

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Трусова Евгения Павловича

«Стабильность электрофизических свойств тонких аморфных пленок

полупроводниковых соединений GeTe – Sb₂Te₃»,

представленную на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

по специальности 1.3.11. Физика полупроводников

Актуальность темы исследования

Одним из основных направлений развития информационных технологий является создание нейроморфных систем. Несмотря на интенсивные исследования в этом направлении, нерешенных проблем и задач еще достаточно много. Одной из таких задач является усовершенствование аппаратной реализации нейроморфных систем. Перспективно для реализации искусственного синапса применение полупроводниковых халькогенидных фазопеременных материалов, в том числе GeTe – Sb₂Te₃. Эти материалы обладают способностью к быстрому фазовому переходу из аморфного состояния в кристаллическое и обратно под действием оптического или электрического импульсного воздействия. Свойства фаз значительно отличаются друг от друга, что обеспечивает существенное различие фазовых состояний. Кроме того, фазопеременные материалы могут демонстрировать непрерывный диапазон значений электрического сопротивления в аморфной фазе перед переходом в кристаллическую, что позволяет более точно подбирать синаптические веса в нейроморфных системах. Однако для данного приложения потребуются повышенные требования к стабильности электрофизических свойств используемых материалов. Выявление факторов, влияющих на стабильность электрического сопротивления, представляет собой важную и актуальную научную задачу, решение которой определяет развитие технологии нейроморфных систем.

Научная новизна результатов диссертационных исследований заключается в следующем

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 и циклическую составляющие, что обеспечивает максимизацию соотношения сигнал/шум.

2. В результате оптимизации содержания компонентов в системе $\text{GeTe} - \text{Sb}_2\text{Te}_3$, установлен состав материала – GeSb_2Te_4 , в котором наблюдается наибольшая стабильность удельного сопротивления при изотермическом отжиге при 80°C и 100°C в течение двух часов за счет компенсации изменения сопротивления частичной кристаллизацией.

3. Показано, что нелинейный характер температурной зависимости электропроводности 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 определены коэффициенты аппроксимации температурной зависимости уровня Ферми с помощью полинома второго порядка.

4. Определены параметры распределения плотности разрешенных энергетических состояний донороподобных и акцептороподобных глубоких уровней, концентрации глубоких дефектов и плотности состояний на краях разрешенных зон в фазопеременных материалах по линии квазибинарного разреза $\text{GeTe} - \text{Sb}_2\text{Te}_3$, с использованием разработанной математической модели, определяющей температурную зависимость положения уровня Ферми.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций

Обоснованность результатов диссертационного исследования обеспечена использованием математического аппарата физики полупроводников, физики

наносистем, а также соответствием полученных результатов основным представлениям физики, их корреляцией с результатами исследований других авторов. Предложенные автором диссертации решения аргументированы и оценены по сравнению с другими известными решениями. Достоверность экспериментальных результатов обеспечена использованием взаимодополняющих методов анализа, а также воспроизводимостью результатов исследований.

Значимость полученных автором результатов

1. Разработана методика измерения электрического сопротивления фазопеременных материалов при квазиизотермической выдержке, позволяющая разделить вклад предэкспоненциального множителя и энергии активации в процессе изменения электрического сопротивления.

2. Результаты измерения изменения электрического сопротивления материалов по линии квазибинарного разреза $\text{GeTe} - \text{Sb}_2\text{Te}_3$ после отжига при температурах 80 и 100 °С позволяют оптимизировать состав материала для элемента фазовой памяти в зависимости от температурного режима работы.

3. По результатам температурной зависимости удельного сопротивления фазопеременных материалов $\text{GeTe} - \text{Sb}_2\text{Te}_3$ вычислены коэффициенты аппроксимации температурной зависимости уровня Ферми с помощью полинома второго порядка, что позволяет моделировать зонные диаграммы полупроводниковых структур.

4. Разработана математическая модель температурной зависимости положения уровня Ферми, позволяющая по экспериментальной температурной зависимости удельного сопротивления фазопеременных материалов системы $\text{GeTe} - \text{Sb}_2\text{Te}_3$ определять зависимость положения уровня Ферми относительно потолка валентной зоны при изменении температуры с учетом нелинейности электропроводности в координатах Аррениуса, энергии активации проводимости и предэкспоненциального множителя.

5. Разработана методика определения энергетического положения глубоких донороподобных, акцептороподобных уровней, позволяющая вычислить параметры распределения плотности разрешенных энергетических состояний в фазопеременных материалах по линии квазибинарного разреза $\text{GeTe} - \text{Sb}_2\text{Te}_3$, что

упрощает оптимизацию составов на этапе физико-математического моделирования параметров фазопеременных материалов.

6. Разработаны рекомендации по оптимизации состава материала, обладающего устойчивостью к изменению электрофизических свойств в условиях повышенной температуры.

Результаты диссертационной работы использованы в отчетах по НИР. Соответствующие акты внедрения представлены в приложении к диссертации.

Оценка содержания диссертации

Структура диссертации включает введение, четыре главы, заключение с основными результатами работы, а также список цитируемых источников и два приложения.

Первая глава представляет собой обзор научной литературы на тему запоминающих устройств на основе фазопеременных материалов, их строению и свойствам. Особое внимание уделено электрофизическим характеристикам структур на основе таких материалов. Основной темой обзора является анализ самопроизвольного изменения удельного электрического сопротивления, как процесса, в наибольшей степени определяющего стабильность аморфной фазы в фазопеременных материалах. Рассмотрены температурные зависимости удельного сопротивления в структурах системы Ge-Sb-Te. Проанализированы различные экспериментальные методики по исследованию электрофизических свойств, их результаты.

