

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н., проф. Лачинова Алексея Николаевича на диссертацию Юшкова Антона Александровича «Исследование структуры тонких пленок типа A^V-B^{VI} и сульфидных нанопорошков методами электронной микроскопии», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Актуальность. Диссертационная работа Юшкова Антона Александровича посвящена исследованию структуры тонких халькогенидных пленок и наночастиц халькогенидных порошков.

Эти классы материалов находят сегодня широкое практическое применение. Халькогенидные пленки используются для изготовления термоэлектрических элементов, модулей энергонезависимой памяти, датчиков и т.д. Более того ряд подобных материалов демонстрирует свойства топологических изоляторов и сверхпроводников. Халькогенидные (сульфидные) нанопорошки играют роль фотокатализаторов в фотоэлектрохимии, квантовых точек в задачах альтернативной энергетики. При этом многие применения базируются на трансформации структуры в тонких пленках вида аморфная – кристаллическая и наоборот в результате внешних воздействий. В связи с этим поиск, создание и исследование закономерностей взаимосвязи «структура-свойства» в новых пленочных структурах этого класса представляет собой колоссальный фундаментальный и практический интерес.

В связи с этим тема исследования и выбор объектов исследования являются чрезвычайно актуальными.

Целью работы. Основной целью работы явилось установление закономерностей зарождения и роста кристаллической фазы в тонких аморфных пленках типа A^V-B^{VI} (Bi-Te, Sb-Te, Sb-Se, Ge-Sb-Te, Sb, Bi), полученных методами термического и химического осаждения,

магнетронного напыления, включая одновременный нагрев и облучение тонких пленок электронным пучком.

Научная новизна диссертации. Получены и систематизированы новые экспериментальные данные по кристаллизации исходно аморфных тонких пленок типа A^V-B^{VI} , таких как Sb, Bi, Sb-Te, Bi-Te, Sb-Se, Ge-Sb-Te и определены структурно-морфологические зависимости, фазового состава и преобладающих кристаллографических ориентировок.

Практическая значимость результатов заключается в адаптации известных методов для достижения поставленных в диссертации задач и получения: нанопорошков сульфида свинца, сульфида кадмия, методом химической конденсации в виде водного коллоидного раствора; тонких пленок систем Sb-Te, Sb-Se, сурьмы, Bi_2Te_3 и других методом термического вакуумного напыления с использованием и без системы масок как однородных по толщине, так с определенным градиентом. При этом представлена возможность контролируемого создания кристаллических микро- и наноструктур в тонких аморфных пленках посредством наблюдаемого в реальном времени воздействия электронного пучка ПЭМ.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 140 страниц, 87 рисунков, 4 таблицы (а также рисунки и таблицы в Приложении); список литературы состоит из 80 наименований.

Во введении обоснованы актуальность работы, указаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен краткий обзор современного состояния исследуемой проблемы в области исследований тонкопленочных аморфно-кристаллических материалов и сульфидных нанопорошков. В этом разделе диссертации основное внимание сосредоточено на обосновании выбора объектов и методов исследований, а также способов получения тонкопленочных образцов.

Во второй главе приводятся оценки искривления кристаллической решетки в пленках висмута, сурьмы и соединений на их основе. Оценка дана на основе измерений по методу изгибных контуров. Метод расширен применительно к имеющимся в образцах центрам кристаллизации и градиентам толщины. Также произведен расчет электронограмм, согласно которым установлены фазовый состав и кристаллографические ориентировки в образцах.

Выявленное искривление решетки кристаллов в образцах достигает сотен град/мкм. Показаны основные тенденции спонтанной кристаллизации: распространение кристаллизации из областей наибольшей толщины образца в области наименьшей толщины; видима зависимость определяемой кристаллической фазы образца от толщины; наблюдаемая зависимость степени дефектности кристаллов от толщины пленки (обычно наибольшая дефектность наблюдается вблизи центров кристаллизации).

В третьей главе приведены результаты исследований морфологии и кристаллической структуры сульфидных нанопорошков: CdS, PbS, ZnS. Образцы получены методом химического осаждения. С использованием методов электронной дифракции, и прямым способом, через измерения на снимках высокого разрешения, проведен анализ кристаллических фаз в образцах. Так же рассмотрены и классифицированы характерные часто встречающиеся в частицах дефекты решетки. Особый интерес представляют так называемые «янус-частицы» с дефектом интерфейса, разделяющим фазы.

