

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Трусова Евгения Павловича

**«Стабильность электрофизических свойств тонких аморфных пленок**

**полупроводниковых соединений GeTe – Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>»,**

представленную на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

по специальности 1.3.11. Физика полупроводников

### **Актуальность темы**

Совершенствование технологий запоминающих устройств играет ключевую роль в научно-техническом прогрессе. В связи с этим в настоящее время активно развиваются новые способы хранения информации, моделируются архитектуры запоминающих устройств, идет поиск материалов для новой элементной базы. Одно из перспективных направлений основано на использовании халькогенидных полупроводников, способных под воздействием электрического поля или оптического излучения переходить из аморфного состояния в кристаллическое и обратно. Поскольку информация кодируется фазовым состоянием активного материала, данная технология получила название «фазовая память». Подобные устройства сочетают в себе энергонезависимость и высокое быстродействие.

Одной из причин, по которой сдерживается распространение устройств памяти на основе фазопеременных материалов, является самопроизвольное увеличение электрического сопротивления в аморфной фазе, что является причиной потери или появления ложной информации в многоуровневых запоминающих устройствах на их основе.

Представленная диссертация посвящена исследованию стабильности электрических свойств полупроводниковых халькогенидных соединений. Проведенная работа направлена на определение параметров стабильности электрофизических свойств тонких пленок аморфных полупроводников в системе GeTe – Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, что является актуальным для разработки запоминающих устройств фазовой памяти.

## **Новизна научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

1. Предложена методика определения изменения параметров уравнения Аррениуса от времени для удельного сопротивления фазопеременных материалов по линии квазибинарного разреза  $\text{GeTe} - \text{Sb}_2\text{Te}_3$  в процессе квазиизотермической температурной выдержки, особенностью которой является использование температурного профиля, сочетающего постоянную составляющую и циклическую составляющую в виде комбинации увеличения и уменьшения температуры с постоянной скоростью, с минимальной амплитудой и максимальной скоростью сканирования, обеспечивающими максимизацию соотношения сигнал/шум.
2. В результате варьирования содержания компонентов в системе  $\text{GeTe} - \text{Sb}_2\text{Te}_3$ , установлен состав материала –  $\text{GeSb}_2\text{Te}_4$ , обеспечивающий наибольшую стабильность удельного сопротивления при изотермических выдержках при  $80^\circ\text{C}$  и  $100^\circ\text{C}$  в течение двух часов, за счет компенсации дрейфа сопротивления частичной кристаллизацией.
3. Показано, что нелинейный характер температурной зависимости электрической проводимости в координатах Аррениуса фазопеременных материалов по линии квазибинарного разреза  $\text{GeTe} - \text{Sb}_2\text{Te}_3$  объясняется нелинейной температурной зависимостью положения уровня Ферми относительно потолка валентной зоны. По результатам измерения температурной зависимости удельного сопротивления фазопеременных материалов вычислены коэффициенты аппроксимации температурной зависимости уровня Ферми полиномом 2-го порядка.
4. Определены параметры распределения плотности разрешенных энергетических состояний донороподобных и акцептороподобных глубоких уровней, концентрации глубоких дефектов и плотности состояний на краях разрешённых зон в фазопеременных материалах по линии квазибинарного разреза  $\text{GeTe} - \text{Sb}_2\text{Te}_3$  в рамках разработанной модели температурной зависимости положения уровня Ферми.

**Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций**

Обоснованность результатов диссертационного исследования обеспечена применением широко апробированных аналитических и математических методов, использованием общеизвестного математического аппарата физики полупроводников и физики наносистем, непротиворечивостью полученных результатов основным представлениям физики, соответствием полученных результатов исследования результатам работ других авторов, опубликованных в независимых источниках. Достоверность представленных результатов обеспечивается использованием аттестованного оборудования в научных лабораториях.

