

## ОТЗЫВ

официального оппонента Шерстюк Наталии Эдуардовны  
на диссертационную работу Старицына Михаила Владимировича на тему  
«Микроструктура и полярные свойства сферолитовых тонких пленок цирконата-  
титаната свинца», представленную на соискание ученой степени  
кандидата физико–математических наук  
по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Диссертационная работа М.В. Старицына посвящена комплексному исследованию физических механизмов кристаллизации перовскитной фазы в тонких пленках цирконата-титаната свинца (ЦТС) с составами, соответствующими области морфотропной границы, при различных технологических режимах осаждения на технологически значимых подложках кремния и ситалла. ЦТС известен, прежде всего, как перспективный материал для разработки сегнетоэлектрических элементов памяти (FeRAM) благодаря высокому значению остаточной поляризации. Современное применение тонких и, в частности, наноразмерных пленок ЦТС несколько шире и охватывает широкий спектр пьезоэлектрических и сенсорных приложений, в которых ключевую роль играют тонкопленочные гетероструктуры ЦТС/полупроводник и ЦТС/проводник. Например, показаны хорошие перспективы использования гетероструктур ЦТС/полупроводник для устройств гигагерцевого диапазона, что важно для систем связи нового поколения 5G. В этом случае эффекты и структурные особенности, возникающие на границе раздела ЦТС с другими материалами, имеют большое значение, т.к. прямая интеграция ЦТС на некоторые технологически значимые подложки затруднена из-за несоответствия коэффициентов теплового расширения и образования нежелательной фазы пироклора. Переход к наноразмерным тонким пленкам и композитам на основе ЦТС вызывает ряд проблем, связанных с неоднородным распределением диэлектрических констант в результате осаждения пленки и др.

Объектом изучения в работе М.В. Старицына являются сферолитовые микроструктуры ЦТС, обладающие особой радиально-лучистой структурой. Несмотря на то, что эти структуры исследуются достаточно давно, условия и физические механизмы их формирования представляют интерес для функциональных элементов микромеханики и устройств на поверхностных

акустических волнах. Следует отметить, что структура подобных образований достаточно сложна для описания и интерпретации, поэтому предложенные М.В. Старицыным методики и практические подходы могут быть полезны и для других аналогичных структур, упомянутых в работе.

В этой связи диссертационная работа М.В. Старицына является актуальной и представляющей интерес не только с фундаментальной, но и прикладной точки зрения.

**Научная новизна** диссертационной работы состоит, в первую очередь, в получении новых знаний о процессах и эффектах, возникающих на границе сегнетоэлектрических тонких пленок с проводящими и полупроводниковыми материалами. Несмотря на то, что сами по себе эти структуры рассматриваются не впервые, в диссертационной работе получены новые фундаментальные результаты, имеющие значение для проектирования устройств на основе низкоразмерных сегнетоэлектрических пленок и моделирования их функциональных параметров.

**Обоснованность и достоверность** полученных результатов подтверждается согласованием полученных экспериментальных данных с результатами расчетов и моделирования, высокой воспроизводимостью измерений, использованием апробированных методик, соответствующих мировому уровню, а также современного научного оборудования, обеспечивающего необходимую точность измерений. Автор использует дополняющие друг друга методики, основанные на разных физических принципах, что подтверждает обоснованность предложенных методов и подходов.

Оценивая работу в целом, можно отметить существенный личный вклад автора на всех этапах исследования, а также значительный объем обработанных данных. Результаты диссертационной работы изложены в 7 публикациях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России, и 5 статей в журналах, индексируемых в международных базах данных WoS и/или Scopus. Публикации достаточно полно отражают основные результаты диссертационного исследования.

Содержание автореферата соответствует предъявляемым требованиям и достаточно полно отражает положения, выносимые на защиту.

Вместе с несомненными достоинствами диссертации, к которым, в том числе, следует отнести подробный и тщательный разбор результатов главы 3, связанных с описанием микроструктуры сферолитовых образований, представленные результаты вызывают некоторые **вопросы и замечания**.

