

На правах рукописи

СУХОЧЕВ Алексей Сергеевич



**ТВЕРДОФАЗНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ ОКИСЛЕНИИ СТРУКТУР
Me/GaAs и MeO/GaAs (Me = Fe, Co, Ni)**

Специальность 02.00.01 — неорганическая химия

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата химических наук

Воронеж — 2005

Работа выполнена в Воронежском государственном университете

Научный руководитель: доктор химических наук, профессор
Митгова Ирина Яковлевна

Официальные оппоненты: доктор химических наук, профессор
Губин Сергей Павлович

кандидат химических наук, доцент
Битюцкая Лариса Александровна

Ведущая организация: **Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова**

Защита состоится «16» февраля 2006 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.038.08 по химическим наукам при Воронежском государственном университете по адресу: 394006, Воронеж, Университетская пл., 1, ауд. 290

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Воронежского государственного университета

Автореферат разослан «28» декабря 2005 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор химических наук, профессор



Семенова Г.В.

2006 А
377

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одним из способов управления механизмом формирования гетероструктур за счет кинетического обхода нежелательной стадии, одновременно обеспечивающим увеличение скорости роста оксидных слоев на полупроводниковых подложках $A^{III}B^V$, подавление испарения летучего компонента, модификацию их свойств, границ раздела, является химически стимулированное термическое окисление. Оно заключается во введении в систему обособленно выбранных соединений-активаторов, способных направленно воздействовать на механизм процесса, изменяя его в требуемом направлении. С этих позиций d -металлы, обладающие несколькими стабильными степенями окисления, и их оксиды, нанесенные на поверхность арсенида галлия, являются подходящим объектом исследования. В то же время интерес к структурам на основе арсенида галлия с нанесенными слоями магнитных металлов (железо, кобальт, никель) обусловлен перспективой реализации в них эффекта магнетосопротивления. Поэтому, исследование твердофазных взаимодействий при термическом окислении гетероструктур d -металл/ $A^{III}B^V$ и оксид d -металл/ $A^{III}B^V$ актуально не только с практической, но и с фундаментальной точки зрения. На примере этих систем возможно развитие представлений неорганической химии, химии твердого тела, термодинамики и кинетики сложных гетерогенных процессов.

Таким образом, знание механизма термоокислирования $Me/GaAs$ и $MeO/GaAs$, с одной стороны, позволит разработать методы синтеза гетероструктур с целевыми свойствами, с другой — развить представления о твердофазных реакциях на примере процессов хемостимулированного окисления полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$ с учетом неравновесности процессов и наплечного состояния реагентов и продуктов.

Цель работы. Установление закономерностей взаимодействия арсенида галлия с предварительно нанесенными на его поверхность металлами триады железа и их оксидами при термическом окислении структур $Me/GaAs$ и $MeO/GaAs$ ($Me = Fe, Co, Ni$).

Для достижения цели требовалось выполнение следующих задач:

1. Изучение механизма формирования многокомпонентных слоев при термоокислировании $GaAs$ с нанесенными слоями d -металлов и их оксидов.
2. Выявление закономерностей влияния металлов триады железа и их оксидов на термическое окисление арсенида галлия.
3. Определение влияния различий, обусловленных способом создания исходных структур $Me/GaAs$ (вакуумно-термический или магнетронный), на механизм их термического окисления.
4. Установление влияния толщины исходного слоя металла или его оксида на кинетику окисления и свойства гетероструктур.
5. Развитие представлений о термическом окислении гетероструктур $Me/GaAs$ и $MeO/GaAs$ ($Me = Fe, Co, Ni$)



Методы исследования. Для определения состава полученных пленок, изучения их морфологии, исследования кинетики и механизма твердофазных взаимодействий использованы методы лазерной эллипсометрии (ЛЭФ-3М), инфракрасной спектроскопии (Инфралом ФТ-02, UR-10), рентгенофазового анализа (ДРОН-4-07, ДРОН-3), электронной Оже-спектроскопии (ЭСО-3, JAMP 10S), растровой электронной микроскопии (CamScan-4), атомно-силовой микроскопии (Femtoscan 001).

Научная новизна.

— установлены закономерности твердофазных взаимодействий при окислении структур Me/GaAs, MeO/GaAs (Me = Fe, Co, Ni) и выявлены химические и структурные особенности металлов триады железа и их соединений в нанопленочном состоянии;

— показана роль интерфейсных твердофазных реакций в процессе оксидирования структур Me/GaAs и MeO/GaAs;

— определено влияние способа создания контакта Me/GaAs на состав, структуру и свойства полученных гетероструктур;

— обнаружено закономерное влияние толщины нанесенного слоя металла или оксида на протекание твердофазных реакций при окислении структур Me/GaAs и MeO/GaAs, заключающееся в сужении температурного интервала стабильного роста пленок по мере уменьшения толщины;

— установлено хемостимулирующее действие оксидов металлов триады железа в процессе термического окисления арсенида галлия, состоящее в ускоренной передаче кислорода от оксида хемостимулятора компонентам полупроводника и приводящее к формированию оксидов галлия, мышьяка и арсенатов металла в более мягких по сравнению с собственным окислением GaAs условиях;

— предложены схемы процессов термооксидирования гетероструктур на основе GaAs с нанесенными слоями *d*-металлов и их оксидов.

На защиту выносятся:

1. Интерфейсные взаимодействия, заключающиеся в формировании и разложении композиционно неоднородного слоя $Me_xGa_yAs_z$ при окислении структур Me/GaAs и транзите кислорода в структурах MeO/GaAs.
2. Активация процесса окисления структур на основе GaAs нанесенными слоями металлов триады железа и их оксидов, состоящая в формировании оксидно-арсенатных слоев (в том числе с высокой степенью окисления мышьяка) в значительно более мягких условиях по сравнению с собственным окислением GaAs.
3. Зависимость механизма процессов синтеза многокомпонентных слоев при термооксидировании структур Me/GaAs от способа нанесения металла, проявляющаяся в стабилизации оксидов с нехарактерными степенями окисления и своеобразии кинетики окисления для магнетронного способа напыления.

4. Влияние толщины нанесенного слоя металла или оксида на характер протекания твердофазных реакций при окислении структур Me/GaAs и MeO/GaAs , проявляющееся в закономерном увеличении температурного интервала стабильного роста оксидных слоев при возрастании толщины.
5. Закономерности взаимодействия металлов триады железа и их оксидов с арсенидом галлия в процессах окисления структур Me/GaAs и MeO/GaAs .
6. Схемы процессов эволюции гетероструктур Me/GaAs и MeO/GaAs при их термическом окислении, отражающие специфику воздействия металлов триады железа и их соединений, находящихся в нанопленочном состоянии.

Практическая значимость. Полученные результаты могут быть применены для оптимизации процессов синтеза нового поколения неорганических материалов, в частности, слоистых и гранулированных гетероструктур с чередованием ферромагнитных и изолирующих фаз — перспективных объектов спинтроники. Установление закономерностей формирования гетероструктур позволит более гибко управлять составом и свойствами образующихся тонкопленочных систем.

Проведенные исследования поддержаны грантами: Минобразования России «Фундаментальные исследования в области естественных и точных наук» (№ Е00-5.0-363, Е02-5.0-53), РФФИ (№ 02-03-32418), НТП Исследования Высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники (подпрограмма (208) «Электроника»).

