ОТЗЫВ

официального рецензента на диссертационную работу

Жақыпова Әлібека Серікұлы на тему «Элементы энергонезависимой памяти для оптической и электрической записи информации на основе модифицированных пленок GST», предоставленную на соискание степени доктора философии (PhD)по специальности «6D072300 – Техническая физика»

№ п/п	Критерии	Соответствие критериям (подчеркнуть один из вариантов ответа)	Обоснование позиции официального рецензента (замечания выделить курсивом)
1.	Тема диссертации (на дату ее утверждения) соответствует направлениям развития науки и/или государственным программам	1.1 Соответствие приоритетным направлениям развития науки или государственным программам: 1) диссертация выполнена в рамках проекта или целевой программы, финансируемого(ой) из государственного бюджета (указать название и номер проекта или программы); 2) диссертация выполнена в рамках другой государственной программы (указать название программы); 3) диссертация соответствует приоритетному направлению развития науки, утвержденному Высшей научно-технической комиссией при Правительстве Республики Казахстан (указать направление).	Диссертационная работа посвящена отработке и оптимизации технологии получения элементов энергонезависимой памяти на основе функционального слоя $Ge_2Sb_2Te_5$ модифицированного серебром для оптической и электрической записи информации. Исследования, приведенные в данной диссертации, соответствуют приоритетному направлению развития науки «Энергетика и машиностроение» и планами фундаментальной научно-исследовательской работы КН МОН РК «Грантовое финансирование научных исследований» в рамках проекта «Структура и электронные свойства наноразмерных пленок модифицированных металлом халькогенидных полупроводников с фазовой памятью в состояниях стекло-кристалл» (2018-2020 AP05133499 № госрегистрации 0118РК01188)
2.	Важность для науки	Работа **вносит**/не вносит существенный вклад в науку, а ее важность **хорошо раскрыта**/не раскрыта.	Представленные в диссертационной работе результаты вносят существенный вклад в развитие основ проектирования функциональных материалов для энергонезависимой памяти нового поколения, в частности, материалов на основе модифицированных серебром пленок $Ge_2Sb_2Te_5$. Исследовано влияние концентрации примеси на оптические и электрические свойства, исследована кинетика фазовых превращений при

			воздействии лазерного излучения, а также проведен анализ структуры и состава с использованием современных методик, что позволило изучить параметры для улучшения записи информации в фазопеременных материалах. В работе особое внимание уделено воздействию внешних факторов на процессы аморфно-кристаллической трансформации и параметрам переключения, что имеет критическое значение для повышения стабильности, быстродействия и энергоэффективности фазопеременных ячеек памяти. Полученные данные имеют высокую научную и практическую значимость для разработки надежных и высокоскоростных энергонезависимых запоминающих устройств.
3.	Принцип самостоятельности	Уровень самостоятельности: 1) **высокий**; 2) средний; 3) низкий; 4) самостоятельности нет.	Личный вклад автора заключается в том, что весь объем диссертационной работы, включая аналитический обзор литературы, проведение серии экспериментов, обработку и интерпретацию полученных данных, а также подготовку научных публикаций, выполнен автором самостоятельно. Автором были сформулированы ключевые научные задачи, определены методологические подходы к их решению, проведено обсуждение результатов и сформулированы основные выводы совместно с научными консультантами. Высокий уровень самостоятельности подтверждается соавторством в ряде научных публикаций, в том числе в рецензируемых зарубежных изданиях, а также активным участием в международных научных конференциях, где автор неоднократно представлял и защищал результаты диссертационной работы.
4.	Принцип внутреннего единства	4.1 Обоснование актуальности диссертации: 1) **обоснована**; 2) частично обоснована; 3) не обоснована.	В диссертационной работе рассмотрены актуальные вопросы по модификации функциональных слоев на основе халькогенидных соединений, применяемых в современных элементах энергонезависимой памяти. Особое внимание уделено исследованию процессов фазовых превращений в тонких пленках $Ge_2Sb_2Te_5$, модифицированных серебром, под действием лазерного и электрического воздействия, что имеет принципиальное значение для повышения надежности и скорости записи информации. Учитывая быстрый рост интереса к

