

УТВЕРЖДАЮ

Временно исполняющий обязанности
проректора по науке и инновациям

д. т. н. проф.

А. В. Волков

« 18 » 05 2026 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»
на диссертационную работу Трусова Евгения Павловича на тему
«Стабильность электрофизических свойств тонких аморфных пленок
полупроводниковых соединений $\text{GeTe} - \text{Sb}_2\text{Te}_3$ », представленную на
соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по
специальности 1.3.11. Физика полупроводников

Актуальность темы.

Поиск путей повышения стабильности электрофизических свойств некристаллических полупроводников в целом и, рассматриваемых в работе аморфных пленок соединений $\text{GeTe} - \text{Sb}_2\text{Te}_3$ в частности, является сложной задачей, поскольку указанные материалы обладают избытком свободной энергии и являются неравновесными системами. С другой стороны, рассматриваемые материалы нашли применение в энергонезависимых устройствах оптической и электрической памяти на фазовых переходах. При этом эффекты самопроизвольного изменения, например, электропроводности могут существенно исказить хранимую информацию (особенно в случае многоуровневых фазовых ячеек памяти). В связи со сказанным, поставленная в работе задача, безусловно, **является актуальной.**

Структура и содержание диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и 2 приложений. Материал изложен на 151 странице машинописного текста, включает 7 таблиц, 78 рисунков, список цитируемых источников из 165 наименований, а также 2 приложения. В приложениях представлены документы, подтверждающие использование и внедрение результатов диссертационной работы и копии трех свидетельств о регистрации программ для ЭВМ. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, направленные на определение параметров стабильности электрофизических свойств тонких пленок аморфных полупроводников в системе GeTe — Sb₂Te₃. Представлены предмет, объект и методики исследования, научная новизна, практическая значимость и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ материалов и структур для создания элементов фазовой памяти (PCM). Показано, что надежность их работы в значительной степени определяется параметрами стабильности электрофизических свойств активного материала. В связи с этим детально рассмотрены электрофизические характеристики аморфных халькогенидных полупроводников вдоль квазибинарного разреза GeTe — Sb₂Te₃. Проанализированы температурные зависимости сопротивления структур системы Ge—Sb—Te, рассмотрены используемые экспериментальные методики исследования.

Вторая глава содержит описание методической и экспериментальной базы исследования. Приводятся этапы изготовления образцов для исследований, описаны используемые аналитические методы. Описана аппаратная часть и приведены характеристики измерительно-аналитического комплекса, обеспечивающего автоматизированную регистрацию температурных зависимостей электрофизических параметров полупроводниковых структур.

В третьей главе представлены результаты экспериментального исследования электрофизических свойств тонких аморфных пленок материалов системы GeTe — Sb₂Te₃, подвергнутых различным режимам термического воздействия. Показано, что эффект дрейфа сопротивления обусловлен совместным изменением энергии активации проводимости и предэкспоненциального множителя в уравнении электропроводности. Исходя из этого автором сформулирована методика оценки стабильности электрофизических свойств халькогенидных материалов, позволяющая разделить вклад энергии активации проводимости и предэкспоненциального множителя в дрейф удельного электрического сопротивления. Выявленные закономерности позволяют количественно оценивать термостабильность параметров устройств на основе исследуемых материалов.

Четвертая глава посвящена моделированию зонной структуры материалов системы GeTe — Sb₂Te₃ на основе экспериментальных данных, полученных в третьей главе. Представлены результаты моделирования температурной зависимости положения уровня Ферми в тонких аморфных пленках исследуемых фазопеременных материалов. Исследовано влияние температурных выдержек (от 80 до 120 °С) и длительного естественного старения на положение уровня Ферми. Установлено, что дрейф сопротивления сопровождается параллельным сдвигом температурной зависимости уровня Ферми $E_F(T)$ относительно потолка валентной зоны. Разработана методика определения положения глубоких энергетических уровней, концентрации дефектов и плотности состояний на краях разрешенных энергетических зон.

Полученные данные формируют физическую основу для прогнозирования долговременной стабильности параметров устройств фазовой памяти.

Заключение к работе содержит основные выводы по результатам теоретических и экспериментальных исследований и рекомендации по их использованию. Обобщаются основные выводы, сделанные по главам диссертации.

