

«УТВЕРЖДАЮ»



Проректор по науке и инновациям
НИТУ «МИСиС»

М.Р. Филонов

7 сентября 2018 года

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Муслимова Арсена Эмирбеговича **«Управляемая перестройка поверхности кристаллических подложек для формирования эпитаксиальных наноструктур»**, представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.18 – «Кристаллография, физика кристаллов».

Диссертация Муслимова А.Э. посвящена обнаружению и обоснованию закономерностей твердофазных превращений в приповерхностных слоях кристаллов различной структуры и химического состава (сапфир, пентаоксид ванадия, карбид кремния) в процессе отжига в различных средах и изучению возможности управления ими при использовании в качестве подложек для эпитаксиального наращивания наносистем с заданными свойствами.

В последние годы нанотехнологии рассматривались в качестве основного прорывного направления в сфере создания устройств определяющих все важные сферы деятельности человека, в частности, как основа стратегии создания компьютеров пятого поколения. Все предыдущие поколения совершенствовались за счёт увеличения количества элементов на единицу площади. Как оказалось, дальнейшая миниатюризация ограничивается непреодолимыми на данном этапе, технологическими проблемами. Создавшаяся ситуация заставляет ученых искать новые пути решения. Предлагаемые на сегодняшний день технологии, такие как аддитивные технологии сборки, либо самосборки чипов из отдельных атомов и кластеров, а также использование технологии электронной литографии если и доступно, то экономически нецелесообразно. Речь идет о массовом производстве, предполагающем серьезные затраты на каждом этапе технологического цикла без особых перспектив удешевления производственного процесса, которое не оправдывает инвестиции в такое производство. В представленной диссертации предлагается альтернативный путь управления структурой приповерхностных слоев, с учетом таких фундаментальных аспектов как кристаллографическая анизотропия и особенности химической природы кристаллов. Данная методика может быть реализована как на небольших площадях, так и масштабироваться на 2-х, 3-х дюймовые образцы, при условии однородности состава и структуры. Основным ограничением является необходимость привязки к

кристаллической структуре материалов, что определяет дискретность топографических параметров поверхности.

Основными результатами работы можно считать обоснование закономерностей морфологической перестройки поверхности сапфира в зависимости от внешних воздействий, ориентации (A, C, R) сапфира, величины заданного отклонения вицинальной поверхности от сингулярной грани. В работе также исследовано ориентирующее влияние особенностей морфологии и заряда поверхности сапфира на процессы формирования наращиваемых пленок. Диссертантом изучены особенности физических свойств металлических, полупроводниковых, сегнетоэлектрических, магнитных пленок на подложках сапфира, полученных методом твердофазного синтеза и выявлены зависимости этих свойств от условий получения, структурного совершенства и эпитаксиальных напряжений. Для кристаллов оксидов переходных металлов, на примере пентаоксида ванадия охарактеризованы процессы твердофазных превращений в приповерхностных слоях в зависимости от условий отжига. Изучены процессы твердофазных превращений в приповерхностных слоях кристаллов карбида кремния в результате вакуумного отжига и формирования композитных структур на основе железа и графеновых слоев.

На наш взгляд, **научная новизна** диссертации заключается в следующем:

1. Диссертанту впервые удалось визуализировать морфологию поверхности на промежуточных этапах твердофазной рекристаллизации приповерхностных слоев подложек сапфира. Это безусловно добавило новые знания о процессах происходящих на поверхности при высокотемпературной обработке. Также диссертантом впервые проанализирована связь морфологии поверхности и особенностей эволюции наноструктуры поверхности с кристаллографической анизотропией, энергией граней кристалла сапфира.

2. В представленной диссертации впервые предложен способ целенаправленного модифицирования электрофизических свойств поверхности подложек сапфира допированием поверхностного слоя оксидом титана. Несмотря на то, что влияние зарядовых состояний поверхности на процессы зародышеобразования и эпитаксию отмечались и ранее различными исследовательскими группами, в обсуждаемой работе предложена оптимальная методика формирования электрически-активных центров путем внедрения примесных атомов.

3. Впервые показано, что наличие террасно-ступенчатой наноструктуры поверхности подложек сапфира способствует гетероэпитаксиальному росту

слоя, тем самым продемонстрирована реализация методики графоэпитаксии на наноуровне. На примере эпитаксиальных пленок AlN, ZnO, CdTe, Au подтверждено, что ступени являются областями стока диффундирующих вдоль поверхности адатомов и предпочтительны в качестве центров гетерогенного зародышеобразования.

