На правах рукописи

de la

ФИЛИМОНОВА НИНА ИВАНОВНА

МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВАЯ ЭПИТАКСИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЛОЕВ BaF₂/CaF₂/Si(100) ДЛЯ СТРУКТУР «ПОЛУПРОВОДНИК НА ДИЭЛЕКТРИКЕ»

Специальность 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Томск – 2011

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский Государственный технический университет»

 Научный руководитель доктор технических наук, профессор

 ВЕЛИЧКО Александр Андреевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор ИВОНИН Иван Варфоломеевич

> доктор технических наук, профессор ЧЕСНОКОВ Владимир Владимирович

Ведущая организация-; Учреждение Российской академии Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, 630090 г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13

Защита состоится: «15» июня 2011 г. в «15» часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.02 при ГОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, корпус, аудитория .

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «НИТПУ»

Автореферат разослан «12» мая 2011 г.

Ученый секретарь совета по защите докторских и кандидатских диссертаций доктор физико-математических наук,

Wh

Коровкин М.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность темы. Одним из перспективных направлений развития современной микро - и наноэлектроники является создание приборов и структур «полупроводник на изоляторе» (ПНИ), в том числе «кремний на изоляторе» (КНИ). Как показано в обзорах Мордковича, Кравченко и Будько технология приборов на основе КНИ и ПНИ структур и широкозонных подложек, таких как сапфир (КНС) карбид кремния, алмаз, нитриды галлия и алюминия, составляют основу «экстремальной электроники», функционирующей в условиях высоких (250-1000[°]C) температур, уровней радиационных воздействий, применяются для эксплуатации в системах с повышенными значениями показателей «напряжение плотность тока» и «мощность – частота». Интегральные микросхемы (ИС), сформированные на КНИ структурах, характеризуются высокими экономическими низким энергопотреблением, повышенной показателями, стойкостью, увеличением быстродействия, надёжностью. радиационной расширением рабочего температурного диапазона. Существует ряд методов формирования КНИ структур. К настоящему времени уровня промышленной технологии кроме КНС достигли два новых метода создания структур КНИ: SIMOX и Smart Cut. На сегодняшний день главным сдерживающим фактором для массового производства КНИ структур и приборов на их основе является их высокая стоимость и низкое качество диэлектрического слоя и, как следствие, слоев полупроводников, выращенных на них. Применение новых материалов и разработка новых технологий структур «полупроводник на диэлектрике» приведёт к снижению их стоимости и улучшению электрофизических параметров структур и приборов на их основе. Использование слоёв CaF₂ в качестве эпитаксиального изолирующего слоя позволяет получать структуры КНИ высокого качества, а диэлектрические слои переменного состава (Ca,Ba)F₂ являются хорошей подложкой для последующего роста высококачественных кремния, халькогенидов свинца и CdTe, поскольку механические слоев напряжения в такой структуре отсутствуют.

слои PbSnTe Сегодня выращивают преимущественно на монокристаллическом BaF₂(111), однако в этом случае невозможно создать ФПУ на одном кристалле вместе со схемой обработки, что приводит к гибридной конструкции ФПУ, обладающей очевидными недостатками. Монолитная конструкция ФПУ возможна при использовании кремниевых подложек, но, выращивание PbSe, и PbTe непосредственно на Si,приводит к плохой адгезии, низкому структурному совершенству и плохой морфологии слоев PbSnTe. Поэтому выращивание слоёв PbSnTe с высоким структурным качеством осуществляют на положках Si(111) при использовании в качестве буферных слоёв ВаF₂/СаF₂ Использование подложек Si(100) более перспективно, поскольку в структурах PbSnTe/(Ba,Ca)F₂/Si с ориентацией подложки (100) плотность поверхностных состояний и встроенный заряд оказывается почти на порядок меньше, чем в структурах с ориентацией (111). В структурах с ориентацией подложки Si(100) существенно более низкие значения токов утечки по боковым граням мезаструктур и существенно улучшается морфология слоев PbSnTe.

3

Актуальность данной работы определяется необходимостью комплексного исследования возможности получения структур Si/CaF₂/Si(100) и PbSnTe/BaF₂/CaF₂/Si(100) с целью создания монолитных интегральных ИК МФПУ.

