

О Т З Ы В

официального оппонента 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»

Развитие микроэлектроники и оптоэлектроники, квантовой электроники и функциональной электроники, микро- и нанотехнологий требует опережающего прогресса в создании материалов, в том числе гетерофазных систем, многослойных и наноструктурированных композиций. Последнее напрямую связано с необходимостью детального изучения роста влияния границ раздела как surface, так и interface на физические свойства программируемо создаваемых материалов.

В этой связи бесспорна **актуальность** диссертационной работы А.Э.Муслимова, посвященной именно изучению влияния поверхностных явлений и наноразмерных эффектов в управляемой перестройке поверхности кристаллических подложек. Модифицированные, таким способом, кристаллические подложки в дальнейшем используются в формировании эпитаксиальных наноструктур.

В целом, диссертационная работа 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 возможности управления ими при использовании их в качестве подложек для эпитаксиального наращивания полупроводниковых и металлических нанослоев с заданными физическими свойствами.

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения и списка литературы, изложенных на 313 страницах, включая 220 рисунков, 18 таблиц и список литературы из 600 наименований.

Во введении диссертации обоснована актуальность исследований процессов управляемой перестройки приповерхностных слоев кристаллов различной химической природы и структуры, определены цели и задачи, сформулированы научная новизна и основные положения, выносимые на защиту, определены теоретическая и практическая значимость работы, представлены сведения об апробации работы и основных публикациях по теме диссертации.

Первая глава представляет собой обзор литературных данных по тематике диссертации. Приведены сведения о процессах высокотемпературной рекристаллизации поверхности кристаллов сапфира, пятиоксида ванадия, карбида кремния и применения соответствующих кристаллов-подложек в эпитаксиальных технологиях.

Вторая глава посвящена описанию примененных при выполнении диссертационной работы методов получения и исследования эпитаксиальных пленок. В число использованных в диссертации методов получения пленок входят магнетронное и термическое напыление, твердофазный синтез в воздушной атмосфере и в атмосфере высокочистого азота. Исследование пленок осуществлялось методами атомно-силовой, туннельной, растровой и высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии, твердометрией, рентгеновской и электронной дифракции, оптической спектроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния.

В третьей главе приведены результаты исследований процессов твердофазной перестройки поверхности подложек сапфира с образованием террасно-ступенчатой наноструктуры (ТСН) для различных ориентаций кристалла. Исследуются процессы гетерогенного зародышеобразования полупроводниковых и металлических пленок.

Подтверждено, что ступени являются областями стока диффундирующих вдоль поверхности адатомов и являются областями гетерогенного зародышеобразования.

Предложена методика твердофазного синтеза эпитаксиальных пленок AlN базисной ориентации на С-срезах сапфира с ТСН путем прямой нитридации предварительно нанесенных на подложку слоев алюминия.

Сформированы покрытия золота различной морфологии на сапфире и изучены особенности отражения поляризованного оптического излучения от этих структур.

Четвертая глава описывает технологические процессы формирования пленок ZnO на сапфире с использованием буферных слоев AlN и Au. Результатом имеющим важное прикладное значение является предложенный высокоскоростной (7-8 нм/с) режим нанесения пленок ZnO на сапфир. Продемонстрирована возможность управления морфологией структур оксида цинка, включая упорядоченный ансамбль вискерных нанокристаллов высокой степени совершенства.

В пятой главе предложен способ эпитаксиального выращивания полупроводниковых пленок на подложках сапфира с активированным электростатическим рельефом. Установлено, что зародышеобразование происходит независимо от плотности заряда поверхности и наличия зарядов в осаждаемом паровой фазе. Заряд поверхности подложки проявляется в процессе роста при достижении определенного размера растущими островками. Отрицательный заряд поверхности способствует высокой подвижности растущих наностроек. Установлено, что олеофобные свойства сапфировых пластин после химико-механической полировки и дополнительного высокотемпературного отжига значительно возрастают, что может найти широкое применение в производстве защитных стекол измерительных устройств.

Шестая глава посвящена исследованию процессов роста полупроводниковых пленок на различно ориентированных подложках

сапфира с террасно-ступенчатой наноструктурой, в том числе предложена интересная методика формирования напряженных монокристаллических, поликристаллических и аморфных пленок ферритов кобальта и никеля, путем твердофазного синтеза. Предложена методика твердофазного синтеза дискретных нанокристаллов феррита висмута.

Представлена методика твердофазного синтеза пленок системы In_2O_3 - β - Ga_2O_3 , обладающих фотопроводящими свойствами в средней области (200-300 нм) ультрафиолетового спектра.

Седьмая глава описывает результаты исследований гетероструктур на основе оксидов ванадия и методов их получения. Приведен способ формирования композитных структур железа с графеновыми слоями на поверхности кристаллов карбида кремния, который может найти применение в спинтронике и микроэлектронике.

В заключительной части диссертации достаточно ясно сформулированы ее результаты и выводы, подводящие её итоги в соответствии с положениями, выносимыми на защиту.

Наиболее **значимые научные результаты** работы следующие:

1. Экспериментально осуществлены и теоретически обоснованы процессы твердофазной рекристаллизации в приповерхностных слоях подложек сапфира различной ориентации в зависимости от условий обработки и отклонения вицинальной поверхности от сингулярной грани.
2. Реализована возможность целенаправленного модифицирования электрофизических свойств поверхности подложек сапфира, способствующих эпитаксиальному разрастанию осажденного вещества путем предварительного облучения поверхности сапфира электронным пучком либо допированием поверхностного слоя оксидом титана.
3. Установлено, что наличие террасно-ступенчатой наноструктуры поверхности подложек сапфира способствует гетероэпитаксиальному росту слоя даже при значительном несоответствии параметров решетки на границе раздела (до 18%).

