

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 33.2.018.22

по диссертации Петрушина Юрия Александровича

«Исследование локального окружения атомов в аморфных и кристаллических плёнках $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$, $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, GeSb_2Te_4 и GeSb_4Te_7 методом мёссбауэровской спектроскопии»

ДИССЕРТАЦИОННЫЙ СОВЕТ ОТМЕЧАЕТ, ЧТО НА ОСНОВАНИИ ВЫПОЛНЕННЫХ СОИСКАТЕЛЕМ ИССЛЕДОВАНИЙ

- *разработана* методика исследования локальной атомной структуры тонкоплёночных материалов с фазовым переходом на основе теллуридов германия и сурьмы $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$, $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, GeSb_2Te_4 и GeSb_4Te_7 , основанная на применении абсорбционной и эмиссионной мёссбауэровской спектроскопии на четырёх изотопах-зондах (^{73}Ge , ^{119}Sn , ^{121}Sb , ^{125}Te), позволившая получить прямую информацию о валентном состоянии и локальной симметрии всех атомов, формирующих структурную матрицу аморфных и кристаллических плёнок;

- *предложена* интерпретация механизмов уширения мёссбауэровских спектров ^{119}Sn в аморфной фазе, основанная на совместном учёте квадрупольного расщепления, обусловленного искажением валентных углов sp^3 -связей $\text{Ge}(\text{Sn})\text{—Te}$, и неоднородного изомерного сдвига, вызванного флуктуациями межатомных расстояний;

- *доказана* универсальность установленных закономерностей для псевдобинарной системы $(\text{GeTe})_x(\text{Sb}_2\text{Te}_3)$ ($x = 0, 0,5, 1, 2, 3$): во всех исследованных составах кристаллизация аморфных плёнок сопровождается изменением координационного числа с тетраэдрического на октаэдрическое и валентного состояния атомов германия, тогда как локальное окружение атомов сурьмы и теллура остаётся неизменным и близким к таковому в эталонных соединениях Sb_2Te_3 и GeTe ;

- *введены* новые экспериментальные данные об антиструктурных дефектах в кристаллических плёнках $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, идентифицированных методом эмиссионной

мёссбауэровской спектроскопии на материнских изотопах ^{119}Sb и $^{119\text{m}}\text{Te}$, что позволило впервые описать состояние примесных центров $^{119\text{m}}\text{Sn}$, образующихся при распаде атомов в узлах сурьмы и теллура, как антиструктурных дефектов в соединениях системы GeSbTe .

Теоретическая значимость исследования обусловлена тем, что:

- *подтверждена* тетраэдрическая координация атомов германия в аморфных плёнках $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ путем измерений мёссбауэровских спектров на изотопе ^{73}Ge , изомерный сдвиг которых близок к изомерному сдвигу для монокристаллического германия с тетраэдрической системой связи;

- *подтверждено*, что фазовый переход «аморфное состояние – кристаллическое состояние» в плёнках GeSbTe сопровождается изменением валентного состояния и координационного числа атомов германия с четырёхвалентного тетраэдрического на двухвалентное октаэдрическое, тогда как локальная структура сурьмы и теллура остаётся неизменной;

- *проведен анализ* корреляционных соотношений между изомерными сдвигами мёссбауэровских спектров ^{73}Ge и ^{119}Sn в различных соединениях, позволившие оценить координационное и валентное состояния атомов германия в кристаллической фазе $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$;

- *усовершенствованы* представления о структурных механизмах фазовых переходов в материалах с фазовой памятью, заключающиеся в обосновании модели, согласно которой перестройка при кристаллизации затрагивает преимущественно подрешётку германия, тогда как матрица из сурьмы и теллура остаётся стабильной.

Значение полученных результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

- *определены* перспективы практического использования полученных результатов при разработке технологических режимов синтеза материалов на основе теллуридов германия и сурьмы для применения в устройствах

энергонезависимой фазовой памяти, а также для целенаправленного легирования РСМ-материалов с целью оптимизации их характеристик;

- **создана** база экспериментальных данных для построения адекватных моделей фазовых переходов в системе $\text{GeTe-Sb}_2\text{Te}_3$, учитывающих селективность структурной перестройки по отношению к различным атомным подрешёткам;

- **представлены** методические рекомендации по применению рентгенофлуоресцентного анализа для количественного определения состава тонких плёнок GeSbTe с учётом особенностей возбуждения характеристического излучения в тонких слоях, включая калибровочные зависимости для всех исследованных составов;

- **разработаны и внедрены** в учебный процесс при подготовке магистров по направлению 03.04.02 «Экспериментальная и теоретическая физика конденсированных сред и сложных систем» в Институте физики РГПУ им. А.И. Герцена методические подходы к исследованию локальной структуры тонкоплёночных халькогенидных материалов с использованием мёссбауэровской спектроскопии и рентгенофлуоресцентного анализа.