Четвертая глава посвящена экспериментам по вынужденной кристаллизации образцов пленок, рассмотренных в первой главе, а так же пленок Sb₂Te и GST225. В качестве факторов воздействия был использован электронный пучок непосредственно в колонне микроскопа, и вакуумный термический отжиг (для образцов Sb₂Te). Были выявлены как общие тенденции вынужденной и спонтанной кристаллизации пленок, так и различия между ними. И вынужденная, и спонтанная кристаллизация распространяются из отдельных существующих или возникающих центров. Для термической и

спонтанной кристаллизации более характерен механизм роста монокристаллов. Для кристаллизации электронным пучком более характерен нуклеационный механизм, с формированием мелкокристаллических областей. Нуклеация усиливается и в наиболее тонких пленках при повышении температуры отжига. Показано наличие критической минимальной толщины пленки образца для спонтанной кристаллизации.

Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений, так как основана на применении современного сертифицированного исследовательского оборудования, известных, адаптированных в лабораториях мира методах интерпретации результатов, и использовании для контроля аттестованных образцов.

Основные результаты и выводы отражают достижение поставленной цели и задач. При большом объеме экспериментальных результатов очень важным представляется наличие выводов в конце каждой главы, что позволяет читателю работы легче систематизировать представленные экспериментальные результаты.

Вопросы и замечания:

1. В мире существует колоссальный интерес к тому типу пленочных структур, которые соискатель выбрал в качестве объектов экспериментального исследования. Очевидно, что и объем научной литературы также велик. Однако соискатель ограничился достаточно сухим изложением современного состояния и почти не затронул теоретических аспектов предшествовавших исследований.
2. В методической части работы не в полной мере раскрыты методы получения объектов исследования. Часто соискатель ограничивается описанием общего характера.
3. Мало конкретной информации о толщинах образцов и методах ее контроля. Часто встречается фраза «от нескольких нанометров до десятков и более». Этого явно недостаточно. Тем более, что в части создания и

исследования «градиентных» образцов влияние толщины на трансформацию аморфно-кристаллической структуры ярко проявилось.

4. Во введении и первой главе говорится о существенном влиянии аморфно-кристаллического состояния и соотношения этих фаз между собой на физические свойства тонкопленочного материала в связи с чем, хотелось бы увидеть подтверждение этой взаимосвязи в синтезированных и исследованных пленках.

5. По ходу изложения диссертации каждая из глав содержит большое количество выводов. «Заключение» подтверждает факт достижения поставленной цели и решения задач диссертации. Тем не менее, важно было бы ввести еще один раздел в диссертационную работу, который бы содержал основные обобщающие результаты выводы.

6. Диссертация оформлена хорошо, написана грамотно, однако было бы уместно отдельно выписать все используемые аббревиатуры типа ИК, ЭДС, ЭГ, ЗОК, СЭМ, ПЭМ, ВРЭМ и т.п. Это облегчило бы чтение материала.

Несмотря на выявленные замечания и вопросы, диссертация выполнена на высоком профессиональном уровне, который подтверждается публикацией результатов исследования в большом количестве изданий. Результаты также были многократно апробированы на различных конференциях.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует формуле специальности, п.1, п.2 и п.3 паспорта специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния.

Заключение. Диссертационная работа представляет собой законченное научно-квалификационное исследование и отвечает п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней» в УрФУ. Автор диссертации, Юшков Антон Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния.

физико-математических наук по специальности 1.3.8 – физика
конденсированного состояния.

Доктор физико-математических наук, профессор,
главный научный сотрудник, заведующий
лабораторией электроники наносистем,
Института физики молекул и кристаллов
Уфимского федерального
исследовательского центра РАН



А.Н.Лачинов

04.09.2022

450054, г. Уфа, пр.Октября, 71

Институт физики молекул и кристаллов – обособленное структурное
подразделение ФГБУН Уфимского федерального исследовательского центра
Российской академии наук

тел.: +7(347) 292-14-17

E-mail: lachinov_a@mail.ru

Подпись Лачинова Алексея Николаевича удостоверяю:
Ученый секретарь ИФМК УФИЦ РАН



А.А.Бунаков