4. Реализована методика роста эпитаксиальных пленок AlN на сапфире прямой высокотемпературной нитридизацией предварительно нанесенных слоев алюминия посредством твердофазных химических реакций.
5. Выявлены плазмонные особенности спектров поглощения покрытий золота на сапфировой подложке различной морфологии, как то: квазипериодические слои, упорядоченные ансамбли островков золота, неупорядоченный ансамбль монодисперсных и полидисперсных островков золота.
6. Впервые сформирована многослойная структура V_2O_3 - VO_2 - V_2O_5 путем твердофазных превращений в приповерхностных слоях V_2O_5 , в которых наблюдается пропускание в оптическом диапазоне и переход в низкоомное состояние при температуре $61,5^\circ\text{C}$.
7. Впервые получены композитные структуры железа с графеновыми слоями путем вакуумной термодеструкции карбида кремния в потоке атомов железа, обладающие выпрямляющими свойствами.
8. Методика формирования напряженных монокристаллических, поликристаллических и аморфных пленок ферритов кобальта и никеля путем твердофазного синтеза, с целью управления их магнитными свойствами.
9. Методика твердофазного синтеза пленок In_2O_3 - β - Ga_2O_3 , обладающих фотопроводящими свойствами в области $\lambda=200$ - 300 нм.

Полученные результаты являются **новыми**. **Достоверность** результатов диссертационной работы подтверждается их непротиворечивой интерпретацией в рамках физических моделей, адекватно описывающих протекающие процессы и явления.

Практическая ценность работы определяется следующим:

1. Предложен способ управляемой твердофазной рекристаллизации(перестройки) поверхности сапфира путем формирования

высокопериодичной ТСН с высотами ступеней 0,22 и 0,44 нм на поверхности С- пластин сапфира, который может найти применение в эпитаксиальных технологиях и для формирования упорядоченных низкоразмерных систем.

2. Разработана методика подавления полидоменной структуры на начальных стадиях роста пленок ZnO на сапфире базисной ориентации может быть использована в технологии формирования высококачественных тонкопленочных материалов для микроэлектроники.

3. Предложенная методика формирования покрытий золота на подложке сапфира (включая квазипериодические слои, ансамбли упорядоченных и монодисперсных островков золота), в оптических спектрах поглощения которых наблюдаются плазмонные особенности, перспективна в оптоэлектронике и технологии изготовления сенсорных устройств.

5. Предложенная методика получения пленок нитрида алюминия прямой нитридизацией пленок алюминия на сапфире может быть перспективной для применения в нитридных технологиях.

6. Выращенные методом твердофазного синтеза пленки оксидов системы $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{-In}_2\text{O}_3$ 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.

8. Разработанный способ повышения олеофобности поверхности сапфировых пластин может использоваться в технологии производства стойких к органическим загрязнителям защитных прозрачных стекол в оптических устройствах.

Результаты работы, в целом, нашли и находят свое применение в разработке технологий формирования высококачественных тонкопленочных материалов для микро- и нанoeлектроники, полупроводниковой техники.

Замечание по диссертационной работе.

1. В работе показано, что пленки на основе оксидов индия-галлия проявляют фотопроводящие свойства в «солнечно-слепой» области УФ-спектра. Однако обусловленность этого эффекта не до конца, как мне кажется, объяснена. Могут ли за этот эффект отвечать F-центры, с которыми обычно связывают максимумы в этой области?
2. В работе исследованы процессы термодеструкции поверхности карбида кремния с образованием фазы графена, при этом нет информации о процессах происходящих в объеме карбида кремния?

Указанные замечания никоим образом не умаляет достоинств представленной диссертационной работы, в которой сформировано **новое** научное направление актуальной области кристаллографии и физики кристаллов – управление перестройкой поверхности твердого тела для формирования эпитаксиальных наноструктур.

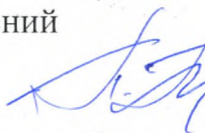
Диссертация А.Э. Муслимова «Управляемая перестройка поверхности кристаллических подложек для формирования эпитаксиальных наноструктур» представляет собой **законченную** научно-квалификационную работу, посвященную актуальной области кристаллографии, физики кристаллов. Автор на основании выполненных исследований разработал положения, совокупность которых можно квалифицировать как новое научное направление, имеющее важное значение для решения технологических задач в области кристаллографии и физики кристаллов, микро- и наноэлектроники, фотоники, а также нанодиагностики.

Диссертация А.Э. Муслимова «Управляемая перестройка поверхности кристаллических подложек для формирования эпитаксиальных наноструктур» отвечает требованиям раздела II Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор – Арсен Эмирбегович

Муслимов, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.18 – «Кристаллография, физика кристаллов».

Автореферат и публикации в полной мере отражают содержание диссертации.

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник
ВНИИ оптико-физических измерений



 П.А.Тодуа

Адрес: 119361, г. Москва, ул.Озерная, 46

Телефон: +7(495)4375633

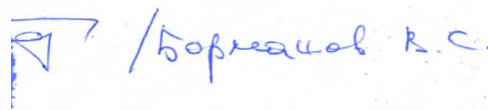
E-mail: paveltodua@mail.ru

«15» августа 2018 г.

Подпись П.А.Тодуа заверяю

15 августа 2018



 /Бормачев К.С.