Достоверность результатов исследования обусловлена тем, что:

- результаты получены на сертифицированном оборудовании (мёссбауэровский спектрометр SM 4201 TerLab), обоснованы калибровки скоростной шкалы спектрометра по эталонным поглотителям, показана воспроизводимость результатов на серии независимо синтезированных образцов, приведены оценки погрешностей всех измеряемых параметров;

- **идея исследований базируется** на глубоком анализе литературных данных о локальной структуре материалов с фазовым переходом и на обобщении предшествующих мёссбауэровских исследований стеклообразных полупроводников;

- **установлено** качественное и количественное совпадение выводов, полученных для разных изотопных зондов (^{73}Ge , ^{119}Sn , ^{121}Sb , ^{125}Te), что

подтверждает взаимную согласованность результатов и исключает артефакты, связанные с использованием примесных зондов;

- **использованы** современные методики сбора и обработки исходной информации, включая математическое моделирование формы мёссбауэровских спектров с учётом гауссова распределения изомерных сдвигов, что позволило количественно оценить вклад неоднородного уширения в аморфной фазе.

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном участии на всех этапах исследования:

- непосредственном проведении мёссбауэровских измерений и обработки экспериментальных спектров;
- в использовании методики рентгенофлуоресцентного анализа для контроля состава плёнок;
- выполнении калибровочных измерений и расчётов корреляционных соотношений между изомерными сдвигами различных изотопов;
- обработке и интерпретации экспериментальных данных;
- подготовке основных публикаций по выполненной работе, включая написание и редактирование статей в рецензируемых журналах;
- представлении результатов на международных и всероссийских конференциях.

На основании представленных материалов диссертационной работы Петрушина Юрия Александровича можно заключить, что диссертация охватывает основные вопросы поставленной научной задачи и **соответствует критерию внутреннего единства**, что подтверждается:

- ✓ обоснованностью актуальности изучаемой проблемы – необходимостью установления структурных изменений в локальном окружении атомов германия, сурьмы и теллура при фазовом переходе «аморфное состояние – кристалл» в плёнках псевдобинарной системы $\text{GeTe-Sb}_2\text{Te}_3$, что имеет ключевое значение для понимания механизмов работы материалов с фазовой памятью (PCM);

- ✓ последовательным планом исследования, включающим контроль состава исследуемых пленок методом рентгенофлуоресцентного анализа, измерение и обработку мёссбауэровских спектров на изотопах ^{73}Ge , ^{119}Sn , ^{121}Sb и ^{125}Te в абсорбционном и эмиссионном вариантах, а также обсуждение полученных результатов;
- ✓ использованием актуальных исследовательских методик (абсорбционная и эмиссионная мёссбауэровская спектроскопия, рентгенофлуоресцентный анализ), реализованных на современном оборудовании (спектрометр CM 4201 TerLab, анализатор X-Арт М);
- ✓ аргументированностью и полнотой выводов, которые базируются на воспроизводимых экспериментальных данных, согласующихся с литературными данными, и позволяют развить представления о локальной структуре аморфных и кристаллических плёнок Ge–Sb–Te.

Диссертация Петрушина Юрия Александровича является самостоятельной завершённой научно-квалификационной работой, в которой на основе комплексного исследования локального окружения атомов германия, сурьмы и теллура в аморфных и кристаллических плёнках составов $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$, $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, GeSb_2Te_4 и GeSb_4Te_7 методами абсорбционной и эмиссионной мёссбауэровской спектроскопии с использованием изотопных зондов ^{73}Ge , ^{119}Sn , ^{121}Sb и ^{125}Te установлены закономерности изменения валентного состояния и координационного числа атомов германия, а также показана стабильность локального окружения атомов сурьмы и теллура в обеих фазах. Полученные экспериментальные результаты вносят существенный вклад в развитие представлений о структурных перестройках при фазовых переходах в халькогенидных материалах и создают научную основу для оптимизации технологии синтеза теллуридов германия и сурьмы, используемых в устройствах энергонезависимой фазовой памяти.

На заседании 10 сентября 2026 года диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация Петрушина Юрия Александровича

«Исследование локального окружения атомов в аморфных и кристаллических плёнках $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$, $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, GeSb_2Te_4 и GeSb_4Te_7 методом мёссбауэровской спектроскопии» представляет собой научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук (п.9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (в действующей редакции)), и принял решение присудить Петрушину Юрию Александровичу ученую степень кандидата физико-математических наук за решение научной задачи, имеющей значение для развития физики конденсированного состояния, а именно за установление закономерностей изменения локального атомного окружения в материалах системы $\text{GeTe-Sb}_2\text{Te}_3$ при фазовых переходах, что вносит существенный вклад в понимание природы быстрых и обратимых структурных превращений в материалах с фазовой памятью.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 13 человек, из них 10 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 15 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 11, против 2, недействительных бюллетеней 0.

Председатель
диссертационного совета

А. В. Колобов

Ученый секретарь
диссертационного совета

А. А. Кононов