Апробация. Результаты работы были доложены на VIII, IX и X Международных конференциях по физике и технологии тонких пленок (Ивано-Франковск, 2001, 2003, 2005); Всероссийской научно-технической дистанционной конференции «Электроника» (Москва, 2001); Школе-семинаре «Актуальные проблемы неорганического материаловедения» (Дубна, 2001); Второй Всероссийской конференции (с международным участием) «Химия поверхности и нанотехнология» (Санкт-Петербург — Хилово, 2002); I Всероссийской конференции «Физико-химические процессы в конденсированном состоянии и на межфазных границах «ФАГРАН-2002» (Воронеж, 2002); VIII Всероссийском совещании «Высокотемпературная химия силикатов и оксидов» (Санкт-Петербург, 2002); III, IV и V Международных научных конференциях «Химия твердого тела и современные микро- и нанотехнологии» (Кисловодск, 2003, 2004, 2005); Всероссийской конференции «Химия твердого тела и функциональные материалы — 2004» (Екатеринбург, 2004); XXXVII и XLIII Международных научных студенческих конференциях «Студент и научно-технический прогресс» (Новосибирск, 1999, 2005).

Публикации. По материалам работы опубликовано 4 статьи (в изданиях РАН) и 20 тезисов докладов на научных конференциях.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, выводов, списка литературы (наименований) и приложения,

изложена на 169 страницах машинописного текста, включая 24 таблицы, 58 рисунков и библиографический список, содержащий 120 наименований литературных источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе представлен анализ литературных данных по проблеме исследования. Рассмотрены особенности низкотемпературного и высокотемпературного окисления металлов. Показано, что, хотя никель обладает лишь одним стабильным оксидом NiO, в определенных условиях возможно образование Ni₂O₃. При окислении кобальта в интервале 350—900° С образуются два оксида — CoO и Co₃O₄. С повышением температуры происходит уменьшение в слое доли второго оксида. При окислении железа возможно образование всех трех оксидов — FeO, Fe₂O₃, Fe₃O₄.

Обосновано, что гетероструктуры на основе GaAs с тонкими пленками ферромагнитных никеля, кобальта, железа и их оксидов являются интересным объектом вследствие широкой области практического применения, базирующейся на возможности соединения в одной системе как ценных электрических, так и уникальных магнитных свойств. В то же время структуры, полученные собственным термическим окислением GaAs, обладают неудовлетворительными электрофизическими характеристиками вследствие испарения летучего компонента (As) и нарушения сплошности пленки, с одной стороны, и накопления несвязанного мышьяка на внутренней границе раздела — с другой. С этих позиций разнообразие степеней окисления и относительно высокая реакционная способность металлов триады железа могут обеспечить эффективность хемостимулирования и связывания летучего компонента на границе раздела (ГР) и соответственно улучшение свойств гетероструктур.

Показано, что, несмотря на большой интерес к структурам Me/GaAs, химические процессы на их внутренней границе раздела в полной мере не изучены, есть противоречащие данные, указывающие на сложность протекающих процессов и зависимость их от условий эксперимента, способа формирования гетероструктур. Отражено, что имеющиеся подходы к решению практических задач в этой области носят в основном физический характер. В то же время дальнейший прогресс невозможен без глубокого изучения химических закономерностей формирования данных систем. С этих позиций очень важно установить механизм термоокислирования гетероструктур, идентифицировать стадии на границе раздела, а также определить их роль. Все это позволит дополнить положения неорганической химии новыми фактами относительно химических взаимодействий с участием металлов триады железа, их оксидов и арсенида галлия в тонкопленочных наноструктурах.

Вторая глава содержит описание методики формирования, окисления гетероструктур и характеристики использованных методов анализа полученных образцов. Обоснован выбор двух способов напыления пленок на арсенид галлия — магнетронное (м) распыление и вакуумно-термическое (вт) напыление. Первый метод, позволяющий напылять пленки не только простых веществ, но и соединений, характеризующийся высокой адгезией и однородностью покрытий

по толщине, выбран основным для нанесения как пленок металлов, так и их оксидов, а второй применен для сравнения полученных результатов и выявления влияния способа создания гетероструктур на механизм термического окисления соответствующих систем.

Окисление структур Me/GaAs и MeO/GaAs проводили в кварцевом реакторе горизонтальной печи резистивного нагрева в воздушной среде. Показано, что использование в качестве окисляющей атмосферы воздуха, а не кислорода не оказывает заметного влияния, поскольку интересующие нас взаимодействия в системе протекают преимущественно на внутренней границе раздела и в объеме пленки. Контрольный эксперимент по окислению в потоке кислорода не показал заметного различия в толщине образующихся пленок. Температурный интервал окисления структур 400—580° С, время — от 1 до 160 мин.

Обоснован выбор метода лазерной эллипсометрии (ЛЭФ-3М) (погрешность ± 1 нм) для измерения толщины выращенных слоев и использование в рамках этого метода однослойной модели для исследования кинетики процесса окисления. Обработку результатов проводили с использованием степенного уравнения:

$$d = (kt)^n, \quad (1)$$

где d — толщина оксидного слоя, нм; t — время выращивания слоя, мин; k — константа скорости формирования оксида, $\text{нм}^{1/n} \cdot \text{мин}^{-1}$, которая не относится к какой-либо элементарной стадии; n — показатель степени уравнения, являющийся отражением смены определяющих (или контролируемых) процессов.

Для установления механизма твердофазных реакций при окислении гетероструктур использованы методы инфракрасной спектроскопии (ИКС), рентгенофазового анализа (РФА), электронной Оже-спектроскопии (ЕОС), растровой электронной микроскопии (РЭМ), атомно-силовой микроскопии (АСМ), позволяющие определить не только химический состав образующихся оксидных слоев и распределение компонентов по толщине пленки, но и исследовать морфологию поверхности, пленки и внутренней границы раздела.

В третьей главе рассмотрены процессы термоокислирования гетероструктур Me/GaAs (Me = Ni, Co, Fe) при магнетронном способе напыления металла. В таблице 1 представлены результаты определения химического состава образующихся при окислении гетероструктур Me(m)/GaAs оксидных слоев.

Установлено, что образование оксидов компонентов подложки (галлия и мышьяка) наблюдается в более мягких условиях (400—500° С, до 30 мин.) по сравнению с собственным окислением GaAs, где заметное окисление галлия и мышьяка происходило при высоких температурах ($T > 550^\circ \text{C}$) на развитых стадиях процесса (> 90 мин.). При этом несвязанный мышьяк в слоях не обнаружен. Соответственно все полученные гетероструктуры обладают улучшенными по сравнению с собственными оксидными слоями на GaAs электрофизическими характеристиками ($E_{пр} \sim 10^5$ В/см). Таким образом, формирующиеся при окислении металлов оксиды являются эффективными хемостимуляторами термоокислирования арсенида галлия, способствуют быстрому образованию оксидов галлия и мышьяка. Характерно образование оксидов мышьяка, отвечающих двум степеням окисления As^{+3} и As^{+5} , что доказывает эффективность активирующего действия образующихся при окислении пленок металла оксидов.