### **Значимость полученных автором результатов**

1. Разработанная автором методика измерения электрического сопротивления фазопеременных материалов при квазиизотермической выдержке, позволяет разделить вклад предэкспоненциального множителя и энергии активации в процессе дрейфа электрического сопротивления.
2. Результаты измерения дрейфа электрического сопротивления материалов по линии квазибинарного разреза  $\text{GeTe} - \text{Sb}_2\text{Te}_3$  при выдержке при температурах 80 и 100°C позволяют выбрать материал для элемента фазовой памяти в зависимости от температурного режима работы.
3. По результатам измерения температурной зависимости удельного сопротивления фазопеременных материалов  $\text{GeTe} - \text{Sb}_2\text{Te}_3$  вычислены коэффициенты аппроксимации температурной зависимости уровня Ферми полиномом 2-го порядка, что позволяет моделировать зонные диаграммы полупроводниковых структур.
4. Разработанная методика определения энергетического положения глубоких донороподобных и акцептороподобных уровней, позволяет вычислить параметры распределения плотности разрешенных энергетических состояний в фазопеременных материалах по линии квазибинарного разреза  $\text{GeTe} - \text{Sb}_2\text{Te}_3$ , что упрощает подбор составов на этапе физико-математического моделирования параметров фазопеременных материалов.
5. Разработаны рекомендации по выбору состава материала, обладающего устойчивостью к изменению электрофизических свойств в условиях повышенной температуры.

## **Оценка содержания диссертации**

Структура диссертации имеет традиционный вид. Она состоит из введения, четырех глав и заключения с основными результатами работы, а также списка используемых источников и двух приложений.

**Первая глава** содержит обзор по физическим свойствам фазопеременных материалов и их применениям для изготовления устройств фазовой памяти. Показано, что одной из причин, влияющих на надежность такого типа памяти, является эффект дрейфа сопротивления, происходящий в фазопеременных материалах. Кроме того, в главе рассматриваются электрофизические свойства аморфных материалов, в частности, халькогенидных полупроводников по линии квазибинарного разреза  $\text{GeTe} - \text{Sb}_2\text{Te}_3$ . Материал, изложенный в главе, является основой дальнейших теоретических и экспериментальных исследований, представленных в последующих главах.

**Вторая глава** содержит описание подготовки экспериментальной части диссертационного исследования. Представлено описание исследованных экспериментальных образцов. Показаны используемые алгоритмы исследования электрофизических свойств тонких пленок фазопеременных материалов. Представлена аппаратная часть измерительно аналитического комплекса. Кроме этого, в главе описана методика проведения электрофизических измерений при квазитермической выдержке образцов.

**В третьей главе** представлены результаты проведенных в работе экспериментальных исследований образцов тонких пленок по линии квазибинарного среза  $\text{GeTe} - \text{Sb}_2\text{Te}_3$ , подвергнутых тепловому воздействию. Установлен характер влияния температурной выдержки при повышенных температурах длительностью 2 часа на величину удельного электрического сопротивления аморфного полупроводникового материала. Показано, что эффект дрейфа сопротивления связан с изменением энергии активации проводимости и предэкспоненциального множителя в выражении для электрической проводимости.

**В четвертой главе** показаны результаты моделирования температурной зависимости положения уровня Ферми по экспериментальной температурной зависимости удельного сопротивления фазопеременных материалов. Продемонстрировано, что на изменение положения уровня Ферми оказывает влияние изменение величины энергии активации проводимости и

предэкспоненциального множителя. Представлена методика по определению энергетического положения донороподобных и акцептороподобных глубоких энергетических уровней, концентрации дефектов с глубокими уровнями и плотности состояний на краях разрешённых зон для фазопеременных материалов на основе проведенных экспериментальных исследований и моделирования.

**Заключение** к работе содержит основные выводы по результатам теоретических и экспериментальных исследований и рекомендации по их использованию.

#### **Соответствие автореферата основным идеям и выводам диссертации**

Автореферат отражает содержание диссертации, в нем кратко изложены все значимые результаты диссертационного исследования. Выводы, представленные в автореферате, согласуются с выводами диссертации.