			энергонезависимым запоминающим устройствам нового поколения и значительный потенциал фазопеременных материалов в цифровых и оптоэлектронных технологиях, актуальность проведенного исследования не вызывает сомнений. Это подтверждается публикацией четырех научных статей, в том числе в международных журналах с импакт-фактором, что свидетельствует о востребованности полученных результатов среди специалистов в области физики функциональных материалов и микроэлектроники.
		4.2 Содержание диссертации отражает тему диссертации: 1) **отражает**; 2) частично отражает; 3) не отражает.	Диссертационная работа представляет собой завершенное научное исследование, полностью соответствующее заявленной теме. Работа обладает внутренней логической связностью, а все ее разделы направлены на разработку методов структурной и примесной модификации, а также на изучение процессов фазовых превращений, изменения оптических и электрических свойств под действием внешнего воздействия.
		4.3. Цель и задачи соответствуют теме диссертации: 1) **соответствуют**; 2) частично соответствуют; 3) не соответствуют.	Цели и задачи, поставленные в диссертационной работе, полностью соответствуют заявленной теме и реализованы в полном объеме. Полнота решения задач, связанных с исследованием фазовых переходов, структурных и оптических свойств в функциональных слоях $Ge_2Sb_2Te_5$<Ag>, достигнута за счет комплексного применения современных экспериментальных методов: in situ рамановской спектроскопии для отслеживания фазовых трансформаций в реальном времени, оптической спектрофотометрии для анализа оптических свойств, а также вольтамперной диагностики для оценки параметров электрической записи. Отработка технологии ионно-плазменного магнетронного со-распыления, направленная на точный контроль состава и структуры функциональных слоев, позволила глубоко изучить влияние примеси серебра на характеристики энергонезависимой памяти.
		4.4 Все разделы и положения диссертации логически взаимосвязаны: 1) **полностью взаимосвязаны**;	В диссертационной работе исследуются ключевые аспекты модификации и диагностики функциональных слоев на основе $Ge_2Sb_2Te_5$, модифицированных серебром, с целью повышения

		2) взаимосвязь частичная; 3) взаимосвязь отсутствует.	эффективности энергонезависимой памяти для оптической и электрической записи информации. Работа состоит из четырех разделов. Все разделы и научные положения, сформулированные в заключении, логически взаимосвязаны и образуют внутренне согласованную структуру. В первом разделе представлен анализ технологии PCM. Во втором разделе описаны популярные технологии получения функциональных слоев и рассмотрены методы их характеризации. В третьем разделе приведены результаты исследования оптических свойств и фазовых переходов под действием лазерного излучения. В четвертом разделе изучено влияние примеси серебра на электрические параметры ячеек памяти. Таким образом, вся работа направлена на комплексное изучение механизмов управления фазовым состоянием и параметрами записи в материалах памяти нового поколения.
		4.5 Предложенные автором новые решения (принципы, методы) аргументированы и оценены по сравнению с известными решениями: 1) **критический анализ есть**; 2) анализ частичный; 3) анализ представляет собой не собственные мнения, а цитаты других авторов; 4) анализ отсутствует.	Автором проведен всесторонний аналитический обзор литературы по исследованию свойств халькогенидных полупроводников и фазопеременных материалов, применяемых в энергонезависимых устройствах памяти, охватывающий публикации начиная с ранних фундаментальных работ середины XX века и заканчивая актуальными исследованиями 2023 года (раздел 1). Историко-критический анализ научных источников позволил обоснованно выбрать подходы к модификации функциональных слоев $Ge_2Sb_2Te_5$ примесью серебра, определить методологию и направления исследования, а также провести сопоставление полученных результатов с существующими аналогами. Проведенный анализ стал основой для формулировки целей и задач работы и сыграл ключевую роль в выборе экспериментальных и диагностических методов.
5.	Принцип научной новизны	5.1 Научные результаты и положения являются новыми? 1) **полностью новые**; 2) частично новые (новыми являются 25-75%);	Научные результаты являются полностью новыми. К ним относятся: 1. Впервые изучено воздействие мощности и длительности лазерного излучения (λ = 633 нм) на кинетику трансформации