Научная новизна полученных результатов

Наиболее интересные новые научные результаты, полученные в работе, состоят в следующем.

Разработана методика определения параметров, описывающих температурную зависимость электропроводности рассматриваемых ХСП в процессе квазиизотермической обработки пленок. Показано, что особенности температурных зависимостей электропроводности исследованных материалов объясняются нелинейной температурной зависимостью положения уровня Ферми. Определены механизмы компенсации дрейфа электропроводности изучаемых фазопеременных материалов при изотермических выдержках до 100 °С, что позволило выбрать состав ХСП, обеспечивающий наибольшую стабильность электропроводности при данных температурах.

Достоверность представленных результатов исследования обеспечена применением широко апробированных аналитических и математических методов, применением метрологически аттестованного измерительного оборудования центров коллективного пользования. Результаты работы были доложены на всероссийских и международных научных конференциях и согласуются с опубликованными данными отечественных и зарубежных коллективов авторов.

Практическая значимость работы заключается в том, что проведенные исследования позволяют целенаправленно выбирать составы ХСП для элементов фазовой памяти в зависимости от температурных режимов их работы. Вычисленные значения коэффициентов аппроксимации температурной зависимости уровня Ферми и разработанная методика определения положения глубоких донороподобных и акцептороподобных уровней улучшает качество моделирования зонных диаграмм рассматриваемых материалов и упрощает подбор их составов.

Результаты работы использованы при выполнении НИР в рамках двух грантов РФФИ, внедрены в работу Регионального центра зондовой микроскопии. Автором получено три Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, подготовленных в период выполнения диссертационной работы.

Результаты диссертационной работы целесообразно использовать в научных организациях, занимающихся разработкой устройств энергонезависимой памяти на фазовых переходах, а также в учебном процессе вузах, ведущих подготовку по направлениям «Электроника и нанoeлектроника».

Замечания по диссертационной работе.

1. Нельзя признать удачной формулировку пункта 2 научной новизны. В представленной редакции пункт скорее относится к практической ценности.

Вместе с тем, необходимо отметить, что научная новизна в данном пункте имеется (вскрыты механизмы, обеспечивающие повышенную стабильность ...). Но об этом автор упоминает лишь вскользь.

2. В главе 3 отсутствуют данные о статистической воспроизводимости результатов: не указано количество измеренных образцов каждого состава, не приведены погрешности определения коэффициента дрейфа электрического сопротивления и энергии активации проводимости.
3. Параметры зонной структуры для определения положения уровня Ферми и глубоких донороподобных и акцептороподобных уровней не сопоставлены с результатами исследования другими независимыми экспериментальными методами.

Заключение

Диссертационная работа Е.П. Трусова «Стабильность электрофизических свойств тонких аморфных пленок полупроводниковых соединений GeTe – Sb₂Te₃» является законченной научно-квалификационной работой, содержащей решение актуальной научной задачи исследования стабильности электрофизических свойств тонких пленок полупроводниковых соединений GeTe – Sb₂Te₃, перспективных для создания новой элементной базы электроники, имеющей значение для развития физики полупроводников и полупроводниковой электроники. Таким образом, представленная диссертация отвечает требованиям пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней» в части, касающейся диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук. Автор, Трусов Евгений Павлович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11. Физика полупроводников.

Диссертационная работа и отзыв обсуждены на заседании кафедры Микроэлектроники ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», протокол заседания № 7 от «14» 05 2026 г. Отзыв принят единогласно.

Зезин Денис Анатольевич

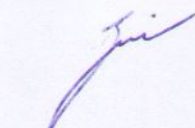
Зав. кафедрой Микроэлектроники

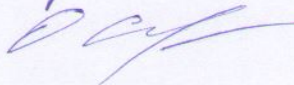
к. т. н. доцент

Сарач Ольга Борисовна

Ученый секретарь

кафедры к. т. н. доцент

 /Зезин Д. А./

 /Сарач О. Б./

Сведения о ведущей организации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

111250, Россия, г. Москва, муниципальный округ Лефортово, ул. Красноказарменная, д.14, стр.1

Тел. +7 495 362-75-60

эл. почта: universe@mpei.ac.ru

С отзывом ознакомлен 28.05.2026 Трусов