АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени доктора философии (PhD) по специальности «6D072300 – Техническая физика»

ЖАҚЫПОВ ӘЛІБЕК СЕРІКҰЛЫ

Элементы энергонезависимой памяти для оптической и электрической записи информации на основе модифицированных пленок GST

Общая характеристика работы. Диссертационная работа посвящена экспериментальным исследованиям элементов энергонезависимой памяти на основе модифицированного серебра функционального слоя $Ge_2Sb_2Te_5$ для оптической и электрической записи информации.

Актуальность исследования. В современную эпоху стремительного увеличения объемов цифровой информации спрос на устройства памяти, способные накапливать и переносить большие потоки данных, постоянно увеличивается. Несмотря на высокие темпы роста и большой объем производства эффективность обработки информации не может быть обеспечена традиционными технологиями.

Энергонезависимая память нового поколения (eNVM – embedded non-volatile memories), характеризуется отличным масштабированием, низким энергопотреблением, большим количеством циклов перезаписи и в недалеком будущем может заменить традиционные устройства памяти. Энергонезависимая фазопеременная память (PCM - Phase Change Memory) представляет собой одну из возможных технологий, рассматриваемых для реализации устройств памяти нового поколения. Технология PCM основана на реверсивном фазовом переходе материала между аморфным и кристаллическим состояниями под воздействием импульсов лазерного излучения или электрического поля.

В сравнении с традиционными технологиями, такими как Flash-память (NOR, NAND), динамическая (DRAM) и статическая (SRAM) память с произвольным доступом, а также с несколькими разрабатываемыми технологиями памяти нового поколения, включая память с переносом спинового момента (STT-RAM) и резистивную память (ReRAM), технология PCM характеризуется относительно высокой скоростью чтения (~10 нс) и записи (≥50 нс) информации, низким энергопотреблением при записи (~0,1 пДж/бит), а также большим числом возможных циклов перезаписи (10^8–10^{15}).

Основой запоминающих устройств памяти типа PCM являются халькогенидные стеклообразные полупроводники (ХСП). Эти материалы принадлежат к классу некристаллических полупроводников и обладают уникальными свойствами, такими как, например, фотоструктурные превращения, эффект переключения и памяти. Данные свойства халькогенидных полупроводников обусловливаются лабильностью их атомной структуры, так как атомы содержат неподелённые пары электронов (lone electron pairs). Кроме того, ХСП характеризуются высокой плотностью локализованных электронных состояний, обусловленных собственными заряженными дефектами структуры, которые закрепляют уровень Ферми в середине запрещенной зоны.

При воздействии сильных электрических полей на тонкие аморфные пленки ХСП наблюдалось быстрое скачкообразное уменьшение их электрического сопротивления с последующим восстановлением исходного состояния после снятия внешнего электрического воздействия, что впоследствии получило название эффекта переключения. Если после эффекта переключения происходит перестройка локальной структуры ХСП, в результате которой происходит кристаллизация, и состояние с низким сопротивлением сохраняется даже при отсутствии внешнего электрического поля, то такой эффект называется эффектом памяти. Материалы, используемые в современных устройствах фазопеременной памяти (PCM), являются халькогенидными полупроводниками сложных

составов, находящихся на линии квазибинарного разреза GeTe-Sb_2Te_3. При этом хорошо изученные тонкие пленки состава $Ge_2Sb_2Te_5$ (GST) считаются наиболее перспективными функциональными слоями для применения в таких устройствах. Основными недостатками функциональных слоев GST являются ограниченное количество циклов записи/стирания, относительно медленная скорость переключения между фазовыми состояниями и чувствительность параметров к температурным изменениям. Управление структурой и электронными свойствами данных материалов может не только повысить производительность устройств энергонезависимой памяти, но и значительно расширить спектр их возможных применений.

Одним из эффективных методов, позволяющих улучшить вышеуказанные свойства функциональных слоев GST, является метод структурной и примесной модификации электронных свойств. Метод структурной модификации заключается в управлении структурой GST, с использованием разных методов их получения без изменения состава материала. Особенность примесной модификации GST заключается в использовании таких методов, которые обеспечивают сохранение их аморфной структуры при больших концентрациях примеси.

На сегодняшний день метод ионно-плазменного высокочастотного магнетроного со-распыления GST и примеси позволяет реализовать оба выше указанных подхода и в широких пределах управлять электронными свойствами модифицированных слоев GST. Кроме того, этот метод позволяет получать функциональные слои сложных составов с заданным соотношением компонентов.

В качестве модифицирующей примеси для функциональных слоев GST, наряду с другими примесями, используется серебро. В модифицированных серебром слоях GST наблюдаются увеличение температуры и скорости кристаллизации, снижение времени переключения под действием электрического импульса и измение оптических свойств. Кроме того, высокая диффузионная способность примесных атомов серебра приводит к достаточно равномерному распределению примеси в функциональных слоях фазопеременных материалов.