		3) не новые (новыми являются менее 25%).	структуры фазопеременных модифицированных функциональных слоев $Ge_2Sb_2Te_5$<Ag> с использованием *in situ* метода рамановской спектроскопии, и установлены особенности фазовых переходов, управляемые мощностью лазерного излучения и концентрацией примеси. 2. Впервые установлено значительное увеличение оптического контраста фазопеременных функциональных слоев $Ge_2Sb_2Te_5$ в широком спектральном диапазоне от 300 до 650 нм при модифицировании их серебром. Наиболее существенное возрастание *ОС* (до 60%) происходит у функциональных слоев с концентрацией 12,3 ат.%. 3. Впервые изучено влияние примеси серебра на параметры электрической записи информации в ячейках памяти на основе фазопеременных модифицированных функциональных слоев $Ge_2Sb_2Te_5$. Установлено, что при повышении концентрации примеси происходит снижение порогового напряжения и времени переключения. Наименьшую потребляемую мощность имеют ячейки памяти на основе состава $Ge_2Sb_2Te_5$<Ag 7,0 ат.%>.
		5.2 Выводы диссертации являются новыми?	Выводы, представленные в диссертационной работе, являются новыми и оригинальными. Автором предложены инновационные подходы исследования функциональных слоев $Ge_2Sb_2Te_5$, в том числе in situ анализ фазовых превращений, а также управление оптическими и электрическими характеристиками путем легирования серебром. Все выводы обоснованы экспериментальными данными, полученными в ходе комплексных исследований структуры, состава и свойств материалов с использованием современных аналитических методов. Научная новизна подтверждается публикациями в международных научных журналах, входящих в базы данных Scopus и Web of Science, что свидетельствует о высокой значимости полученных результатов для специалистов в области функциональных материалов.
		1) **полностью новые**;	
		2) частично новые (новыми являются 25-75%);	
		3) не новые (новыми являются менее 25%).	

		5.3 Технические, технологические, экономические или управленческие решения являются новыми и обоснованными: 1) **полностью новые**; 2) частично новые (новыми являются 25-75%); 3) не новые (новыми являются менее 25%).	Предложенные в диссертации решения являются новыми и научно обоснованными, что подтверждается публикацией результатов исследований в авторитетных международных журналах. Высокий научно-технический уровень диссертации обеспечивается отработкой технологии ионно-плазменного высокочастотного магнетронного со-распыления, позволившей управлять структурой и составом функциональных слоев $Ge_2Sb_2Te_5$ с примесью серебра. Достоверность интерпретации кинетики фазовых трансформаций, наблюдаемой in situ методом рамановской спектроскопии, подтверждена согласованием экспериментальных данных с результатами оптической спектрофотометрии и исследования электрических характеристик ячеек памяти. Разработанные подходы позволили существенно повысить оптический контраст и снизить пороговое напряжение и время переключения слоев.
6.	Обоснованность основных выводов	Все основные выводы основаны/не основаны на весомых с научной точки зрения доказательствах либо достаточно хорошо обоснованы (для qualitative research (куолитатив ресеч) и направлений подготовки по искусству и гуманитарным наукам).	Все основные выводы диссертации базируются на надежных экспериментальных данных и хорошо обоснованы. Представленные результаты были тщательно обработаны и подвергнуты глубокому анализу с использованием современных аналитических методов. Использованные методологические подходы соответствуют стандартам современной физики полупроводниковых материалов. Полученные выводы не противоречат теоретическим представлениям и экспериментальным закономерностям и вносят существенный вклад в развитие технологий энергонезависимой памяти нового поколения.
7.	Основные положения, выносимые на защиту	Необходимо ответить на следующие вопросы по каждому положению в отдельности: 7.1 Доказано ли положение? 1) доказано; 2) скорее доказано; 3) скорее не доказано;	Все 3 положения, вынесенные на защиту, доказаны экспериментально с применением различных современных методов. **Положение 1:** Методом ионно-плазменного высокочастотного (13,56 МГц) магнетронного распыления комбинированной мишени из поликристаллического полупроводникового состава $Ge_2Sb_2Te_5$ и

