

Отзыв

официального оппонента доктора физико-математических наук,
профессора **Семенова Валентина Георгиевича**
на диссертацию 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», представленной на соискание учёной степени кандидата
физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика
конденсированного состояния

Диссертационная работа Ю.А. Петрушина посвящена одной из
ключевых проблем современной физики конденсированного состояния –
установлению корреляции между локальной атомной структурой и
физическими свойствами функциональных материалов с фазовым
переходом (Phase Change Materials, *PCM*). Объекты исследования – сплавы
псевдобинарной системы $\text{GeTe-Sb}_2\text{Te}_3$ – находят широкое применение в
устройствах энергонезависимой фазовой памяти, однако отсутствие единого
понимания их локальной структуры, особенно в аморфном состоянии,
является серьёзным препятствием для направленного синтеза материалов с
улучшенными характеристиками. Именно поэтому комплексное
исследование этих соединений с использованием высокочувствительных
ядерно-физических методов является своевременным и актуальным.

Научная новизна результатов диссертации заключается, прежде всего,
в использовании уникального набора мёссбауэровских зондов, включая
редко применяемый изотоп ^{73}Ge , что позволило получить прямую
информацию о валентном состоянии и локальной симметрии каждого из
атомов, формирующих структурную матрицу материала. Впервые для всей
серии составов $(\text{GeTe})_x(\text{Sb}_2\text{Te}_3)$ ($x = 0,5, 1, 2, 3$) установлено, что при
кристаллизации аморфных плёнок координационное число германия
изменяется с четырёх (тетраэдрическое окружение) на шесть
(октаэдрическое), тогда как локальное окружение сурьмы и теллура остаётся
неизменным. Особого внимания заслуживает идентификация методом
эмиссионной мёссбауэровской спектроскопии антиструктурных дефектов
олова в кристаллической решётке $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, что является важным вкладом в
понимание дефектной структуры этих материалов.

Практическая значимость работы определяется возможностью
использования полученных результатов при разработке технологических
режимов синтеза тонкоплёночных материалов для приложений фазовой
памяти. Разработанные методики мёссбауэровской диагностики и
рентгенофлуоресцентного анализа тонких плёнок могут быть
экстраполированы на широкий класс халькогенидных систем.

**Степень обоснованности научных положений и достоверность
выводов** не вызывают сомнений. Автором применён комплекс современных

взаимодополняющих методов исследования: абсорбционная и эмиссионная мёссбауэровская спектроскопия на четырёх изотопах (^{73}Ge , ^{119}Sn , ^{121}Sb , ^{125}Te), рентгенофлуоресцентный анализ для контроля элементного состава, а также корректная математическая обработка спектральных данных. Воспроизводимость результатов на независимых образцах и их согласованность с литературными данными для родственных систем подтверждают надёжность сделанных заключений. Все измерения выполнены на сертифицированном оборудовании, погрешности параметров приведены и обоснованы.

Диссертация имеет классическую структуру и состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и списка публикаций автора.

Введение содержит чёткое обоснование актуальности, цели и задач исследования, а также положения, выносимые на защиту.

Первая глава представляет собой глубокий и содержательный обзор литературы, в котором автор критически анализирует эволюцию взглядов на структуру материалов GeSbTe – от модели «перевернутого зонтика» до современных данных аномального рентгеновского рассеяния. Такой анализ позволил диссертанту чётко сформулировать существующие противоречия и определить место собственного исследования.

Во второй главе детально описаны экспериментальные методики. Следует особо отметить корректный подход к контролю состава тонких плёнок методом рентгенофлуоресцентного анализа с учётом матричных эффектов и особенностей возбуждения тормозным излучением. Автором приведены калибровочные зависимости для определения содержания германия, сурьмы и теллура, что является важным методическим достижением. Детально прописаны процедуры синтеза мёссбауэровских источников и поглотителей, а также условия регистрации спектров.

Третья глава является центральной в диссертации. Здесь представлены результаты исследования локальной структуры плёнок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$. Регистрация мёссбауэровского спектра на изотопе ^{73}Ge только для аморфной плёнки при использовании источника на основе монокристаллического Ge представляет собой ключевой экспериментальный результат – он однозначно свидетельствует о тетраэдрической координации германия в аморфной фазе, аналогичной таковой в кристаллическом германии. Эмиссионные спектры на ядрах $^{119\text{m}}\text{Sn}$ позволили идентифицировать антиструктурные дефекты, что является уникальным достижением, не имеющим аналогов в литературе для данного класса материалов.