Таблица 1

**Качественный состав слоев, образующихся при окислении структур
Me/GaAs и MeO/GaAs (по данным ИКС, РФА, ЭОС)**

Система	Качественный состав		
Ni(м)/GaAs	Ni ₂ O ₃ , NiAs	Ga ₂ O ₃ , As ₂ O ₅	Ni ₃ (AsO ₄) ₂
Co(м)/GaAs	CoO, Co ₂ O ₃ , Co ₃ O ₄	Ga ₂ O ₃ , As ₂ O ₃	арсенаты кобальта (Co ₃ (AsO ₄) ₂)
Fe(м)/GaAs	FeO, Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄ , FeAs ₂	Ga ₂ O ₃ , As ₂ O ₃	арсенаты железа, FeAsO ₄
Ni(вт)/GaAs	NiO, NiAs	Ga ₂ O ₃ , As ₂ O ₃	арсенаты никеля (Ni ₃ (AsO ₄) ₂)
Co(вт)/GaAs	Co ₃ O ₄	Ga ₂ O ₃ , As ₂ O ₃	арсенаты кобальта, Co ₃ (AsO ₄) ₂
NiO/GaAs	Ni ₂ O ₃ , NiO	Ga ₂ O ₃ , As ₂ O ₃ , As ₂ O ₅	Ni ₃ (AsO ₄) ₂ , Ni ₃ As ₂ O ₇ , NiAs ₂ O ₄
CoO/GaAs	CoO, Co ₂ O ₃ , Co ₃ O ₄	Ga ₂ O ₃ , As ₂ O ₃	арсенаты кобальта, Co ₃ (AsO ₄) ₂

Показано, что при окислении пленки металла происходит образование оксидов металлов в разных степенях окисления, выступающих в роли активаторов процесса окисления. Помимо «ожидаемых» оксидов металлов триады железа, исходя из данных по окислению объемных (*bulk*) образцов, при окислении тонкопленочных гетероструктур Me(м)/GaAs обнаружено образование нестабильных оксидов металла (Ni₂O₃, Co₂O₃, FeO, данные РФА, ИКС, см табл 1). В случае пленок никеля и кобальта показано, что механизм стабилизации связан с формированием в ходе магнетронного распыления металлической мишени дефектов на ГР Me/GaAs, которые затем наследуются структурой стабильных оксидов NiO и CoO и приводят к формированию вакансий в катионной подрешетке, являющихся центрами кристаллизации оксидов в нехарактерной степени окисления +3. При этом происходит включение Me₂O₃ в аморфную матрицу MeO. Образование FeO при нехарактерных для него температурах противоречит равновесной фазовой диаграмме Fe – O и обусловлено уникальностью изучаемого объекта — наноразмерных гетероструктур.

Методами ЭОС (рис. 1) и РФА (табл. 1) установлено, что общим для всех процессов является образование в ходе напыления переходного слоя Me₂GaAs₂, который нестабилен и при термической обработке разрушается с образованием арсенидов соответствующего металла (NiAs, FeAs, FeAs₂, данные РФА). В случае Co(м)/GaAs арсениды явно зафиксированы не были, что, на наш взгляд, связано с их низкой концентрацией и аморфизацией. Однако общетеоретические представления и, главное, наличие на Оже-профиле неокисленной структуры (рис. 1) протяженной интерфейсной области, характеризующейся взаимопроникновением элементов контакта, позволяет говорить об их присутствии.

Помимо транзитных взаимодействий при формировании оксидных слоев на арсениде галлия велика роль вторичных твердофазных реакций, которые при собственном окислении арсенида галлия протекают только при высоких температурах (600—700° С) и на развитых стадиях процесса. Методами РФА и ИКС установлено, что для всех исследованных структур в ходе этих реакций проис-

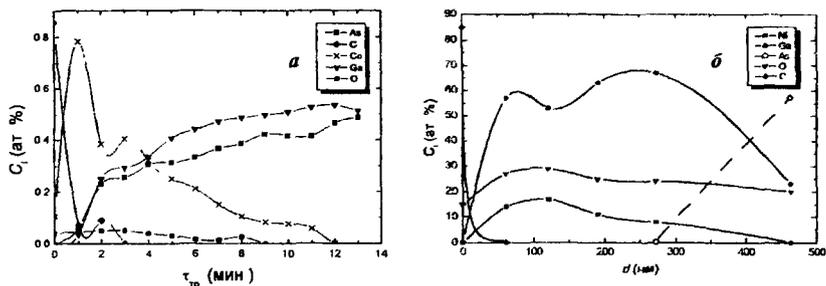


Рис. 1. Оже-профиль распределения элементов неокисленной структуры Co(50)/GaAs (а) и Ni(50)/GaAs, окисленной при $T = 530^\circ \text{C}$ в течение 100 мин (б)

ходит образование арсенатов металла, что является заключительной стадией процесса окисления.

Комплексный анализ данных ИКС и РФА (табл. 1) для всех исследованных процессов позволяет выделить закономерность: процесс окисления Fe/GaAs приводит к формированию арсената железа в степени окисления (+3) — FeAsO_4 , тогда как для кобальта и никеля более характерен арсенат состава $\text{Me}_3(\text{AsO}_4)_2$ (РФА, ИКС). Этого и следовало ожидать, исходя из общих положений — степень окисления (+3) более характерна для железа, а (+2) — для никеля и кобальта.

Исследование топологии полученных структур также указывает на интенсивные твердофазные взаимодействия при термоокислении гетероструктур с магнетронно нанесенными слоями металлов. Так при окислении Fe/GaAs, исходя от обладающей ровной поверхностью (неровность порядка 2—4 нм), происходит образование островков, число и размеры которых увеличиваются с ростом параметров процесса, что обусловлено процессами кристаллизации в пленке. Пленка никеля на арсениде галлия изначально обладает островковым рельефом (рис. 2). Таким образом, процессы диффузии и испарения облегчены (в первую очередь по границам зерен кристаллитов). В ходе процесса происходит проникновение галлия в приповерхностную область и его окисление там с формированием слоя, состоящего из смеси оксидов никеля и галлия (сравнительный анализ данных ЭОС (рис. 1) и данных РФА) и сглаживанием поверхности гетероструктуры (рис. 2).

Интенсивные твердофазные взаимодействия, образование нескольких оксидов металла и взаимные переходы между ними, характеризующиеся изменением плотности слоев, усиление процессов испарения при высоких температурах (на это указывает уменьшение толщины пленок, синтезированных при высоких температурах) приводит к нерегулярности динамики роста оксидных слоев для всех исследованных систем $\text{Me}(m)/\text{GaAs}$, вне зависимости от напыляемого металла и толщины его исходного слоя. Как следствие этого расчет кинетических параметров уравнения (1) и эффективной энергии активации (ЭЭА) не возможен. Обнаружена общая закономерность: при уменьшении толщины исходного слоя металла (с 50 нм до 25 нм) для систем Co/GaAs и Fe/GaAs темпе-

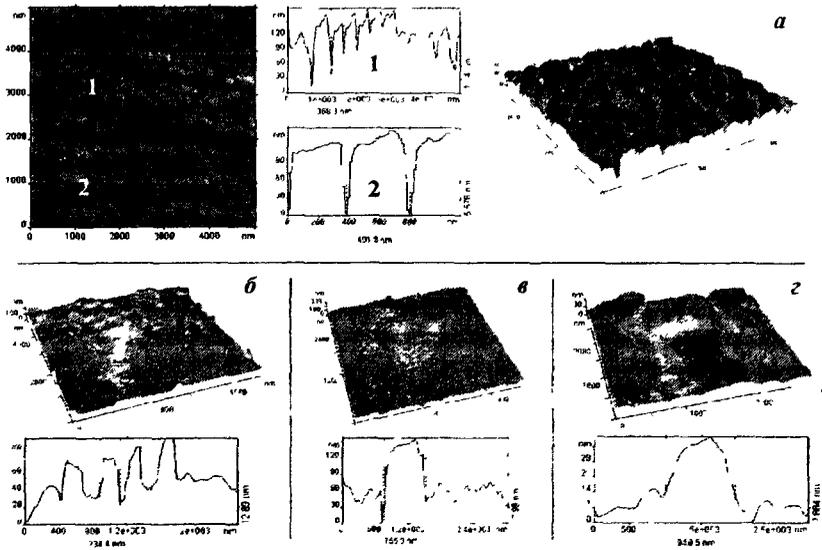


Рис. 2. АСМ-изображения поверхности гетероструктур Ni/GaAs, полученных в режимах *a* — неокисленная структура, *б* — $T = 490^\circ\text{C}$ 10 мин, *в* — $T = 490^\circ\text{C}$ 100 мин, *г* — $T = 530^\circ\text{C}$ 100 мин.