1. Для 1-го защищаемого положения автор, на мой взгляд, выбрал крайне неудачную формулировку, которая привела, в итоге, к искажению смысла защищаемого положения. В такой формулировке остается неясным, что именно выносится на защиту. Кристаллизация перовскитной фазы обычно (не только в условиях данного эксперимента) производится путем высокотемпературного отжига, поэтому сделанное утверждение в такой формулировке выглядит очевидным и в защите не нуждается. Здесь следует отметить, что при обсуждении полученных результатов в разделе «Заключение» соискатель представляет необходимую расшифровку, которая, на мой взгляд, полностью отражает защищаемое положение и находится существенно ближе к его сути.

2. В главе 4 соискатель упоминает исследования диэлектрических свойств сферолитовых микроструктур методом генерации второй оптической гармоники (ГВГ), однако не приводит хотя бы небольшого теоретического введения, которое представило бы фундаментальные принципы, на которых основаны заключения о распределении поляризации в пределах сферолита по результатам картирования ГВГ, а сделанные соискателем выводы имеют констатирующий характер. Для неспециалиста в этой области интерпретация результатов, показанных на рис. 4.8 и 4.9, затруднена. В тексте диссертации для этой цели приводится ссылка на работу 115, где представлены принципы нелинейно-оптической микроскопии, но отсутствует прямое описание зависимости интенсивности ВГ от поляризации сегнетоэлектрика. Такое упущение тем более досадно, что достаточно подробная детализация этой зависимости представлена в работе 2 из Списка основных публикаций соискателя по теме диссертации (стр. 107).

3. В главе 4 соискатель приводит результаты исследования вертикального пьезоотклика предварительно поляризованных блочных сферолитовых структур (рис. 4.5 и 4.6) и латерального пьезоотклика одиночного сферолита (сферолитовых островков) (рис. 4.10). Из работы не ясно, были ли проведены исследования других

компонент пьезоотклика (латеральной и вертикальной, соответственно) для этих структур и каковы их результаты.

4. Судя по данным рис. 4.6, структурная неоднородность практически не влияет на способность блочных сферолитовых структур поляризоваться внешним полем, перпендикулярным к поверхности. Были ли проведены аналогичные исследования для островковых сферолитовых структур? Были ли получены КМ-изображения поверхностного потенциала для блочных сферолитовых структур?

5. На основании представленных исследований, на мой взгляд, остается неясным потенциал практического применения исследованных сферолитовых структур. Если наличие сферолитов в пленке дает технологические и/или функциональные преимущества, то стоило бы их обсудить с учетом полученных данных об их структуре. Если таких преимуществ нет, то, вероятно, стоило бы представить условия, при которых можно избежать их образования.

6. К сожалению, работа не лишена определенного числа опечаток и стилистических неточностей. Например, в подписи к рисункам 4.3 и 4.4 отсутствуют пояснения, чем отличаются кривые 1 и 2. Такое пояснение дается двумя страницами раньше, но в подписи к этим рисункам оно также было бы очень уместно. На рис. 4.3, 4.4 и 4.7 экспериментальные значения соединены линиями, форма которых не обоснована. Возможно, это сделано для удобства восприятия, но, во-первых, это требует пояснения в подписи к рисункам, а во-вторых, выбранный способ визуализации, наоборот, затрудняет понимание.

Сделанные замечания, тем не менее, не снижают общего положительного впечатления о представленной диссертационной работе. В целом, работа выполнена на достаточно высоком научном уровне, достоверность полученных экспериментальных результатов, проведенные оценки и сделанные на их основе заключения не вызывают сомнений. Несмотря на то, что оценка возможности практического применения сферолитовых структур затруднена, данные диссертационного исследования несут важную информацию для разработчиков устройств на основе тонких пленок ЦТС.

Работа представляет собой законченное научное исследование и соответствует квалификационному уровню работ на соискание ученой степени кандидата наук.