Четвёртая глава обобщает результаты на всю исследованную псевдобинарную систему. Автор убедительно демонстрирует, что обнаруженные закономерности – перестройка координации германия при сохранении окружения сурьмы и теллура – являются универсальными для всех составов ($\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$, $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, GeSb_2Te_4 , GeSb_4Te_7). Важным теоретическим вкладом является анализ механизмов уширения

мёссбауэровских линий в аморфной фазе с количественной оценкой вкладов искажения валентных углов и флуктуаций межатомных расстояний.

В заключении сформулированы основные выводы, каждый из которых является прямым ответом на поставленные задачи.

Личный вклад соискателя является определяющим: автор принимал непосредственное участие в синтезе образцов, проведении мёссбауэровских измерений, обработке и интерпретации результатов. По теме диссертации опубликовано 16 печатных работ, из которых 10 статей в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК, а также индексируемых в базах Web of Science и Scopus. Автореферат полно и адекватно отражает содержание диссертации.

Вместе с тем, к работе можно сделать следующие **замечания**:

1. В разделе 3.5.3 (стр. 90-91) при обсуждении корреляции изомерных сдвигов ^{73}Ge и ^{119}Sn автор использует неоднозначные литературные данные о знаке изомерного сдвига ^{73}Ge в кремнии, что приводит к возможности выбора между двумя калибровочными соотношениями. Хотя для основной цели работы это не является критичным, хотелось бы видеть более чёткое обоснование выбранного знака или дополнительные аргументы в пользу одного из вариантов.
2. В четвёртой главе при анализе спектров ^{125}Te используется разложение на две компоненты, соответствующие структурным единицам GeTe и Sb_2Te_3 . Однако из литературных данных известно, что в сложных соединениях GeSbTe могут существовать промежуточные конфигурации атомов теллура с различным ближайшим окружением (Sb-Te-Sb , Sb-Te-Ge , Ge-Te-Te). Упрощённое разложение, вероятно, является достаточным для задач работы, но требует дополнительного обоснования.
3. В работе не обсуждается влияние способа получения плёнок (магнетронное распыление) на их локальную структуру по сравнению с лазерной аморфизацией. Из литературного обзора следует, что эти структуры могут различаться, поэтому следовало бы либо провести сравнительное исследование, либо чётко аргументировать, почему осаждённые плёнки являются адекватной моделью для *PCM*-материалов.
4. В работе отсутствует обсуждение возможного влияния напряжений, возникающих при кристаллизации тонких плёнок на подложках, на параметры локальной структуры. Известно, что механические напряжения могут приводить к искажению координационных полиэдров, что могло бы проявиться в уширении мёссбауэровских линий.

Высказанные замечания носят дискуссионный и рекомендательный характер и не затрагивают основных научных результатов работы.

Диссертация Ю.А. Петрушина является **завершённым научным исследованием**, выполненным на высоком методическом уровне, в котором решена важная научная задача – установление закономерностей изменения локального атомного окружения в материалах системы $\text{GeTe-Sb}_2\text{Te}_3$ при фазовых переходах. Полученные результаты имеют фундаментальное значение для физики конденсированного состояния и прикладных разработок в области фазовой памяти.

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 , GeSb_4Te_7 методом мёссбауэровской спектроскопии» соответствует критериям, установленным пп. 9–14 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г., предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Петрушин Юрий Александрович, заслуживает присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Доктор физико-математических наук,
профессор, начальник лаборатории
мёссбауэровской спектроскопии
АО «РИТВЕРЦ»
Семенов Валентин Георгиевич



Дата: « 06 » июля 2026 г.

Контактные данные:

АО «РИТВЕРЦ»,

Адрес: 194223, Санкт-Петербург, ул. Курчатова, д. 10

Тел.: +7 951 684-15-37

E-mail: val_sem@mail.ru

Web-сайт: <https://ritverc.com/ru>

Подпись В.Г. Семенова удостоверяю:

Руководитель службы

по управлению персоналом АО «РИТВЕРЦ»



/Васнева Н.В./