# РЕЦЕНЗИЯ

на диссертационную работу Толепова Жандоса Каирмаганбетовича по теме «Структура и электронные свойства модифицированных пленок GeSbTe», представленной на соискание ученой степени доктора философии (PhD) по специальности 6D071000 – «Материаловедение и технология новых материалов»

1. **Актуальность темы исследования и ее связь с общенаучными и общегосударственными программами.**

**Актуальность исследования.**

Халькогенидные стеклообразные полупроводники (ХСП) системы Ge-Sb-Te обладают уникальным свойством – эффектом переключения и памяти, которое заключается в реверсивном фазовом переходе их структуры из аморфного в кристаллическое состояние под действием электрического или светового импульса. Наиболее ярко этот эффект проявляется в тройном составе $Ge_2Sb_2Te_5$. На основе этого эффекта созданы устройства энергонезависимой фазовой памяти типа PCM (Phase Change Memory) и оптические носители информации (CD, DVD, BluRay и др.). Для улучшения параметров записи информации и увеличения термостабильности таких устройств состав $Ge_2Sb_2Te_5$ подвергают структурной и примесной модификации.

Рассматриваемая диссертационная работа посвящена изучению структуры, оптических и электрических свойств тонких пленок состава $Ge_2Sb_2Te_5$, модифицированного примесью висмута.

Диссертационная работа выполнялась в рамках НИР по программе грантового финансирования фундаментальных исследований КН МОН РК по приоритету «Фундаментальные исследования в естественно-научной сфере» по темам №ГР 0215РК01347 (2015-2017 гг.) и №ГР 0118РК01188 (2018-2019 гг.).

2. **Научные результаты в рамках требований к диссертациям (пп.127, от 31.03.11г., Правила присуждения ученых степеней).**

Диссертация Толепова Ж.К. выполнена с использованием современных методов научных исследований. Она содержит экспериментально – исследовательские разделы по основным защищаемым положениям.

В диссертации отработана технология по получению модифицированных примесью висмута пленок состава $Ge_2Sb_2Te_5$ (GST) с использованием метода ионно-плазменного высокочастотного со-распыления GST и Bi. Изучена структура, оптические и электрические свойства, а также эффект переключения и памяти модифицированных пленок GST, и показана возможность управления основными электронными параметрами модифицированных пленок GST в широких пределах путем примесной модификации.

Основные результаты, полученные в ходе выполнения диссертации:

**Результат 1:** Установлены температуры фазового перехода «стекло-кристалл» ($T_c$) у пленок $Ge_2Sb_2Te_5$ и $Ge_2Sb_2Te_5$<Bi> полученных ионно-плазменным ВЧ распылением. Выявлено, что $T_c$ у не модифицированных пленок $Ge_2Sb_2Te_5$ составляет ~142°C, что значительно превышает $T_c$ пленок, полученных термическим испарением в вакууме, у которых $T_c$ составляет ~112°C. Модифицирование пленок $Ge_2Sb_2Te_5$ примесью Bi приводит к существенному увеличению $T_c$ до 216°C.

**Результат 2:** Из результатов рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) следует, что при увеличении концентрации примеси висмута от 2,7 ат.% до 15,9 ат.% в пленках a-$Ge_2Sb_2Te_5$<Bi> атомы висмута замещают атомы сурьмы и в структуре пленок не содержатся кластеры или наночастицы Bi.

**Результат 3:** Установлено существенное увеличение оптического контраста (ОС) в пленках $Ge_2Sb_2Te_5$<Bi>. Впервые выявлены оптимальные составы пленок с наибольшим значением ОС для лазерного излучения, применяемого для записи информации в оптических дисках. Для длины волны лазера 405 нм оптимальными концентрациями висмута в пленках $Ge_2Sb_2Te_5$ являются 2,8; 6,3 и 15,9 ат.%. При длине волны лазера 650 нм в пленках $Ge_2Sb_2Te_5$ с ростом концентрации висмута наблюдается практически линейное возрастание оптического контраста. При длине волны лазера 780 нм оптимальными концентрациями висмута в пленках являются 2,8; 9,2 и 15,9 ат.%.

**Результат 4:** Показано, что при концентрации примеси Bi в пленках $Ge_2Sb_2Te_5$<Bi>, равной 6,3 ат.%, параметры эффекта переключения и памяти имеют оптимальные значения: время переключения <30 нс, потребляемая мощность 9,5 мВт, т.е. эти пленки являются перспективным материалом для применения в ячейках энергонезависимой фазовой памяти. Уникальность этого состава связана с особенностью структуры, которая заключается в том, что примесные атомы висмута при концентрации 6,3 ат.%, образуют химическое соединение только с атомами теллура, как в аморфном, так и в кристаллическом состояниях.

## 3. Степень обоснованности и достоверности каждого научного результата (научного положения), выводов и заключения соискателя, сформулированных в диссертации.

Основные положения, выводы, практические рекомендации, полученные в диссертации, экспериментально и аналитически обоснованы, и подтверждены. Экспериментальная часть работы выполнена на высоком методическом уровне с использованием современных методов исследований, таких как рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, сканирующая электронная микроскопия, а также спектроскопия комбинационного рассеяния света. В диссертации проведено комплексное исследование по изучению структуры и электронных свойств модифицированных пленок $Ge_2Sb_2Te_5$.