4. Следует отметить также предложенную в работе методику получения эпитаксиальных пленок AlN на сапфире прямой высокотемпературной нитридизацией предварительно нанесенных слоев алюминия. До некоторых пор считалось, что прямой нитридизацией алюминия получить структуры нитрида алюминия является сверх затратной задачей, вследствие чего прибегали к использованию химически активных реагентов типа аммиака, амминов.

К практически значимым результатам работы можно отнести:

а) Предложенный способ формирования наносаблона на поверхности сапфира с высокопериодичной структурой и высотой ступеней 0.22, 0.44 нм, 0.24 нм и 0.36 нм перспективен для применения в эпитаксиальных технологиях и для формирования упорядоченных низкоразмерных систем. В частности сенсорные устройства на основе покрытий золота на подложках сапфира различной морфологии, в оптических спектрах поглощения которых наблюдаются плазмонные особенности.

б) Весьма перспективна методика подавления полидоменной структуры на начальных стадиях роста пленок ZnO на сапфире базисной ориентации с террасно-ступенчатой наноструктурой, что может быть безусловно полезным в электронике при эпитаксии соединений с известной проблемой “инвертированных доменных структур”, ухудшающих эксплуатационные характеристики приборов.

в) Следует также отметить высокий прикладной потенциал предложенной методики формирования регулярного рельефа с заданными параметрами на поверхности сапфира путем окислительного отжига алюминиевых микроструктур. Данная методика позволяет получать микрорельеф на поверхности подложек сапфира любой технологически доступной площади, исключая трудоемкую стадию литографии и перспективна в нитридных технологиях.

г) Широкое применение в бионанотехнологиях и в композитных структурах магнитной записи может найти экспериментально продемонстрированная возможность формирования магнитных структур в пленках ферритов методом магнитно-силовой микроскопии.

д) Для создания в едином устройстве фоточувствительного элемента и усилителя используется усиление за счет внутренней фотоэмиссии

электронов в некоторых материалах. Предложенные в диссертационной работе пленки оксидов системы $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{-In}_2\text{O}_3$ выращенные методом твердофазного синтеза с фотопроводящими свойствами в “солнечно-слепой” области УФ спектра перспективны для создания нового класса высокочувствительных приборов дистанционного анализа и диагностики в пожарной безопасности и других сферах.

Достоверность и обоснованность результатов и выводов убедительно доказаны описанными в диссертации исследованиями и экспериментами. Автор использовал современное и надежное исследовательское оборудование с полноценным метрологическим обеспечением, позволяющим оценить достоверность полученных в работе результатов.

Основные положения выносимые на защиту обосновываются в главах диссертации:

1. На основе детальных исследований и анализа процессов твердофазных превращений в приповерхностных слоях кристаллов Al_2O_3 , V_2O_5 , SiC разработан комплекс методов, позволяющий управляемо изменять морфологию и электрофизические свойства поверхности с целью их дальнейшего использования в качестве подложек для осаждения слоев различного функционального назначения. Для сапфира проведена перестройка наноструктуры поверхности пластин разных ориентаций с помощью отжига на воздухе и создан электростатический рельеф на поверхности путем предростового облучения электронным пучком и внедрения примесных атомов титана в приповерхностные слои сапфира. В приповерхностных слоях кристаллов пентаоксида ванадия V_2O_5 создана многофазная система с образованием низших оксидов, существенно расширяющая функциональность V_2O_5 . Проведена вакуумная термодеструкция поверхности кристаллов карбида кремния в потоке атомов железа с образованием композитных структур железа с графеновыми слоями, проявляющих выпрямляющие свойства. (Главы 3,7)

2. Обоснованность и результативность методики предростового модифицирования поверхности сапфира, оказывающего ориентирующее влияние на начальных стадиях роста пленок ZnO , CdTe , AlN , включающего твердофазную рекристаллизацию поверхности сапфира с образованием атомно-гладкой террасно-ступенчатой наноструктуры, изменение электрофизических свойств поверхности сапфира путем предварительного облучения электронным пучком и внедрения примесных атомов титана в приповерхностные слои сапфира. (Главы 3,4,5)

3. Установленная зависимость плазмонных особенностей в спектрах поглощения от морфологии покрытий золота на сапфире, включая квазипериодические слои, упорядоченные ансамбли, полидисперсные и монодисперсные ансамбли островков золота. (Глава 3)

