



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ АНАЛИТИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ул. Ивана Черных, 31-33, лит. А, Санкт-Петербург, 198095, а/я 140, тел.: (812) 363-07-19, факс: (812) 363-07-20
ОКПО 04699534, ОГРН 1027810289980, ИНН 7809003600, КПП 780501001, e-mail: iap@ianin.spb.su, www.iainas.ru

УТВЕРЖДАЮ

Директор

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института аналитического приборостроения Российской академии наук
Доктор технических наук

/А.А. Евстапов/

« 8 » _____ 2026 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации **Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института аналитического приборостроения Российской академии наук** на диссертацию
**Петрушина Юрия Александровича «Исследование локального окружения атомов в
аморфных и кристаллических плёнках GeSb_2Te_6 , $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, GeSb_2Te_4 и GeSb_4Te_7
методом мёссбауэровской спектроскопии», представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности**

1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Диссертационная работа Петрушина Юрия Александровича посвящена актуальной фундаментальной проблеме физики конденсированного состояния — установлению взаимосвязи между локальной атомной структурой и электронным состоянием компонентов в неупорядоченных и кристаллических системах на примере перспективных фазово-переключаемых халькогенидных материалов (Ge-Sb-Te). Эти материалы демонстрируют уникальное физическое явление — сверхбыстрый и обратимый переход между аморфным (диэлектрическим) и кристаллическим (проводящим) состояниями, лежащее в основе функционирования устройств энергонезависимой фазовой памяти (PCM) и перезаписываемых оптических носителей. Фундаментальный вопрос о природе этого перехода — является ли он следствием изменения координационного числа и гибридизации химических связей отдельных атомов — остаётся открытым, что определяет высокую значимость диссертационного исследования для развития физики ковалентно-связанных полупроводников и физики структурных фазовых переходов в неупорядоченных средах.

Актуальность избранной темы

Актуальность диссертационной работы не вызывает сомнений. Исследования локальной структуры материалов с фазовым переходом на основе тройной системы Ge-Sb-Te имеют

фундаментальное и прикладное значение для разработки нового поколения энергонезависимых запоминающих устройств. Отсутствие единого понимания структурных трансформаций, особенно для аморфной фазы состава $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_3$ (GST), требует применения высокочувствительных методик, способных дать информацию о локальном окружении каждого из атомов-компонентов. Метод мёссбауэровской спектроскопии, примененный в работе, является именно таким инструментом, позволяющим, в отличие от усредненных дифракционных методов, получать уникальные данные о валентном состоянии и симметрии локального окружения конкретных ядер-зондов. Работа вносит существенный вклад в решение фундаментальной проблемы физики неупорядоченных систем — установление корреляции между локальной структурой и макроскопическими свойствами материалов с фазовым переходом.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, их достоверность и новизна

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, являются обоснованными и достоверными. Это обеспечено:

1. **Комплексным подходом к исследованию**, включающим применение как абсорбционной, так и эмиссионной мёссбауэровской спектроскопии на четырех различных изотопах (^{73}Ge , ^{119}Sn , ^{121}Sb , ^{125}Te), что позволило получить взаимодополняющую информацию о локальной структуре всех компонентов сплавов.
2. **Тщательным контролем состава образцов** с помощью рентгенофлуоресцентного анализа, обеспечивающим корректность сопоставления мёссбауэровских параметров с конкретным химическим составом.
3. **Воспроизводимостью результатов** и их согласованностью между собой (данные на ^{119}Sn и ^{73}Ge), а также с литературными данными, полученными методами EXAFS и XANES, что подтверждает надежность сделанных выводов.
4. **Использованием эталонных соединений** (Sb_2Te_3 , GeTe , SnTe и др.) для калибровки параметров мёссбауэровских спектров и корректной идентификации валентных состояний и типов локальной симметрии.
5. **Строгой физической интерпретацией параметров сверхтонких взаимодействий.** Изомерный сдвиг анализируется в рамках модели электронной плотности на ядре и коррелируется с заселённостью валентных s- и p-орбиталей (конфигурации $5s^{10}1p^{3103}$ и др.), что позволяет количественно оценить характер химической связи (долю ионности, эффективный заряд атома). Квадрупольное расщепление рассматривается как следствие нарушения кубической симметрии локального окружения, что даёт информацию об искажениях валентных углов в тетраэдрической координации и неоднородности межатомных расстояний.

Диссертация содержит следующие новые научные результаты, имеющие фундаментальное значение для физики конденсированного состояния:

