P. 818-821.

3. *Трусов Л.А.* Phase-change наноматериалы для хранения информации. «Highly scalable non-volatile and ultra-low-power phase-change nanowire memory». [http://www.nanometer.ru/2007/10/02/data\\_storage\\_4682.html](http://www.nanometer.ru/2007/10/02/data_storage_4682.html) (2.03.09).

4. *Вихров С.П., Вишняков Н.В., Мишустин В.Г.* Физические процессы в барьерных структурах на основе неупорядоченных полупроводников: Учеб. пособие. Ч.1. РГРТА, Рязань: 2005. 72 с.

5. *Родерик Э.Х.* Контакты металл – полупроводник: пер. с англ. под ред. Г.В. Степанова. М.: Радио и связь, 1982. С.208.