		4) не доказано; 5) в текущей формулировке проверить доказанность положения невозможно. 7.2 Является ли тривиальным? 1) да; 2) нет; 3) в текущей формулировке проверить тривиальность положения невозможно. 7.3 Является ли новым? 1) да; 2) нет; 3) в текущей формулировке проверить новизну положения невозможно. 7.4 Уровень для применения: 1) узкий; 2) средний; 3) широкий; 4) в текущей формулировке проверить уровень применения положения невозможно. 7.5 Доказано ли в статье? 1) да; 2) нет; 3) в текущей формулировке проверить доказанность положения в статье невозможно.	Ag возможно получение фазопеременных функциональных слоев $Ge_2Sb_2Te_5$<Ag> с аморфной структурой с содержанием примеси Ag до 12,3 ат.% и с повышенной температурой кристаллизации (280 °C). **7.1 доказано** **7.2 нет** **7.3 да** **7.4 широкий** **7.5 да** **Положение 2:** Воздействие лазерного излучения (λ = 633 нм) на фазопеременные функциональные слои $Ge_2Sb_2Te_5$<Ag> приводит к фазовому переходу их структуры из аморфного в кристаллическое состояние (оптическая запись информации), особенности которого (наличие или отсутствие промежуточной фазы) определяются мощностью и длительностью излучения и контролируются концентрацией модифицирующей примеси Ag. Оптический контраст функциональных слоев $Ge_2Sb_2Te_5$<Ag> существенно возрастает при увеличении концентрации примеси Ag для всех длин волн излучения лазеров, применяемых на практике для записи информации. **7.1 доказано** **7.2 нет** **7.3 да** **7.4 широкий** **7.5 да** **Положение 3:** Параметры электрической записи информации в ячейках памяти на основе фазопеременных функциональных слоев $Ge_2Sb_2Te_5$<Ag> управляются в широких пределах концентрацией модифицирующей примеси Ag. При возрастании концентрации серебра от 0 до 12,3 ат.% пороговое напряжение и время переключения уменьшаются от 1,74 до 1,06 В и от 70 нс до < 50

			нс, соответственно. Минимальная мощность записи достигается при концентрации Ag в $Ge_2Sb_2Te_5$ равной 7,0 ат.%. **7.1 <u>доказано</u>** **7.2 <u>нет</u>** **7.3 <u>да</u>** **7.4 <u>широкий</u>** **7.5 <u>да</u>**
8.	Принцип достоверности.	8.1 Выбор методологии - обоснован или методология достаточно подробно описана:	Выбор методологии диссертационного исследования является обоснованным, тщательно проработанным и подробно изложенным. Метод ионно-плазменного высокочастотного магнетронного со-распыления, используемый для получения функциональных слоев $Ge_2Sb_2Te_5$ модифицированных серебром, полностью соответствует поставленным задачам и обеспечивает необходимый контроль состава и структуры исследуемых материалов. Применение in situ метода рамановской спектроскопии позволило проводить прямое наблюдение и анализ фазовых превращений в режиме реального времени, что является существенным преимуществом предложенного подхода. Используемое аналитическое оборудование, включая оптический спектрофотометр и систему для измерения вольтамперных характеристик, обеспечило надежное измерение оптических и электрических свойств изучаемых материалов. Высокая чувствительность и точность примененных методик минимизируют влияние внешних помех и позволяют получить достоверные и воспроизводимые результаты. Таким образом, выбранная методология полностью соответствует целям исследования.
	Достоверность источников и предоставляемой информации	1) **<u>да</u>**;	
		2) нет.	
		8.2 Результаты диссертационной работы получены с использованием современных методов научных исследований и методик обработки и интерпретации данных с применением компьютерных технологий:	**Да**, результаты диссертационного исследования были получены с применением современных, надежных и апробированных методов диагностики функциональных материалов. Метод in situ рамановской спектроскопии был успешно использован для анализа кинетики фазовых переходов и структурных трансформаций в модифицированных пленках $Ge_2Sb_2Te_5$<Ag>. Исследование оптических характеристик осуществлялось с
		1) **<u>да</u>**;	