Обоснованность и достоверность каждого научного результата (научного положения) подтверждается оригинальностью поставленных задач, объемом и статистикой экспериментальных данных и их анализом, и публикациями результатов исследований в международных научных изданиях.

**4. Степень новизны каждого научного результата (положения), вывода соискателя, сформулированных в диссертации.**

Диссертация посвящена комплексному исследованию модифицированных примесью висмута пленок $Ge_2Sb_2Te_5$ в аморфном и кристаллическом состояниях. Научная новизна работы состоит в том, что в ней впервые показано, что структура наноразмерных пленок $Ge_2Sb_2Te_5$<Bi>, полученных методом ионно-плазменного высокочастотного со-распыления, в диапазоне концентрации примеси Bi от 2,8 до 16 ат.% представляет собой аморфную матрицу, в которой отсутствует изолированные кристаллические нанокластеры висмута.

Впервые изучено спектральное распределение оптического контраста (ОС) в пленках $Ge_2Sb_2Te_5$<Bi>. Установлено, что в диапазоне видимого света величина ОС у пленок $Ge_2Sb_2Te_5$<Bi> существенно больше, чем у пленок без примеси. Впервые показано, что пленки $Ge_2Sb_2Te_5$<Bi 6,3 ат.%> характеризуются наибольшим ОС в спектральном диапазоне от 630 до 800 нм, а пленки $Ge_2Sb_2Te_5$<Bi 15,9 ат.%> - в диапазоне от 360 до 600 нм.

Изучено влияние примеси висмута на параметры эффекта переключения и памяти в тонких пленках $Ge_2Sb_2Te_5$<Bi>, полученных методом ионно-плазменного ВЧ распыления. Впервые показано, что оптимальными параметрами эффекта характеризуются пленки с концентрацией Bi, равной ~6,3 ат.%.

Проведены исследования по влиянию примеси Bi на электронные свойства наноразмерных пленок $Ge_2Sb_2Te_5$. Впервые показана возможность целенаправленного изменения основных полупроводниковых свойств и параметров эффекта переключения путем варьирования концентрации примеси Bi.

**5. Практическая и теоретическая значимость полученных результатов.**

Результаты, полученные в диссертации, могут быть использованы:

1) Для развития модельных представлений механизма легирования ХСП и теории эффекта переключения и памяти в модифицированных пленках GST.

2) Для эффективного управления электронными свойствами аморфных пленок составов $Ge_2Sb_2Te_5$ путем примесной модификации.

3) Для разработки энергонезависимых ячеек памяти нового поколения с улучшенными характеристиками и параметрами для хранения и записи информации и улучшения параметров оптических носителей информации таких, как CD-RW, DVD и Blu-Ray.

6. **Замечания, предложения по диссертации.**

Недостатки сводятся к следующему:

1. Одной из задач исследования, в числе прочих, указана отработка технологии получения пленок. Однако, в работе приведены лишь оптимальные параметры процесса распыления. Кроме того, указано (стр. 42), что пленки осаждали на подложки, «находящиеся при комнатной температуре». Тогда куда уходит тепло, приносимое плазменным потоком?

2. В работе проведены исследования структуры тонких пленок $Ge_2Sb_2Te_5$ и $Ge_2Sb_2Te_5$<Bi> методом комбинационного рассеяния света и приводятся «сильно» сглаженные спектры КРС пленок (подраздел 3.2). Такой подход приводит к потере части информации о тонкой структуре материала. Обычно в литературе спектры с таким сглаживанием не приводятся, целесообразно было бы привести исходные спектры.

3. При исследовании структуры пленок, а это одно из основных направлений исследования, не использован наиболее информативный, в этом случае, метод рентгеновской дифрактометрии, которая дополнила бы исследование структуры методом РФЭС. Сравнение параметров решеток $Ge_2Sb_2Te_5$ до и после допирования могло дать большую ясность о «замещении атомов Sb атомами Bi» и появлении фаз $Sb_2Te_3$ и $Bi_2Te_3$, а также проследить изменение структуры после лазерного облучения.

Сделанные замечания не снижают общее положительное впечатление от работы.

7. **Подтверждение достаточной полноты публикаций основных положений, результатов, выводов и заключения диссертации.**

По материалам диссертации опубликовано 15 печатных работах, в том числе 1 статья в журнале, входящем в базу данных Thomson Reuters и Scopus (IF=2,48; SJR=0,72, квартиль Q = 1), 7 публикации (включая 1 патент) в изданиях, рекомендуемых ККСОН, 6 в материалах международных конференций, из них 1, входящих в базу данных Thompson Reuters.

8. **Соответствие содержания диссертации в рамках требований Правил присуждения ученых степеней.**

В свете вышесказанного, считаю, что диссертационная работа Толепова Ж.К. по актуальности решаемых задач и качеству полученных результатов, по их научной и практической значимости, представляет собой серьезное научное исследование и удовлетворяет всем требованиям Комитета по контролю в сфере образования и науки МОН РК, предъявляемым к докторским (PhD) диссертациям, а ее автор вполне заслуживает присуждения ученой степени доктора философии (PhD) по специальности 6D071000 – «Материаловедение и технология новых материалов».

Рецензент:
доктор физико-математических
наук, зав. кафедрой Высшей
математики и физики

Б.А Алиев

подпись Алиева Б.А.
заверяю