Вторую главу автор посвятил описанию экспериментальных методов исследования электрофизических свойств тонких пленок фазопеременных материалов. Описаны параметры экспериментальных образцов и алгоритмы проведения измерений. Представлены методики температурных измерений, в том числе с применением различных типов температурных выдержек. Показаны характеристики разработанного измерительно-аналитического комплекса для исследования температурной зависимости электрофизических параметров полупроводниковых структур в автоматическом режиме.

В третьей главе представлены результаты экспериментального исследования электрофизических свойств тонких пленок фазопеременных материалов системы

GeTe – Sb₂Te₃ после кратковременных воздействий повышенной температуры, так и после длительных (более года) выдержек при комнатной температуре. Показано, что изменение электрического сопротивления в фазопеременных материалах обусловлено комбинацией изменений величин энергии активации проводимости и предэкспоненциального множителя в выражении для электропроводности. Установлено, что температурная выдержка материалов по линии квазибинарного разреза GeTe – Sb₂Te₃ приводит к увеличению или уменьшению удельного сопротивления в зависимости от содержания GeTe и параметров температурного воздействия.

В **четвертой главе** представлены результаты моделирования положения уровня Ферми в тонких аморфных пленках фазопеременных материалов системы GeTe – Sb₂Te₃. Разработана методика определения положения глубоких энергетических уровней в запрещенной зоне, позволяющая выполнить построение энергетических диаграмм для аморфных фазопеременных полупроводников. Исследовано влияние изотермического воздействия (при температурах от 80 до 120°С) и длительного естественного старения на положение уровня Ферми в исследуемых образцах. Установлено, что изменение сопротивления сопровождается параллельным сдвигом температурной зависимости положения уровня Ферми $E_F(T)$ относительно края валентной зоны, тогда как начальные стадии кристаллизации вызывают нелинейные искажения зависимости $E_F(T)$.

В **Заключении** содержатся основные выводы по результатам теоретических и экспериментальных исследований, проведенных в рамках диссертационного исследования.

Диссертация обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения и свидетельствует о личном вкладе автора в результаты диссертационных исследований.

Основные результаты работы опубликованы в 18 работах, включая 2 публикации в изданиях, входящие в базы данных Web of Science и Scopus (Q1), 1 публикацию в издании, входящем в базу данных Scopus, 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ, 12 публикаций в материалах всероссийских и международных конференций.

Соответствие автореферата основным идеям и выводам диссертации

Автореферат диссертации полностью отражает ее содержание, повторяет основные положения и выводы, сделанные автором.

В качестве **замечаний** по диссертационной работе необходимо отметить следующее.

1. Главу 1 можно было бы дополнить разделом с описанием известных структур искусственного синапса на основе фазопеременных материалов.

2. Автор показал, что эффект изменения сопротивления обусловлен комбинацией изменений величин энергии активации проводимости и предэкспоненциального множителя в выражении для электропроводности, однако не ясно, какой из параметров вносит больший вклад в наблюдаемые изменения.

3. При расчете положения уровня Ферми при изменении температуры, также следовало оценить влияние температуры на ширину запрещенной зоны исследуемых материалов.

Однако данные замечания не снижают теоретической и практической значимости представленной работы и не касаются научных положений, выносимых на защиту.

Постановка цели работы и решенные в ней задачи, методы их решения, результаты и их анализ, а также научные положения диссертации и их новизна соответствуют паспорту специальности 1.3.11. Физика полупроводников (физико-математические науки).

Основные результаты диссертационной работы могут рекомендоваться к внедрению на стадии проектирования полупроводниковых элементов, а также исследования электрофизических свойств материалов с изменением фазового состояния.

Заключение

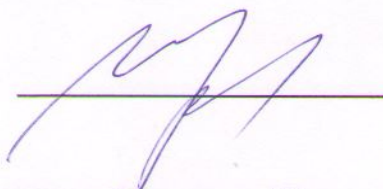
Диссертационная работа Е.П. Трусова «Стабильность электрофизических свойств тонких аморфных пленок полупроводниковых соединений $\text{GeTe} - \text{Sb}_2\text{Te}_3$ » является законченной научно-квалификационной работой, которая отвечает требованиям пунктов 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г № 842 в части

кандидатских диссертаций, а ее автор Трусов Евгений Павлович за решение научной задачи исследования стабильности электрофизических свойств тонких пленок полупроводниковых соединений $\text{GeTe} - \text{Sb}_2\text{Te}_3$, перспективных для создания новой элементной базы электроники, имеющей важное значение для развития физики полупроводников и полупроводниковой электроники, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11. Физика полупроводников.

Официальный оппонент

Штерн Юрий Исаакович, доктор технических наук по специальности 05.27.06. – «Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники», доцент, профессор института перспективных материалов и технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники».

«12» мая 2026 г.



Штерн Юрий Исаакович

Адрес: 124498, г. Москва, г. Зеленоград, Площадь Шокина, 1

Телефон: +7 (499) 710 14 98, E-mail: y.i.shtern@gmail.com

Подпись Штерна Юрия Исааковича удостоверяю:

Ученый секретарь Ученого совета Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», к.т.н., доцент



А.В. Козлов

с отзывом ознакомлен 28.05.2026