Целью диссертационной работы является: Экспериментальное исследование условий формирования и роста диэлектрических буферных слоев CaF₂/Si(100), BaF₂/CaF₂/Si(100) и оптимизация технологических процессов их получения для ПНИ структур Si/CaF₂/Si(100), PbSnTe/BaF₂/CaF₂/Si(100) методом МЛЭ.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Исследовать влияние технологических режимов на процессы роста и особенности формирования морфологии слоев CaF₂ и BaF₂/CaF₂ на Si(100).

2. Изучить влияние микроморфологии поверхности кремниевых слоев на процессы зарождения, роста и формирования морфологии последующих слоев CaF₂ и BaF₂ на Si(100).

3. Получить тестовые полупроводниковые PbSnTe слои на буферных диэлектрических $BaF_{2}/CaF_{2}/Si(100)$ МЛЭ замкнутом слоях методом В технологическом цикле и определить электрофизические параметры полученных тестовых структур.

4. Исследовать влияние электронного пучка дифрактометра на морфологию поверхности пленок CaF₂/Si и PbSnTe в процессе МЛЭ.

5. Разработать конструкции приборов на структурах $Si/CaF_2/Si(100)$ и PbSnTe/BaF₂/CaF₂/Si(100).

Научная новизна работы:

1. Выявлено, что при высокотемпературной эпитаксии ($T_s=750^{\circ}C$) CaF₂ на поверхности Si (100) с высотой микронеровностей Zcp порядка 0,6 нм с увеличением толщины эпитаксиального слоя средняя высота микронеровностей поверхности CaF₂ практически не изменяется и имеет значения на порядок меньшие, в отличие от низкотемпературного режима роста ($T_s=500^{\circ}C$).

2. Установлено, что увеличение средней высоты микронеровностей поверхности Si(100) от 0,6 до 2,6 нм приводит в низкотемпературном режиме роста ($T_s=500^{\circ}C$) к зарождению островков CaF₂ и BaF₂ треугольной формы, ориентированных в двойниковой позиции по отношению к Si(100) в отличие от высокотемпературной эпитаксии ($T_s=750^{\circ}C$).

3. Предложен метод многостадийной твердофазной эпитаксии (ТФЭ) CaF₂ и BaF₂ на поверхности Si(100) с Zcp порядка 2,6 нм, заключающийся в многократных последовательных осаждениях при комнатной температуре слоёв толщиной менее 25 нм с последующим быстрым отжигом при прерванном росте в течение 30 секунд при $T_s = 900^{\circ}$ С, позволяющий получать монокристаллические пленки с высотой микронеровностей в 10 раз меньшей, чем у пленок, полученных на аналогичных подложках при других режимах эпитаксии.

4. Предложена трёхстадийная методика роста слоев BaF₂ на CaF₂/Si(100), состоящая из процессов эпитаксии при температуре подложки 750°C на

начальной и завершающей стадиях роста и промежуточной стадии осаждения при T_s =500C с отжигом, которая позволяет получить сплошные эпитаксиальные пленки BaF₂ с высотой микронеровностей Zcp не более 3нм в отличие от других режимов роста на тех же подложках.

5. Обнаружено, что воздействие электронного пучка ДБЭ на ростовую поверхность CaF_2 и PbSnTe в процессе МЛЭ приводит к одинаковому эффекту: резкому (от 30 до 150 нм) возрастанию высоты островков в зоне действия луча, которое невозможно объяснить только процессами радиолиза. Предложена качественная модель взаимодействия электронного пучка ДБЭ с поверхностью CaF_2 и PbSnTe на основе стимулированного электронным пучком процесса массопереноса.

Практическая значимость работы:

1. Разработаны и оптимизированы технологические процессы получения гетероструктур CaF₂ и BaF₂/CaF₂ на Si(100) в замкнутом технологическом цикле, которые вписываются в стандартные промышленные технологические маршруты, и имеют требуемые электрофизические параметры. Даны практические рекомендации по выбору режимов эпитаксии диэлектрических слоев.