4. Методика получения пленок ферритов никеля и кобальта с использованием процессов твердофазного синтеза, позволяющая контролировать структуру, эпитаксиальные, внутренние напряжения в пленках и влиять на их магнитные свойства. Установленная зависимость величины коэрцитивных полей в ферромагнитных пленках от сжимающих напряжений в них. Результаты исследований магнитоэлектрического эффекта в нанокристаллах мульферроика феррита висмута ромбоэдрической фазы. (Глава 6)

5. Установленная зависимость фотопроводящих свойств в ультрафиолетовой "солнечно-слепой" области ($\lambda = 200 - 300$ нм) пленок системы $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{-In}_2\text{O}_3$, полученных методом твердофазного синтеза, от их структурно-фазового состава. Новые методы высокотемпературного окисления на воздухе и прямой высокотемпературной нитридации в чистом азоте предварительно нанесенных алюминиевых структур, позволяющие формировать как регулярный микрорельеф, так и эпитаксиальные пленки Al_2O_3 , AlN без использования трудоемких методов фотолитографии, ионного травления и токсичных реагентов. (Глава 3,6)

6. Методика оценки шероховатости поверхностей с террасно-ступенчатым рельефом, включающая: оценку минимальных параметров шероховатости на основе модели ступенчатой поверхности; исследования шероховатости вихриальных срезов кристаллов; использование сколов V_2O_5 в качестве эталонной меры для калибровки сканирующего туннельного микроскопа в атмосферных условиях в направлении вдоль поверхности (x,y) и по нормали (z) к поверхности образца. (Главы 2,7)

Замечания по диссертационной работе

1. В представленной работе, исследования процессов высокотемпературной перестройки приповерхностных слоев сапфира проведены только в воздушной среде. Данные исследования можно было бы существенно расширить с использованием высокотемпературного отжига в условиях вакуума, а также в атмосфере инертных газов или воздуха с различными парциальными давлениями.

2. Автор предлагает объяснять «сток» осажденных атомов и кластеров к ступеням на поверхности подложки сапфира электростатическим взаимодействием. Между тем, локальное распределение зарядового состояния на подложках сапфира после формирования террасно-ступенчатой наноструктуры не исследовано. Для подтверждения этого предположения желательно было бы измерить распределение величины зарядового состояния в области ступени, если предполагать ее заряженным линейным дефектом.

Сделанные замечания, однако, не имеют принципиального характера, и несколько не влияют на общее положительное впечатление от проведенной

А.Э. Муслимовым работы значительной по объему и глубокой по содержанию.

Работа А.Э. Муслимова выполнена на высоком профессиональном уровне и является законченным исследованием с критическим анализом результатов и научно обоснованными выводами. Актуальность проведенных исследований, научная новизна и практическая значимость результатов делает эту работу серьезным вкладом в развитие фундаментальных знаний о поверхности кристаллов и их перестройке, а также предполагает широкий круг прикладных задач которые могут быть решены с учетом полученных в диссертационной работе результатов. Таким образом, представленная диссертационная работа отвечает требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации и установленным постановлением правительства российской федерации от 24 сентября 2013 г. n 842 «о порядке присуждения ученых степеней», а её автор заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.18 – «Кристаллография, физика кристаллов»

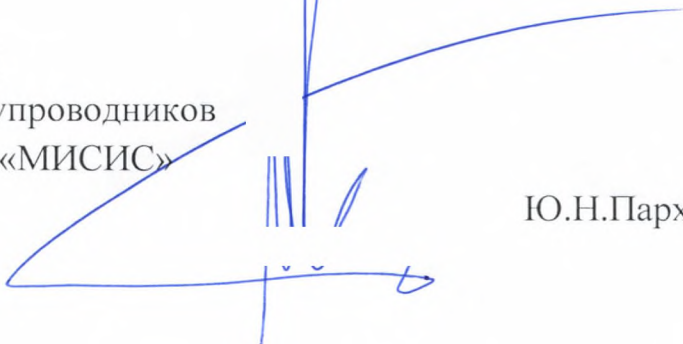
Доклад по диссертационной работе и отзыв обсуждены, и отзыв утвержден на расширенном заседании кафедры «Материаловедения полупроводников и диэлектриков» Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» (протокол № 07/18 от 5 сентября 2018 г.).

Отзыв подготовил:
Доцент кафедры МПид
к.ф.-м.н.
(podgorny_d@misis.ru)



Д.А. Подгорный

Заведующий кафедрой
материаловедения полупроводников
и диэлектриков НИТУ «МИСИС»
д.ф.-м.н., профессор



Ю.Н. Пархоменко

6.09.18г.