ратурный интервал стабильного роста сужается (чем выше исходная толщина слоя металла, тем ниже температура заметного уменьшения толщины пленки).

Установлено, что окисление гетероструктур Fe/GaAs с различной толщиной исходного слоя железа значительно отличается от остальных, что обусловлено большей по сравнению с никелем и кобальтом реакционной способностью железа и сравнительно высокой стабильностью степеней окисления Fe^{+2} и Fe^{+3} . Установлено (РФА), что исходные образцы Fe/GaAs оказались изначально подкисленными, а образец Fe(25нм)/GaAs помимо этого содержал FeAs_2 , что еще раз подтверждает факт интерфейсного взаимодействия на ГР уже на стадии напыления металла.

В четвертой главе представлены данные по термоокисидированию структур Ni(вт)/GaAs и Co(вт)/GaAs. Процессы окисления структур Me(вт)/GaAs отличаются от таковых для Me(м)/GaAs регулярной динамикой роста оксидных слоев (рис. 3). При исследовании окисленных образцов методами ИКС и РФА установлено и различие в химическом составе структур (табл. 1), состоящее в формировании только одного, наиболее стабильного оксида — NiO для Ni(вт)/GaAs и Co_2O_4 — для Co(вт)/GaAs.

Набор полученных данных позволяет утверждать, что при вакуумно-термическом напылении не наблюдается значительного интерфейсного взаимодействия на стадии напыления или на начальных этапах процесса, как это происходило при магнетронном распылении. Для Ni(вт)/GaAs обнаруженный NiAs (РФА, табл. 1) быстро разлагается в ходе окисления, а для Co(вт)/GaAs связь

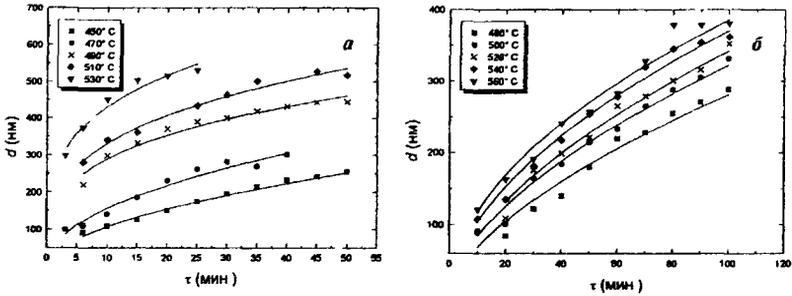


Рис. 3. Кинетические изотермы окисления структур Ni(vt)/GaAs (а) и Co(vt)/GaAs (б)

Co-As не обнаружена вообще. Наличие арсенидов на внутренней границе раздела обуславливает достаточно большую разницу в кинетических параметрах окисления соответствующих гетероструктур (табл. 2). При окислении гетероструктур Ni(vt)/GaAs увеличение ЭЭА происходит за счет затрат на раскисление слоя NiAs. Отсутствие арсенидов на интерфейсе Co(vt)/GaAs приводит к диффузионному контролю, что следует из сравнения значений $n_{ср}$ и ЭЭА (табл. 2).

Невысокая энергия частиц при вакуумно-термическом напылении приводит к незначительной разупорядоченности интерфейса, как следствие этого не наблюдается образование нестабильных оксидов Me_2O_3 (РФА, ИКС), стабилизация которых при магнетронном распылении происходила за счет высокой дефектности внутренней ГР.

Состав оксидных слоев, полученных при окислении структур Me(vt)/GaAs и Me(m)/GaAs аналогичен (табл. 1), так же происходит образование оксидов галлия, мышьяка и арсенатов соответствующего металла. Таким образом, наблюдаются те же основные стадии процесса — транзитные взаимодействия и вторичные твердофазные реакции, — приводящие к формированию оксидно-

Таблица 2

Параметр $n_{ср}$, уравнения (1) и ЭЭА процессов окисления различных структур Me/GaAs и MeO/GaAs

Система	исходная толщина	$n_{ср}$	ЭЭА, кДж/моль	связь Me-V ^Y на внутр. ГР
Ni(vt)/GaAs	50	0,35	317	+
Co(vt)/GaAs	50	0,60	16	-
Ni(vt)/InP	50	0,16	351	+
NiO/GaAs	40	0,35	64	-
	25	0,38	70	-
CoO/GaAs	70	0,38	133	-
	25	0,22	125	-

арсенатных слоев. Однако, в случае окисления структур Me(вт)/GaAs наблюдается образование только одной оксидной формы мышьяка (As_2O_3), а синтез арсенатов происходит в жестких условиях на развитых стадиях процесса (100—200 мин.). В случае Me(м)/GaAs арсенаты формируются на промежуточных этапах окисления (50—60 мин.) (РФА, ИКС). Таким образом, эффективность транзитных взаимодействий в случае Me(вт)/GaAs ниже, по сравнению с Me(м)/GaAs

Можно заключить, что способ напыления значительно влияет на механизм окисления структур, определяя структуру и дефектность интерфейсной области, программирующей дальнейший процесс окисления.

В пятой главе рассмотрены процессы термоокислирования структур NiO/GaAs и CoO/GaAs с различной исходной толщиной слоя оксида, нанесенного магнетронным способом. Данные различных методов (ИКС, РФА, АСМ, электрофизические исследования), а именно: наличие в окисленных структурах обоих оксидов мышьяка (As_2O_3 , As_2O_5); синтез арсенатов различного состава (причем в кристаллической форме, РФА) уже на начальных этапах окисления (30 мин.); процессы фазообразования с увеличением количества кристаллитов (рис. 4); лучшие, по сравнению со всеми остальными гетероструктурами электрофизические характеристики ($E_p \sim 8 \times 10^5$ В/см, $\rho \sim 10^9$ Ом·см), — доказывают более эффективное активирование процесса окисления арсенида галлия при термоокислировании MeO/GaAs по сравнению с Me/GaAs. Это обусловлено присутствием кислорода на ГР исходной структуры. Поэтому транзитные взаимодействия, возможные уже на начальных этапах процесса, способствуют более быстрому по сравнению с Me/GaAs накоплению оксидов галлия и мышьяка в пленке.

Итак, характер интерфейсных реакций в начальные моменты процесса окислирования отличается от такового для структур Me(м)/GaAs и состоит в транзитной передаче кислорода не через стадию раскисления арсенидов, что характерно для Me(м)/GaAs и Ni(вт)/GaAs, а непосредственно компонентам полупроводника — галлию и мышьяку. Это приводит к сравнительно небольшим значениям ЭЭА (табл. 2), сопоставимым с таковыми для собственного окисления GaAs в аналогичных условиях (110 кДж/моль), что подтверждает факт о

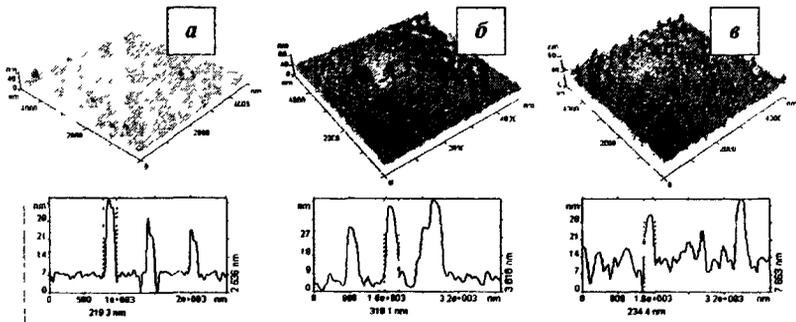


Рис. 4. АСМ-снимки поверхности неокисленной структуры CoO(25)/GaAs (а), и окисленной в режимах б — $T = 530^\circ\text{C}$, 100 мин.; в — $T = 550^\circ\text{C}$, 100 мин

большом вкладе стадии раскисления арсенидов на интерфейсе в значение эффективной энергии активации.