Однако, несмотря на многочисленные исследования модифицированных серебром фунциональных слоев GST, остаются не исследованными такие важные процессы для записи информации как кинетика трансформации структуры при лазерном облучении и влияние примеси серебра на эффект переключения в ячейках памяти.

Целью диссертационной работы является экспериментальное исследование модифицированных примесью серебра функциональных слоев $Ge_2Sb_2Te_5$ для оптической и электрической записи информации.

Для реализации указанной цели были поставлены следующие логически взаимосвязанные и последовательные задачи:

1. Отработать технологию получения фазопеременных функциональных слоев с аморфной структурой и заданным составом на основе модифицированного серебром состава $Ge_2Sb_2Te_5$ ($Ge_2Sb_2Te_5$<Ag>) с использованием метода ионно-плазменного высокочастотного магнетронного со-распыления;

2. Изучить оптические свойства модифицированных фазопеременных функциональных слоев $Ge_2Sb_2Te_5$, определить эффективную глубину проникновения лазерного излучения и спектральное распределение оптического контраста в GST в видимой области спектра, исследовать *in situ* кинетику трансформации структуры функциональных слоев $Ge_2Sb_2Te_5$ и $Ge_2Sb_2Te_5$<Ag> под действием лазерного излучения;

3. Исследовать влияние примеси серебра на электрические характеристики и параметры ячеек памяти на основе разработанных модифицированных фазопеременных функциональных слоев $Ge_2Sb_2Te_5$<Ag>.

Объектами исследования являются фазопеременные функциональные слои на основе состава $Ge_2Sb_2Te_5$ модифицированного примесью серебра, полученные методом ионно-плазменного высокочастотного магнетронного со-распыления в атмосфере аргона.

Предметом исследования являются состав, структура, кинетика трансформации структуры под воздействием электромагнитного излучения и оптические свойства функциональных слоев $Ge_2Sb_2Te_5$<Ag>, а также изучение вольт-амперных характеристик ячеек памяти на их основе.

Методы исследования.

Для достижения цели диссертационной работы и успешного выполнения поставленных задач были использованы следующие экспериментальные методы исследования модифицированных функциональных слоев: исследования структуры, состава функциональных слоев осуществлялись посредством аналитического оборудования, таких как метод рентгеноструктурного анализа (Rigaku MiniFlex 600), метод сканирующей электронной спектроскопии (Quanta 3D 200i), метод энерго-дисперсионного анализа (Quanta 3D 200i с приставкой EDAX в режиме высокого вакуума), спектрометр комбинационного рассеяния света (Solver Spectrum 600/600 с He-Ne-лазером (λ = 633 нм)). Исследование трансформации структуры осуществлялось с помощью поэтапного термического отжига с применением контроллера температуры (Omron E5CZ), источника питания (Tektronix PWS2326) и пикоамперметра (Keithley 6485, ПК) и лазерного облучения с помощью метода комбинационного рассеяния света (Solver Spectrum 600/600 с He-Ne-лазером (λ = 633 нм)); исследование оптических и электрических свойств функциональных слоев осуществлялось с помощью оптического спектрофотометра (Shimadzu UV2000) и методов изучения воль-амперной характеристики с применением импульсного генератора (Актаком АНР-1011) и осциллографа (Gwinstek GDS-71062A).

Научная новизна работы

1. Впервые изучено воздействие мощности и длительности лазерного излучения (λ = 633 нм) на кинетику трансформации 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.%>.

Положения, выносимые на защиту

1. Методом ионно-плазменного высокочастотного (13,56 МГц) магнетронного распыления комбинированной мишени из поликристаллического полупроводникового состава $Ge_2Sb_2Te_5$ и 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 ^oC).

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.

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.%.

Научная и практическая значимость исследования

Полученные результаты, представляют как технологическую, так и практическую ценность для развития техники полупроводниковых материалов, проектирования и изготовления элементов энергонезависимой памяти для оптических дисков и электрических ячеек памяти, на основе новых перспективных функциональных фазопеременных слоев $Ge_2Sb_2Te_5$<Ag>. Кроме того, результаты исследования являются важными для учебного процесса подготовки магистров и докторантов в области технической физики.

Исследования, направленные на повышение скорости и надежности записи данных в функциональных слоях на основе фазопеременных материалов, могут оказать значительное влияние на современные цифровые технологии и искусственный интеллект.