2. Предложена технология многостадийной твердофазной эпитаксии (ТФЭ) для плёнок CaF₂/Si(100), и BaF₂/CaF₂/Si(100), с высотой микронеровностей в 10 раз меньше, чем у пленок, полученных на аналогичных подложках при других режимах эпитаксии.

3. Предложена трёхстадийная методика роста слоев BaF₂ на CaF₂/Si(100) которая позволяет получить сплошные пленки BaF₂ при сохранении морфологии с высотой микронеровностей Zcp не более 3нм.

4. Ha основе изучения параметров выращенных тестовых структур $Si/CaF_2/Si(100)$ разработаны конструкции: ёмкостного переключателя для радиочастотных сигналов, емкостного датчика давления, высокочувствительного предложен способ увеличения датчика теплового потока, а также его быстродействия. Проведён функционирования анализ предложенного переключателя для ВЧ сигналов и получены выражения, необходимые для проектирования МЭМ переключателей характеристиками. с заданными Разработана конструкция интегрального фотоприёмного многоэлементного устройства основе многослойной гетероэпитаксиальной на структуры PbSnTe/BaF₂/CaF₂/Si (100).

Достоверность результатов работы подтверждается многократным проведением экспериментов с применением различных апробированных методик исследования, воспроизводимостью полученных результатов и соответствием результатов автора данным, полученным в работах других исследователей.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Высокотемпературная эпитаксия CaF₂ при температуре подложки 750°C на поверхности Si(100) с высотой микронеровностей Zcp порядка 0,6 нм обеспечивает получение сплошных плёнок с Zcp менее 2 нм.

2. На подложках Si(100) с высотой микронеровностей Zcp порядка 2,6 нм снижение температуры эпитаксии от 750С до 500С приводит к изменению формы

островков зарождения CaF_2 с прямоугольной на треугольную, которая определяет форму островков зарождения последующих слоёв BaF_2 и СОТ. Средняя высота микронеровностей Zcp слоёв CaF_2 , полученных на поверхности Si(100) с высотой микронеровностей Zcp порядка 2,6 нм, возрастает практически одинаково как в высокотемпературном, так и в низкотемпературном режиме роста, от 10 до 50 нм.

3. На поверхности Si(100) с высотой микронеровностей Zcp порядка 2,6 нм, метод многостадийной твердофазной эпитаксии (ТФЭ) позволяет получить сплошные пленки с высотой микронеровностей в 10 раз меньшей, чем у пленок, полученных на аналогичных подложках при температурах эпитаксии T_s =500С и T_s =750С. В структурах BaF₂/CaF₂/Si(100), полученных методом многостадийной ТФЭ, наличие в диэлектрическом слое дополнительной границы раздела не приводит к увеличению встроенного заряда.

4. Воздействие электронного пучка ДБЭ на ростовую поверхность CaF₂ и PbSnTe в процессе МЛЭ приводит к деградации поверхности этих слоёв в зоне действия луча: к изменению формы и возрастанию высоты островков более чем в 3 раза.

5. Трёхстадийная методика роста слоев BaF_2 на $CaF_2/Si(100)$ позволяет получить сплошные пленки BaF_2 при сохранении морфологии с высотой микронеровностей Zcp не более 3нм в отличие от других режимов роста на тех же подложках. Трехстадийная методика включает в себя комбинацию высокотемпературного осаждения при температуре подложки 750°C на начальной и завершающей стадиях роста и промежуточной стадии осаждения при $T_s=500C$ с отжигом.

Апробация работы. Результаты, полученные в данной работе. докладывались и обсуждались на 5 конференциях: Информатика и проблемы коммуникаций. Межд. н-т конференция/ Новосибирск 26 апреля 2002; II Всеросс. н-т дистанционная конференция «Электроника» Москва 17 ноября-11 декабря 2003; Научно-техническая конференция «Кремний-2004», Иркутск, 5-9 июля; ученых:Труды Х конф. Конф. аспирантов И молодых по физике полупроводниковых, диэлектрических и магнитных материалов. – Владивосток: Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, 2006; III междунар. научно-практическая конференция «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» 14-17.03. 2007, Санкт-Петербург, Россия.