При нанесении пленок оксидов, несмотря на высокую энергию частиц, не происходит значительного разупорядочения интерфейса, что связано с лучшей когерентностью пленка-подложка для MeO/GaAs , чем для Me/GaAs . Как следствие этого при создании контакта MeO/GaAs не происходит значительного перемешивания на ГР раздела и дефектообразования. Однако повышение температуры усиливает эффекты разупорядочения, сопровождающие процесс магнетронного распыления. Как следствие этого образование нестабильных Me_2O_3 (табл. 1) наблюдается только на развитых стадиях процесса, в то время как для структур $\text{Me}(m)/\text{GaAs}$ они образуются уже на начальных этапах процесса.

Динамика роста оксидных слоев при термоокислении гетероструктур MeO/GaAs аналогично $\text{Me}(vt)/\text{GaAs}$ имеет регулярный характер (рис. 5). Значения $n_{\text{ср}} < 0,5$ для всех исследованных структур указывают на то, что определяющим процессом является твердофазная реакция, лимитируемая диффузией в твердой фазе. Установлено, что снижение толщины исходного слоя хемостимулятора не оказывает существенного влияния на кинетику процесса термоокисления гетероструктур MeO/GaAs (значения $n_{\text{ср}}$ и ЭЭА практически неизменны) (табл. 2). Это объяснимо, учитывая обособанную выше ведущую роль интерфейсных твердофазных взаимодействий при термоокислении гетероструктур с нанесенными слоями активаторов, при этом диффузия окислителя из атмосферы через слой оксида не оказывает значительного влияния.

Тем не менее, эффект влияния толщины обнаружен, и он находится в соответствии с общей закономерностью, установленный при окислении $\text{Me}(m)/\text{GaAs}$. Так, в результате протекания интенсивных транзитных и вторичных твердофазных взаимодействий происходит полное расхождение слоя оксида-активатора (РФА, ИКС). Для структур $\text{CoO}(25)/\text{GaAs}$ было обнаружено, что образование в результате этого процесса при 530°C на 60 мин. окисления арсенатов сопровождается резким увеличением толщины слоя (рис. 5), в основном за счет объемного эффекта (уменьшение плотности пленки при переходе от преимущественно оксидного состава к арсенатному). Вследствие этого при дальнейшем росте температуры до 550°C (рис. 5) происходит растрескивание

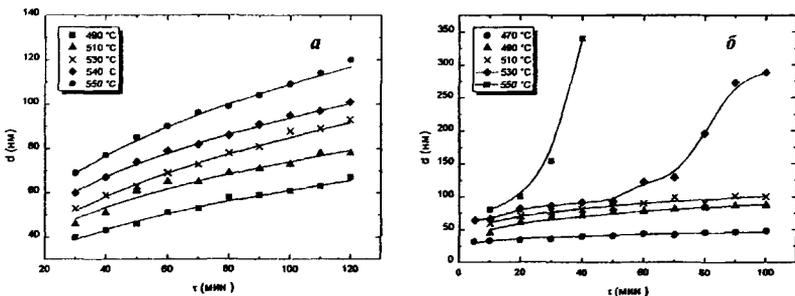


Рис. 5. Кинетические кривые окисления гетероструктур $\text{CoO}(70)/\text{GaAs}$ (а) и $\text{CoO}(25)/\text{GaAs}$ (б)

пленки, на что указывает невозможность обсчета эллипсометрических данных в рамках однослойной модели и омическая проводимость структуры, окисленной в этих условиях. Для структур CoO(70)/GaAs растрескивание наблюдается при температуре 570° С, поскольку количество активатора в данном случае больше, а, следовательно, его полная трансформация в арсенат наступает позже. Таким образом, общая закономерность влияния толщины, состоящая в сужении температурного интервала стабильного роста при переходе к меньшим толщинам, обнаруженная для структур Me(m)/GaAs, соблюдается и для MeO/GaAs.

В шестой главе обобщены результаты предыдущих трех глав и рассмотрены закономерности процессов оксидирования Me/GaAs и MeO/GaAs, с учетом специфики влияния способа формирования гетероструктур и химии металлов триады железа и их соединений.

При анализе экспериментальных данных выделен ряд общих черт, присущих всем исследованным системам.

1) Качественный состав результирующих слоев, для всех исследованных в работе систем примерно одинаков (табл. 1). Таким образом, для процессов термооксидирования Me/GaAs и MeO/GaAs прослеживается определенная аналогия основных стадий формирования оксидных слоев, обусловленная ведущей ролью транзитных взаимодействий при термооксидировании гетероструктур.

2) В результате окисления структур Me/GaAs на начальных этапах и транзитных взаимодействий в образующихся пленках, как правило, происходит образование нескольких оксидов, отвечающих разным степеням окисления соответствующего нанесенного металла (данные ИКС, РФА, ЭОС). Таким образом, в пленке имеют место взаимные переходы между оксидами, отвечающими различным степеням окисления металла. Характер таких переходов обусловлен химической природой образующихся оксидов, что составляет специфику рассматриваемых процессов.

3) Характер стадии транзитной передачи кислорода от оксида металла компонентам подложки для данной матрицы зависит от типа нанесенного хемостимулятора (оксид или металл). Для всех металлических покрытий вне зависимости от способа нанесения металла за исключением Co(вт)/GaAs методами РФА и ЭОС обнаружено взаимодействие наносимого металла и арсенида галлия на внутренней ГР уже в процессе напыления или в начальный момент окисления:

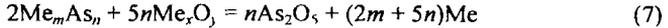
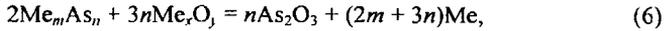


В дальнейшем при термической деструкции слоя $\text{Me}_x\text{Ga}_y\text{As}_z$ вследствие химической специфики металлов триады железа происходит их преимущественное связывание с анионным компонентом полупроводника — мышьяком.

В случае нанесенных пленок оксидов металлов стадия образования арсенидов как на начальных, так и на развитых стадиях процесса отсутствует (табл. 1). Таким образом, стадия транзитной передачи кислорода элементам подложки для структур с пленками оксидов металла протекает в соответствии с уравнениями реакций:

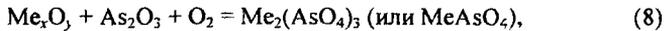


Для структур же с пленками металлов (исключение Co(вт)/GaAs) окисление мышьяка происходит в соответствии с уравнениями:



Отсутствие в пленках свободного металла указывает на то, что выделившийся в ходе реакций (3)—(7) металл доокисляется диффундирующим в пленку кислородом воздуха и, таким образом, обуславливает частичную регенерацию оксида металла, который снова включается в транзитные взаимодействия.

4) по мере развития процесса и накопления в пленке оксидов мышьяка происходит образование арсенатов соответствующего металла за счет вторичных транзитных взаимодействий между оксидами металла и мышьяка (ИКС и РФА). В зависимости от степеней окисления мышьяка и металла в соответствующих оксидах процессы протекают согласно уравнениям (без учета коэффициентов):



В целом, процесс термоокисливания гетероструктур с пленками *d*-металлов и их оксидов на арсениде галлия можно представить в виде обобщенной схемы (рис. 6), каждая стадия которой подтверждена соответствующими методами анализа.