Достоверность и обоснованность полученых результатов обусловлены использованием современных методов исследования и аппаратуры. Кроме того достоверность результатов подтвержается наличием публикаций в научных журналах дальнего зарубежья с высоким импакт-фактором, а также в изданиях рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования Министерства науки и высшего образования Республик Казахстан (КОКСНВО МНВО РК), и в трудах международных научных конференций ближнего и дальнего зарубежья.

Личный вклад автора

Отработка технологии получения фазопеременных функциональных слоев составов $Ge_2Sb_2Te_5$ и $Ge_2Sb_2Te_5$<Ag> было проведено автором с помощью метода ионно-плазменного высокочастотного магнетронного распыления. Получение, обработка и анализ результатов исследований оптических и электрических характеристик были выполнены самостоятельно.

Публикации

По материалам диссертационной работы опубликовано 12 печатных работ, в том числе 2 статьи в журналах, входящих в базу данных Scopus и Web of Science, 2 статьи в изданиях, рекомендованных КОКСНВО МНВО РК, и 8 тезисов докладов в материалах международных научных конференций.

Апробация диссертационной работы

Результаты, полученные при выполнении диссертационной работы, докладывались и обсуждались на следующих международных конференциях: V Международная научная конференция «Современные проблемы физики конденсированного состояния, нанотехнологии и наноматериалов», 17-18 мая, 2018, Алматы, International Conference on Amorphous and Nanostructured Chalcogenides. 30 June-4 July, Chisinau, Republic of Moldova, 2019, The 7th International Conference on Nanomaterials and Advanced Energy Storage Systems (INESS). 7-9 August, Almaty, 2019, Международная научная конференция студентов и молодых ученых «ФАРАБИ ӘЛЕМІ» Алматы, Казахстан, 6-9 апреля 2020 года, The 8 th International Conference on Nanomaterials and Advanced Energy Storage Systems (INESS-2020), 6 August, Nur-Sultan, 2020, Международная научная конференции; «Аморфные и микрокристаллические полупроводники», 19-21 ноября, 2021, Санкт-Петербург, Россия, The 10 th International Conference on Nanomaterials and Advanced Energy Storage Systems (INESS-2022), 4-6 August, 2022, Nur-Sultan, Международная научная конференции; «Аморфные и микрокристаллические полупроводники», 3-5 июля, 2023, Санкт-Петербург, Россия

Статьи с импакт-фактором, входящие в международную научную базу данных Scopus и Web of Science:

– O.Yu. Prikhodko, G.A. Ismailova, **A.S. Zhakypov**, A.V. Kolobov, K.N. Turmanova, R.R. Nemkaeva, S.Ya. Maksimova, Zh.K. Tolepov, S.L. Peshaya. Structural transformation of thin $Ge_2Sb_2Te_5$<Ag> films produced by ion-plasma co-sputtering under laser irradiation // Journal of Electronic material. – 2023. – 52(4). – P. 2492-2498.

– S.L. Mikhailova, O.Yu. Prikhodko, Y.S. Mukhametkarimov, K. Dautkhan, U.A. Doseke, S.A. Kozyukhin, G.A. Ismailova, S.Ya. Maksimova, A.Yu. Tarapeyeva, **A.S. Zhakypov**. Thermal stability of the structure and optical properties of nanostructured TiO_2 films // Russian Physics Journal. – 2021. – 63(12). – P. 2045-2051

Статьи в изданиях, рекомендуемых КОКСНВО МНВО РК:

– **А.С. Жакыпов**, Ж.К. Толепов, Г.А. Исмайлова, С.Л. Пешая, М.Н. Уалханова. Изменения структуры наноразмерных аморфных пленок $Ge_2Sb_2Te_5$<Bi> при лазерном облучении // Вестник Восточно-Казахстанского технического университета имени Д. Серикбаева. – 2022. – №3. – P. 104-111.

-С.А. Фефелов, Л.П. Казаков, Н.А. Богословский, А.Б. Былев, Е.В. Гущина, Ж.К. Толепов, **А.С. Жакыпов**, О.Ю. Приходько. Влияние примеси Bi на основные параметры вольт-амперных характеристик полупроводника с фазовой памятью $Ge_2Sb_2Te_5$ // Физика и техника полупроводников. – 2024. – Том 58, вып.8. – с.443-447.

Связь темы диссертации с планами научных работ

Диссертационная работа выполнена в соответствии с планами научно-исследовательского проекта № AP05133499 «Структура и электронные свойства наноразмерных пленок модифицированных металлом халькогенидных полупроводников с фазовой памятью в состояниях стекло-кристалл» (2018-2020 гг.).

Объем и структура диссертации

Диссертационная работа содержит перечень условных обозначений и сокращений, введение, основную часть из 4-х разделов, заключение и список литературы. Работа представлена на 111 страницах, содержит 58 рисунков, 11 таблиц и 181 библиографических ссылок.