		2) нет.	использованием спектрофотометрии в видимом диапазоне, позволяющей точно определить оптический контраст и глубину проникновения лазерного излучения. Для изучения электрических параметров ячеек памяти использован метод измерения вольтамперных характеристик с применением высокоточного импульсного генератора и осциллографа. Структурный и фазовый анализ модифицированных пленок проводился методами рентгеновской дифракции (Rigaku MiniFlex 600), позволяющим надежно определить фазовый состав и кристаллическую структуру слоев. Элементный состав пленок до и после модификации серебром установлен методом энергодисперсионной спектроскопии (Quanta 3D 200i, EDAX), что обеспечивает высокую достоверность и точность измерений. Морфология поверхности пленок изучена методом сканирующей электронной микроскопии (Quanta 3D 200i). Таким образом, результаты диссертации являются результатом тщательных и всесторонних экспериментальных исследований с применением современных методик и оборудования, обеспечивающих высокую степень достоверности и научной значимости.
		8.3 Теоретические выводы, модели, выявленные взаимосвязи и закономерности доказаны и подтверждены экспериментальным исследованием (для направлений подготовки по педагогическим наукам результаты доказаны на основе педагогического эксперимента):	Да, все теоретические выводы, предложенные модели, выявленные взаимосвязи и закономерности, представленные в диссертации, полностью доказаны и подтверждены экспериментально. Полученные результаты, касающиеся кинетики фазовых переходов и структурных изменений в функциональных слоях $Ge_2Sb_2Te_5$<Ag>, подкреплены надежными и точными экспериментальными измерениями, проведенными с использованием in situ рамановской спектроскопии, спектрофотометрии и энергодисперсионного анализа. Экспериментально установленные закономерности, такие как зависимость температуры и скорости кристаллизации от концентрации примеси серебра, не противоречат данным, представленным в исследованиях других авторов. Использование нескольких взаимодополняющих методов анализа гарантировало
		1) **да**;	
		2) нет.	