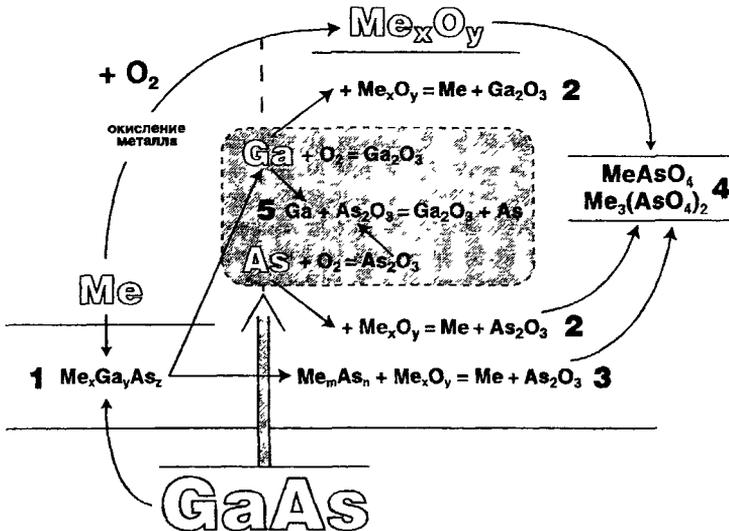


Рис. 6. Обобщенная схема процесса термоокисливания гетероструктур Me/GaAs и MeO/GaAs (Me = Fe, Co, Ni) 1 — интерфейсная реакция образования и разложения переходного слоя (РФА, ЭОС), 2 — транзитные взаимодействия между оксидом металла и компонентами полупроводника (ИКС, РФА) 3 — стадия транзитного раскисления арсенида металла; 4 — вторичные твердофазные взаимодействия с образованием арсенатов (ИКС, РФА), 5 — собственное окисление арсенида галлия и стадия обратного транзита

Как видно из представленной схемы, центральной стадией процесса оксидирования, приводящей к формированию основных компонентов пленки, является транзитная передача кислорода компонентам полупроводника. Она обеспечивает рост концентрации соответствующих оксидных производных в пленке, тем самым увеличивая ее толщину. Характер транзитных реакций зависит от первоначальной стадии интерфейсного взаимодействия между формируемой пленкой и полупроводниковой поверхностью. Образующийся в ходе этого продукт определяет структуру пленки, влияет на дефектность образующихся фаз и сказывается на механизме дальнейшего оксидирования. Последнее утверждение верно лишь для металлических пленок. Для структур MeO/GaAs начальная интерфейсная реакция — это именно стадия транзита кислорода от хемостимулятора компонентам подложки (данные ИКС, РФА), протекание которой при комнатной температуре практически исключено.

5) влияние толщины исходного слоя для всех систем однотипно и проявляется в сужении температурного интервала стабильного роста оксидных слоев. Для систем $\text{Me}(m)/\text{GaAs}$ эта закономерность связана с зависимостью интенсивности процессов испарения пленки от исходной толщины маскирующего слоя металла, а для MeO/GaAs — с зависимостью процессов растрескивания пленки (при трансформации оксидных слоев в преимущественно арсенатные) от исходного количества оксида-активатора.

6) Исследуемые нанометровые гетероструктуры представляют собой неравновесные системы, а использование «жесткого» магнетронного способа формирования контакта Me/GaAs и MeO/GaAs отодвигает систему еще дальше от равновесия. Как следствие этого наблюдаются некоторые нетипичные особенности химического поведения соединений, которые не могут быть описаны классическими представлениями, сформулированными для *bulk*-систем, в частности, образование нестабильных оксидов металлов Ni_2O_3 , Co_2O_3 , FeO . Явление стабилизации нехарактерных степеней окисления переходных металлов в данных системах обнаружено впервые. Аналогичные явления в других системах подробно рассмотрены и объяснены в обзорах^{1,2}.

С учетом специфики каждого из выбранных объектов, обусловленных особенностью химии того или иного элемента триады железа, химическими и кристаллохимическими свойствами их оксидов, особенностями их собственного разупорядочения, структуры исходной, растущей пленки и внутренней границы раздела, предложенная обобщенная схема (рис. 6) требует дополнений с последующим представлением индивидуальных пространственно-временных схем взаимодействий в тонкопленочных системах на основе арсенида галлия с нанесенными на его поверхность слоями металлов триады железа и их оксидов.

Для структур Me/GaAs вне зависимости от способа формирования контакта либо в процессе напыления, либо в начальные моменты окисления на интерфейсе происходит реакция между компонентами формируемой гетероструктуры

¹ Киселев Ю.М., Третьяков Ю.Д. Проблема стабилизации состояний окисления и некоторые закономерности Периодической системы элементов // Успехи химии. 1999 Т 68, №5 С 401—415

² Кауль А.Р., Горбенко О.Ю., Каменев А.А. Роль гетерозипитаксии в разработке новых тонкопленочных функциональных материалов на основе оксидов // Успехи химии. 2004 Т 73 №9 С 932—953

ры (исключение составляет $\text{Co}(\text{вт})/\text{GaAs}$) с образованием композиционно неоднородного переходного слоя $\text{Me}_x\text{Ga}_y\text{As}_z$. Установлено, что вследствие более высокой энергии магнетронно распыляемых частиц по сравнению с термически испаряемыми в вакууме, интенсивность взаимодействия для структур $\text{Me}(\text{м})/\text{GaAs}$ выше. Глубокое проникновение распыляемых металлических частиц вглубь подложки при магнетронном способе нанесения, приводит к возникновению дефектного интерфейса, результатом чего в конечном итоге является образование нестабильных оксидов Me_2O_3 в виде включений внутри фазы MeO . Именно незначительное разупорядочение на ГР Me/GaAs , сформированной вакуумно-термическим способом, приводит к росту стабильных (ожидаемых) оксидов металла — NiO и Co_3O_4 .

Таким образом, схема пространственно-временной эволюции $\text{Ni}(\text{м})/\text{GaAs}$ в ходе ее термического окисления с учетом специфики образования нескольких оксидов металлов, островковой структуры пленки может быть представлена в виде рис. 7.

При сравнении процессов оксидирования различных структур $\text{Me}(\text{вт})/\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ было установлена разница в транзитной передаче кислорода непосредственно мышьяку и через раскисление слоя арсенидов металла на энергию активации процесса. Более высокие значения ЭЭА (табл. 2) для процессов окисления структур $\text{Ni}(\text{вт})/\text{GaAs}$ и $\text{Ni}(\text{вт})/\text{InP}$ указывают на то, что изменение энергетики процесса термического оксидирования структур $\text{Ni}(\text{вт})/\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ по сравнению с окислением структур $\text{Co}(\text{вт})/\text{GaAs}$ обусловлено затратами на окисление слоя бинарных соединений в системе $\text{Me} - \text{B}^{\text{V}}$. Таким образом, с учетом отмеченных особенностей схемы окисления двух структур $\text{Me}(\text{вт})/\text{GaAs}$ можно представить в виде рис. 8.

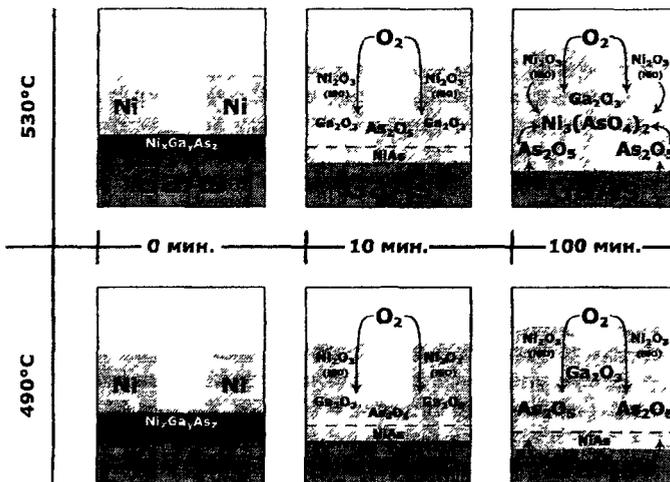


Рис. 7. Схема процессов, протекающих при окислении структур $\text{Ni}(\text{м})/\text{GaAs}$