В качестве **замечаний** по содержанию диссертационной работы отмечу следующее:

1. Глава 1 содержит описание конструкции ячеек фазовой памяти, но не приведена конструкция многоуровневой фазовой памяти, хотя из работы понятно, что дрейф сопротивления оказывает наибольшее влияние именно на работу многоуровневой памяти. Раздел 1.1.4 следовало бы дополнить сведениями о разработанных к настоящему времени конструкциях ячеек многоуровневой фазовой памяти.
2. Из содержания 2-й главы остается неясным, из каких соображений выбраны режимы температурных выдержек образцов между измерениями, обозначенные в разделе 2.5.
3. В 3-й главе при анализе результатов исследования удельного электрического сопротивления, энергии активации проводимости и предэкспоненциального множителя отсутствует сравнение данных для образцов после 440-дневной выдержки образцов при комнатной температуре и 2-х часовой выдержки при повышенной температуре.
4. В 4-й главе на рисунке 4.3 для образца  $\text{GeSb}_4\text{Te}_7$  наблюдаются изменения характера температурной зависимости уровня Ферми после температурной выдержки при  $100^\circ\text{C}$ , которые автор связал с началом процесса кристаллизации. Схожие изменения показаны для  $\text{GeSb}_2\text{Te}_4$  при  $120^\circ\text{C}$  на

рисунке 4.4. Полезно было бы показать, при какой температуре возникают подобные изменения для других исследуемых материалов.

5. Имеется ряд стилистических неточностей, но их количество незначительно.

Сделанные замечания не имеют принципиального значения и не уменьшают теоретической и практической значимости представленной работы, не затрагивают научных положений и не ставят под сомнение достоверность и обоснованность полученных результатов. Структура работы является последовательной, отдельные части логически взаимосвязаны. Диссертация оформлена в соответствии с существующими требованиями.

Основные результаты работы опубликованы в 18 работах, включая 2 публикации в изданиях, входящих в базы данных Web of Science и Scopus (Q1), 1 публикацию в издании, входящем в базу данных Scopus, 12 публикаций в материалах всероссийских и международных конференций, 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Отдельные составляющие работы использовались при выполнении НИР – соответствующие акты о внедрении результатов представлены в приложении к диссертации.

Цель работы, поставленные задачи, методы их решения, результаты и их анализ, научные положения диссертации Е.П. Трусова соответствуют паспорту специальности 1.3.11. Физика полупроводников (физико-математические науки).

#### **Рекомендации по использованию результатов диссертационной работы**

Основные результаты диссертационной работы могут рекомендоваться к использованию при проектировании и изготовлении запоминающих устройств фазовой памяти, электронных элементов на основе фазопеременных материалов, интерпретации результатов экспериментальных исследований материалов с изменением фазового состояния, разработке новых методов их исследования.

#### **Заключение**

Диссертационная работа Е.П. Трусова «Стабильность электрофизических свойств тонких аморфных пленок полупроводниковых соединений  $\text{GeTe} - \text{Sb}_2\text{Te}_3$ » является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи исследования стабильности электрофизических свойств тонких аморфных пленок фазопеременных материалов, перспективных для создания новой элементной базы, имеющей значение для развития физики полупроводников.

Диссертационная работа отвечает требованиям пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», а ее автор Трусов Евгений Павлович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11. Физика полупроводников.

### Официальный оппонент

Колобов Александр Владимирович,  
доктор физико-математических наук

по специальности 01.04.10 – «Физика полупроводников»,

доцент, профессор кафедры физической электроники,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена»

Адрес: 191186, Санкт-Петербург, Набережная реки Мойки, д. 48

Телефон: +7 (812) 314-48-85

E-mail: akolobov@herzen.spb.ru

« 28 » 05 2026 г.

Колобов Александр Владимирович

Подпись руки  
*А.В. Колобов* заверяю



Начальник управления подготовки  
и аттестации кадров высшей  
квалификации

*А.А. Лактионов*  
А.А. Лактионов

С отзывом ознакомлен 01.06.2026 *Трусов*