			высокую степень достоверности интерпретации полученных результатов и подтверждает их научную обоснованность и корректность.
		8.4 Важные утверждения **подтверждены**/частично подтверждены/не подтверждены ссылками на актуальную и достоверную научную литературу.	Полученные результаты и выводы полностью соответствуют содержанию всех разделов диссертации и отражены в публикациях, индексируемых в базах Scopus и Web of Science. Достоверность и научная обоснованность выводов подтверждается высокой степенью согласованности с результатами независимых исследований других авторов, что подтверждено ссылками на актуальные публикации по теме диссертации. Использованная в работе современная научная литература и аналитические обзоры гарантируют объективность и надежность представленных результатов и их соответствие существующим научным представлениям.
		8.5 Использованные источники литературы **достаточны**/не достаточны для литературного обзора.	В диссертационной работе представлен обширный и тщательно подобранный список литературы из 181 источника. Количество и содержание цитируемых публикаций полностью достаточны и релевантны для формирования глубокого аналитического обзора, постановки задач исследования и всестороннего обсуждения полученных результатов.
9	Принцип практической ценности	9.1 Диссертация имеет теоретическое значение:	Да, диссертация обладает теоретическим значением, поскольку в ней существенно расширены и дополнены современные представления о физических механизмах фазовых превращений и структурных трансформаций в функциональных слоях на основе халькогенидных полупроводников $Ge_2Sb_2Te_5$, модифицированных серебром. Проведенные исследования вносят важный вклад в теоретическое понимание влияния примесной модификации на кинетику кристаллизации, изменении оптических и электрических свойств, происходящих под воздействием внешних импульсов.
		1) **да**;	
		2) нет.	
		9.2 Диссертация имеет практическое значение и существует высокая вероятность применения полученных результатов на практике:	Да, диссертация обладает значимой практической ценностью, поскольку её результаты легли в основу разработки и оптимизации технологии получения и модификации функциональных слоёв $Ge_2Sb_2Te_5$ с добавлением серебра для применения в элементах энергонезависимой памяти нового
		1) **да**;	

		2) нет.	поколения. Полученные результаты могут быть непосредственно использованы при проектировании и изготовлении высокоскоростных и энергоэффективных оптических и электрических устройств памяти, способствуя улучшению их производительности и надежности. Кроме того, разработанные методики структурной и примесной модификации могут быть полезны при создании новых материалов и устройств в области микроэлектроники, оптоэлектроники и цифровых технологий, а также в образовательном процессе при подготовке специалистов по технической физике.
		9.3 Предложения для практики являются новыми: 1) **полностью новые**; 2) частично новые (новыми являются 25-75%); 3) не новые (новыми являются менее 25%).	Полученные результаты являются полностью новыми, поскольку впервые экспериментально продемонстрирована возможность значительного улучшения характеристик фазопеременных слоев $Ge_2Sb_2Te_5$ путем модифицирования серебром. Испытания показали существенное увеличение температуры и скорости кристаллизации, снижение времени переключения и повышение оптического контраста, однако выявленная чувствительность параметров к концентрации примеси указывает на необходимость оптимального подбора состава модифицированных материалов для практического применения в устройствах памяти.
10.	Качество написания и оформления	Качество академического письма: 1) **высокое**; 2) среднее; 3) ниже среднего; 4) низкое.	Качество академического письма и оформление диссертации – высокое. Текст диссертационной работы изложен последовательно и логически взаимосвязан. Рисунки, таблицы и кривые оформлены в соответствии с установленными требованиями.
11.	Замечания к диссертации	В диссертационной работе Жақыпова Ә.С. имеются незначительнее орфографические о стилистические ошибки, а также, некоторые рисунки имеют не высокое качество. Однако вышеприведенные замечания не снижают научно-практическую ценность и не влияют на общую положительную оценку диссертации.	

12.	Научный уровень статей докторанта по теме исследования (в случае защиты диссертации в форме серии статей официальные рецензенты комментируют научный уровень каждой статьи докторанта по теме исследования)	Научный уровень статей соискателя по теме диссертационного исследования является высоким. Публикации (2 статьи, индексируемые в базе Scopus и Web of Science) отражают основные результаты диссертации.
13.	Решение официального рецензента (согласно пункту 28 настоящего Типового положения)	Диссертационная работа, выполненная на тему: «Элементы энергонезависимой памяти для оптической и электрической записи информации на основе модифицированных пленок GST» по содержанию и оформлению, соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертационным работам. Автор Жақыпов Әлібек Серікұлы заслуживает присвоения степени доктора философии (PhD) по специальности «6D072300 – Техническая физика».

Официальный рецензент:

Кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией ионно-плазменных технологий Института ядерной физики — Жаканбаев Елдар Асхатович

Подпись Жаканбаева Е.А. заверяю.

PhD, заместитель генерального директора по научной работе Института ядерной физики — Садуев Нуржан Орынбасарович