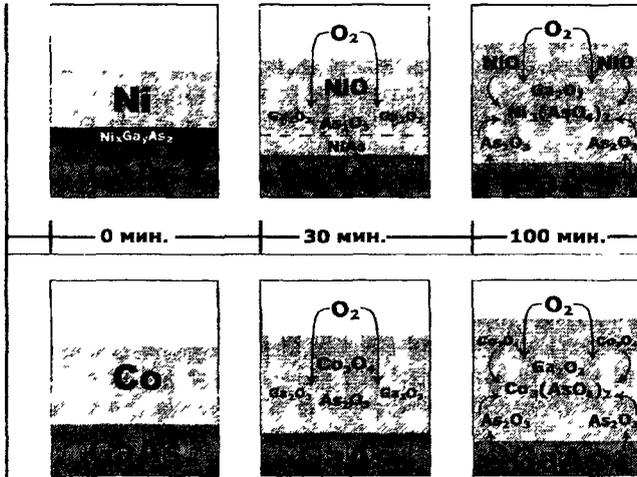


Рис. 8. Схема процессов, протекающих при окислении структур $Me(вт)/GaAs$

Возможность протекания транзита уже на начальных этапах окисления (см. уравнения (3)—(5)) обуславливает специфику твердофазных взаимодействий при термоокислении $MeO/GaAs$. Как следствие возможно ускоренное окисление компонентов полупроводника, по сравнению с другими процессами, исследованными в данной работе. Другой отличительной особенностью окисливания гетероструктур $MeO/GaAs$ является образование нестабильных оксидов Me_2O_3 не на начальных этапах процесса, как это наблюдалось для $Me(m)/GaAs$, а на развитых стадиях процесса, что обусловлено усилением процессов разупорядочения интерфейса в ходе термического окисления.

При сравнении процессов окисления $MeO/GaAs$ с окислением структур $Э_2O_3/GaAs$ ($Э = Sb, Bi$)^{3,4} было обнаружена важная особенность использованных в данной работе хемостимуляторов — склонность к вторичным взаимодействиям с оксидом мышьяка, приводящим к связыванию легколетучих As_2O_3 и As_2O_5 в арсенаты. Установлено, что с одной стороны это улучшает электрофизические свойства гетероструктур, с другой — исключает возможность катализа в данных системах, поскольку активаторы необратимо расходуются в той же реакции синтеза арсенатов.

Таким образом, выбор MeO ($Me = Fe, Co, Ni$), которые в ходе твердофазных превращений переходят в другие активаторы Me_2O_3, Me_3O_4 (в общем случае Me_xO_y , см. рис. 6), в качестве хемостимуляторов термического окисления арсенида галлия более обоснован, поскольку они могут работать сразу по двум

¹ Миттова И.Я., Свиридова В.В., Семенов В.Н. и др. Термическое окисление структур $GaAs/Bi_2O_3$ в кислороде // Изв. АН СССР Сер. Неорг. Материалы. 1990. Т. 26, № 10. С. 2013—2016.

² Миттова И.Я., Борзакова Г.В., Свиридова В.В. Термическое окисление структур $GaAs/Sb_2O_3$ в кислороде // Изв. АН СССР Сер. Неорг. Матер. 1989. Т. 25, № 8. С. 1244—1248.

компонентам полупроводника (уравнения реакций (3)—(7)), обеспечивать более полное окисливание арсенида галлия и, подавляя нежелательную стадию собственного транзита, уменьшать количество несвязанного мышьяка на внутренней границе раздела.

Учитывая небольшую разницу в механизме термоокисливания структур NiO(40 и 25)/GaAs и CoO(70 и 25)/GaAs, на что указывают как кинетические параметры сравниваемых процессов (табл. 2), так и близкий качественный состав окисленных структур (табл. 1), пространственно-временную схему процесса окисления структур MeO/GaAs можно изобразить в соответствии с рис. 9. При этом последнее состояние системы (после вертикальной штрихованной линии) описывает область резкого увеличения содержания арсенатов в слоях, сопровождающееся деградацией структуры, которое было отмечено в исследованном температурном интервале для структур CoO/GaAs.



Рис. 9. Схема процессов, протекающих при окислении структур MeO/GaAs

ВЫВОДЫ

1. Установлен механизм твердофазных взаимодействий при термоокислировании гетероструктур Me/GaAs и MeO/GaAs и показано, что основными химическими стадиями являются интерфейсное взаимодействие, хемостимулированное окисление компонентов полупроводника и вторичное взаимодействие между оксидами *d*-металла и мышьяка.
2. Показано хемостимулирующее действие оксидов металлов триады железа в процессе термического окисления арсенида галлия, состоящее в ускоренной по сравнению с собственным окислением GaAs передаче кислорода от оксида металла компонентам полупроводниковой подложки характеризующейся большим приростом концентрации оксида галлия уже на начальных этапах процесса (30 мин., РФА, ИКС). Эффективность активированного окисления As подтверждена образованием двух оксидов As₂O₃ и As₂O₅ (РФА, ИКС), отсутствием несвязанного мышьяка на ГР, формированием в ходе вторичных твердофазных взаимодействий арсенатов при за-

метном подавлении испарения оксидов мышьяка при средних температурах (480—520° С) (данные РФА, ИКС, ЭОС). Следствием всех этих факторов является улучшение свойств гетероструктур.

3. Определено влияние способа нанесения металла на кинетику окисления, состав, структуру и свойства полученных гетероструктур, состоящее в различной интенсивности интерфейсных взаимодействий в процессе формирования контакта Me/GaAs; при магнетронном напылении происходит интенсивное взаимодействие компонентов гетероструктуры на внутренней границе раздела, сопровождающееся значительным «размытием» контактной зоны (данные ЭОС, РФА); в ходе термического окисления переходный слой $Me_xGa_yAs_z$ трансформируется в арсениды; при вакуумно-термическом напылении взаимодействие металла и арсенида галлия либо менее интенсивно (NiAs для структур Ni(вт)/GaAs быстро разлагается, данные РФА), либо не наблюдается вообще (Co(вт)/GaAs).
4. Обнаружена стабилизация малохарактерной для никеля и кобальта степени окисления +3 при окислении гетероструктур Me(м)/GaAs, проявляющаяся в образовании оксидов Me_2O_3 (ИКС, РФА). При окислении структур Fe/GaAs на начальных этапах образуется оксид FeO, нестабильный в условиях эксперимента ($T < 570^\circ \text{C}$). Данные явления обусловлены уникальной спецификой объекта исследования — нанопленочные гетероструктуры, характеризующиеся значительным удалением от равновесия.
5. Установлена роль интерфейсных твердофазных реакций в процессе оксидирования структур Me/GaAs и MeO/GaAs; обнаружена разница в энергетике транзитной передачи кислорода от оксида металла непосредственно компонентам полупроводника и через стадию раскисления арсенида на границе раздела. Окисление гетероструктур Ni(вт)/GaAs, Ni(вт)/InP, где на внутренней границе раздела зафиксирована связь $Me-V^V$ (РФА, УМРЭС), характеризуется более высокими значениями эффективной энергии активации по сравнению с аналогичными процессами для структур MeO/GaAs и Co(вт)/GaAs, где связь $Me-V^V$ не обнаружена (> 300 кДж/моль для первых и < 150 кДж/моль — для вторых).
6. Показана аналогия влияния толщины нанесенного слоя металла и его оксида на закономерности твердофазных реакций при окислении структур Me/GaAs и MeO/GaAs, заключающаяся в уменьшении температурного интервала стабильного роста пленок при снижении толщин от 70—40 нм до 25 нм; процессы испарения для структур с низкой толщиной исходного слоя активатора (25 нм) наступают при более низкой температуре, чем для структур с более высокой толщиной (70—40 нм).
7. Дана общая схема процесса термического окисления арсенида галлия с нанесенными слоями никеля, кобальта, железа и их оксидов, отражающая их хемостимулирующее действие.
8. Представлены схемы процессов эволюции гетероструктур Me/GaAs и MeO/GaAs при их термическом окислении, учитывающие закономерности и химическую специфику металлов триады железа и их соединений, находящихся в нанопленочном состоянии.