1. Впервые на основе данных абсорбционной мёссбауэровской спектроскопии на примесном зонде ^{119}Sn для широкого ряда составов $(\text{GeTe})_x(\text{Sb}_2\text{Te}_3)$ ($x = 0,5, 1, 2, 3$) установлено, что атомы германия (и изовалентно замещающего его атомы олова) в аморфных плёнках формируют sp^3 -тетраэдрическую систему химических связей с координационным числом 4, а их ближайшее окружение преимущественно образовано атомами теллура. В кристаллической фазе атомы германия и олова стабилизируются в дефектных (сильно искаженных) октаэдрах, также образованных атомами теллура. Показано, что фазовый переход «аморфное состояние – кристаллическое» сопровождается изменением как валентного состояния, так и координационного числа атомов германия и олова.
2. Впервые с помощью абсорбционной мёссбауэровской спектроскопии на изотопах ^{73}Ge , ^{121}Sb и ^{125}Te , являющихся структурными элементами матрицы кристаллических и аморфных плёнок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, получена информация о валентном состоянии и локальной симметрии атомов германия, сурьмы и теллура. Продемонстрирована тетраэдрическая симметрия окружения атомов германия в аморфных плёнках и октаэдрическая – в кристаллических. Показана неизменность локального окружения атомов сурьмы и теллура при кристаллизации; их локальная структура близка к таковой в эталонных соединениях Sb_2Te_3 и GeTe соответственно, что подтверждено для всех составов псевдобинарной линии.
3. Методом эмиссионной мёссбауэровской спектроскопии на материнских изотопах-зондах $^{119\text{m}}\text{Sn}$, образовавшихся при распаде ^{119}Sb (в узлах сурьмы) и $^{119\text{m}}\text{Te}$ (в узлах теллура), впервые исследованы валентное состояние, электронная структура и локальная симметрия атомов олова во всех узлах кристаллических плёнок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$. В случае зондов $^{119\text{m}}\text{Sn}$, возникших из материнских атомов $^{119\text{m}}\text{Te}$, идентифицированы антиструктурные дефекты олова, смещённые в соседние подрешётки из-за эффекта отдачи при ядерном превращении, что представляет собой модельную систему для изучения дефектов такого типа.

Положения и выводы, представленные в работе, обоснованы и подтверждены экспериментальным материалом.

Полученные в ходе выполнения работы результаты могут быть использованы в следующих организациях: Институте химии СПбГУ, Химическом факультете МГУ, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Институте физики микроструктур РАН, Институте физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН и др.

Вопросы и замечания по диссертационной работе

По диссертационной работе можно высказать следующие вопросы и замечания:

1. В диссертации для исследования локального окружения атомов германия в плёнках $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ последовательно использованы два подхода: абсорбционная мёссбауэровская спектроскопия на примесном зонде ^{119}Sn , изовалентно замещающем

Ge, и прямые измерения на изотопе ^{73}Ge . Оба метода, согласно выводам автора, приводят к согласующимся результатам о тетраэдрической симметрии окружения Ge в аморфной фазе. Не является ли в таком случае использование оловянного зонда избыточным, и какова, с точки зрения автора, методологическая роль каждого из этих двух методов в получении конечных выводов о структуре материала?

2. При обсуждении причин уширения спектров ^{119}Sn в аморфной фазе авторы рассматривают два механизма: квадрупольное расщепление и неоднородный изомерный сдвиг. Можно было бы попытаться оценить доминирующий вклад одного из этих механизмов, сравнив ширины линий для изотопов с разными квадрупольными моментами (например, ^{119}Sn и ^{121}Sb). Проводился ли подобный анализ?
3. В диссертации представлены детальные данные по уширению спектров, но не приведены оценки параметра асимметрии η для квадрупольного расщепления. Связано ли это с его малой величиной, или с методическими трудностями его определения для аморфных материалов?

Указанные замечания и вопросы не являются принципиальными и не снижают научной значимости и высокой оценки диссертационной работы. Они носят характер дискуссионных и могут быть полезны для дальнейших исследований.

Заключение о соответствии диссертации критериям Положения о присуждении ученых степеней.

Диссертация Петрушина Юрия Александровича является завершенной научно-квалификационной работой. В ней на основании проведенных автором комплексных экспериментальных исследований получены новые научные результаты, имеющие существенное значение для физики конденсированного состояния, в частности, для понимания структурных механизмов фазовых переходов в халькогенидных полупроводниках. Работа обладает внутренним единством, все результаты логически связаны между собой и подчинены единой цели. Исследование выполнено самостоятельно на высоком методическом уровне. Личный вклад автора в разработку проблемы является определяющим: им синтезированы образцы, проведены мёссбауэровские измерения и их математическая обработка, выполнен анализ и интерпретация полученных данных. Новизна и актуальность результатов не вызывают сомнений, убедительность и достоверность научных выводов обеспечена применением комплекса взаимодополняющих методов.

Теоретическая и практическая значимость основных результатов диссертации заключается в углублении представлений о природе фазовых переходов в материалах РСМ, а также в возможности использования полученных данных для оптимизации технологий синтеза материалов с заданными свойствами. Основные результаты в достаточной степени отражены в 10 статьях, опубликованных в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК

РФ и индексируемых в базах Web of Science и Scopus, а также в материалах международных и всероссийских конференций.

Таким образом, диссертационная работа 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» полностью соответствует критериям пп. 9–14 Положения о присуждении ученых степеней (утв. Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г.), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Петрушин Юрий Александрович, безусловно заслуживает присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Отзыв составлен доктором физико-математических наук, Панчуком Виталием Владимировичем, старшим научным сотрудником лаборатории сканирующей зондовой микроскопии и спектроскопии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института аналитического приборостроения Российской академии наук.

Доклад соискателя Петрушина Юрия Александровича и отзыв рассмотрены и обсуждены на заседании объединенного научного семинара ИАП РАН (лаборатория сканирующей зондовой микроскопии и спектроскопии, лаборатория оптики заряженных частиц и математического моделирования, лаборатория методов и приборов иммунного и генетического анализа, лаборатория биомедицинской масс-спектрометрии, лаборатория приборов и методов эпитаксиальных нанотехнологий) протокол № 7 от «29» июня 2026 г.

Старший научный сотрудник,

д.ф.-м.н. Панчук / Панчук В.В. /

Уч.-к. Панчук

Подпись руки Панчука В.В. удостоверяю

Мванова