Основное содержание диссертации изложено в работах:

1. Твердофазные взаимодействия при термическом оксидировании структур InP/Ni / И.Я. Миттова, А.Н. Прокин, В.Н. Гаврютин, **А.С. Сухочев**, В.М. Кашкаров // Неорганические материалы. — 2001. — Т. 37, №4. — С. 399—404.
2. Твердофазные превращения при термическом окислении гетероструктур Ni/GaAs / И.Я. Миттова, Е.В. Томина, **А.С. Сухочев**, А.Н. Прокин, А.О. Васюкевич // Микроэлектроника. — 2002. — Т. 31, №2. — С. 99—103.
3. Формирование многокомпонентных слоев при термооксидировании гетероструктур Co/GaAs / И.Я. Миттова, Е.В. Томина, **А.С. Сухочев**, А.О. Васюкевич // Неорганич. материалы. — 2003. — Т.39, №12. — С. 10—15.
4. Твердофазные превращения при термическом окислении гетероструктур CoO/GaAs / И.Я. Миттова, Е.В. Томина, А.О. Хорохордина, **А.С. Сухочев** // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. — 2004. — №9. — С. 69—72.
5. Гаврютин В.Н. Кинетика и механизм термического окисления структур Ni/InP в токе сухого кислорода / В.Н. Гаврютин, **А.С. Сухочев** // XXXVII Международная научная студенческая конференция «Студент и научно-технический прогресс»: тез. докл., Новосибирск, 1999. — С. 102—103.
6. Кинетика термического окисления структур Ni/InP и NiO/InP в сухом кислороде / **А.С. Сухочев** [и др.] // VII Международная конференция по физике и технологии тонких пленок МКФТТП—VII: тез. докл., Иваново-Франковск, 1999 г. — С. 36.
7. Термическое окисление фосфида индия с предварительно нанесенным слоем *d*-металла (Ni, Co) / **А.С. Сухочев** [и др.] // Всероссийская научно-техническая конференция «Новые материалы и технологии – НМТ-2000» тез. докл. — М., 2000. — С. 33—34.
8. Миттова И.Я. Термическое окисление гетероструктур Ni/GaAs / И.Я. Миттова, Е.В. Томина, **А.С. Сухочев** // VIII Международная конференция по физике и технологии тонких пленок МКФТТП—VIII: тез. докл., Иваново-Франковск, 2001. — С. 38—39.
9. Специфика воздействия нанесенных хемостимуляторов на кинетику и механизм термического окисления GaAs и InP / **А.С. Сухочев** [и др.] // Школа-семинар «Актуальные проблемы неорганического материаловедения»: тез. докл., Дубна, 2001. — С. 32.
10. Твердофазные взаимодействия при термическом окислении гетероструктур CoO/GaAs / **А.С. Сухочев** [и др.] // Всероссийская научно-техническая дистанционная конференция «Электроника»: тез. докл. — М., 2001. — С. 67.
11. Механизм эволюции гетероструктур на основе GaAs и InP с нанесенными слоями *d*-металлов / **А.С. Сухочев** [и др.] // Вторая Всероссийская конференция (с международным участием) «Химия поверхности и нанотехнология»: тез. докл., Санкт-Петербург — Хилово, 23—28 сентября 2002 г. — С. 159.
12. Термическое окисление структур Ni/GaAs при магнетронном способе нанесения никеля / **А.С. Сухочев** [и др.] // I Всероссийская конференция

- «Физико-химические процессы в конденсированном состоянии и на межфазных границах «ФАГРАН-2002»: тез. докл., Воронеж, 11—15 ноября. 2002 г. — С. 223.
13. Термическое окисление структур Ni/GaAs: влияние способа нанесения металла / А.С. Сухочев [и др.] // VIII Всероссийское совещание «Высокотемпературная химия силикатов и оксидов»: тез. докл., Санкт-Петербург, 19—21 ноября. 2002 г. — С. 159.
 14. Термическое окисление GaAs и InP, модифицированных оксидом кобальта / А.С. Сухочев [и др.] // IX Международная конференции по физике и технологии тонких пленок (МКФТТП-IX): тез. докл., Ивано-Франковск, 19—24 мая. 2003 г. — С. 166.
 15. Твердофазные взаимодействия при термоокислении структур Co/GaAs / А.С. Сухочев [и др.] // Международная конференции по физике и технологии тонких пленок (МКФТТП-IX): тез. докл., Ивано-Франковск, 19—24 мая. 2003 г. — С. 176.
 16. Сухочев А.С. Термическое окисление гетероструктур Co/GaAs и Co/InP / А.С. Сухочев, Е. В. Томина, В. Н. Гаврютин // Третья Международная научная конференция «Химия твердого тела и современные микро- и нанотехнологии»: тез. докл., Кисловодск, 14—19 сентября. 2003 г. — С. 34.
 17. Твердофазные взаимодействия при термическом окислении структур NiO/GaAs и CoO/GaAs / А.С. Сухочев [и др.] // Четвертая Международная научная конференция «Химия твердого тела и современные микро- и нанотехнологии»: тез. докл., Кисловодск, 19—24 сентября. 2004 г. — С. 14.
 18. Термическое окисление структур Fe/GaAs / А.С. Сухочев [и др.] // Четвертая Международная научная конференция «Химия твердого тела и современные микро- и нанотехнологии»: тез. докл., Кисловодск, 19—24 сентября. 2004 г. — С. 16.
 19. Твердофазные взаимодействия при термическом окислении структур d-металл/GaAs / А.С. Сухочев [и др.] // Всероссийская конференция «Химия твердого тела и функциональные материалы — 2004»: тез. докл., Екатеринбург, 25—28 октября. 2004 г. — С. 273.
 20. Термоокисление полупроводников $A^{III}B^V$, модифицированных оксидом никеля / А.С. Сухочев [и др.] // Всероссийская конференция «Химия твердого тела и функциональные материалы — 2004»: тез. докл., Екатеринбург, 25—28 октября. 2004 г. — С. 274.
 21. Мещерякова Е.К. Эволюция поверхности гетероструктур Ni/GaAs в процессе термического окисления / Е.К. Мещерякова, А.С. Сухочев // XLIII Международная научная студенческая конференция «Студент и научно-технический прогресс»: тез. докл., Новосибирск, 12—14 апреля. 2005 г. — С. 168.
 22. Процессы формирования многокомпонентных слоев термоокислением структур металл триады железа/арсенид галлия / А.С. Сухочев [и др.] // X Международная конференция по физике и технологии тонких пленок (МКФТТП-X): тез. докл. Ивано-Франковск (Украина), 16—21 мая. 2005 г. — С. 146.

23. Сухочев А.С. Термическое окисление GaAs с поверхностью модифицированной тонким слоем оксида кобальта / А.С. Сухочев, Е.К. Мещерякова, Е.В. Томина // Пятая Международная научная конференция «Химия твердого тела и современные микро- и нанотехнологии»: тез. докл., Кисловодск, 18—23 сентября. 2005 г. — С. 123.
24. Сухочев А.С. Взаимодействие тонких пленок оксида никеля с поверхностью арсенида галлия / А.С. Сухочев [и др.] // Пятая Международная научная конференция «Химия твердого тела и современные микро- и нанотехнологии»: тез. докл., Кисловодск, 18—23 сентября. 2005 г. — С. 24.

2006A
377

P - - 377