Личный вклад соискателя в диссертационную работу заключался в участии в постановке задач, получении экспериментальных образцов, проведении экспериментов и обработке экспериментальных данных, обсуждении результатов, оформлении статей и патентов. Все приведённые в работе результаты получены лично автором, либо при его непосредственном участии.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 17 печатных работах, в том числе 8 статей (из которых 6 входят в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ), 5 работ в материалах научно-технических конференций, получено 4 патента РФ на изобретение.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка цитируемой литературы. Полный текст занимает 234

страницы машинописного текста, включая 64 рисунка, 31 таблицу и список литературы из 117 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования. Определены цели и основные задачи работы

Приведены Первая носит обзорный характер. глава особенности выращивания структур CaF_2/Si И $BaF_2/CaF_2/Si$. a также COT. Анализ литературных большинство данных показал, что исследователей сконцентрировали усилия на изучении свои системы $CaF_2/Si(111)$. Это объясняется тем, что CaF₂(111) имеет меньшую (почти в два раза) поверхностную энергию и растёт на Si(111) в более широком диапазоне температур с хорошим кристаллическим качеством. Рост CaF₂ на Si(100) наблюдается в более узком температурном диапазоне и плёнки имеют фасетированную поверхность, что ухудшает кристаллическое качество последующего наращиваемого слоя кремния.

В промышленном производстве ИС используются кремниевые подложки ориентации (100). Это обусловлено как удобством скрайбирования, так и тем, что в структурах с ориентацией подложки (100) плотность поверхностных состояний оказывается почти на порядок меньше, чем в структурах с ориентацией (111). Кроме того, для реализации многослойных структур и структур «кремний на фториде» также более предпочтительными оказываются структуры с ориентацией (100), т.к. поверхностная энергия Si(111) больше, чем CaF₂(100), что приводит к грубой морфологии наращиваемого слоя кремния на подложке CaF₂/Si(111), в то время как на CaF₂/Si(100) кремний растет ламинарно. Как и для системы CaF₂/Si(111), для системы CaF₂/Si(100) различают два основных режима роста пленок фторидов на поверхности Si: высокотемпературный (выше 600°C) и низкотемпературный рост (ниже 600°С). При высоких температурах на гетерогранице CaF₂/Si возникает поверхностная химическая реакция, приводящая к диссоциации молекулы CaF₂, в результате которой происходит десорбция атома фтора, а на гетерогранице образуется тройной слой F – Ca – Si. Связь Ca – Si, которую ряд авторов (Olmstead M.A., Klust A., Wollschlager J) называют сильной, обеспечивает двумерный рост слоев CaF₂. Существует ограниченное число работ, посвящённых росту CaF₂ на Si(100). Нам известна только одна работа [1], в которой авторы исследовали морфологию слоев CaF₂ на подложках Si(100) и провели анализ химической связи CaF₂ - Si(100) на начальной стадии зарождения и роста от 1 до 3 монослоев (МС) (0,5-1,5 нм). Но для практического применения в структурах «полупроводник на диэлектрике» необходимы сплошные более толстые пленки с толщиной несколько десятков монослоёв. Исследование морфологии поверхности и свойств толстых плёнок фторида кальция толщиной порядка десятков нм ни в одной работе проведено не было. Следовательно, для многослойных структур типа «кремний на диэлектрике» и «полупроводник на диэлектрике» необходимо разработать технологические процессы получения CaF_2 и BaF_2/CaF_2 Si(100), совместимых диэлектрических слоёв на co стандартными технологическими процессами и обеспечивающих низкие (порядка см⁻²) значения величин встроенного заряда, плотности поверхностных 10^{11}

состояний, высокие значения удельного сопротивления и поля пробоя изолятора (не менее 10^{13} ом см и 5 10^6 – 10^7 В/см, соответственно) и хорошую морфологию поверхности (высота неоднородностей не более 10 нм). Использование в качестве буферных слоёв фторидов ЩЗМ позволит получить на подложке Si(100) в замкнутом технологическом цикле по стандартной технологии практически любые полупроводниковые соединения групп A₃B₅, A₂B₆ и A₄B₆. Одним из наиболее перспективных материалов современной ИК оптоэлектроники являются модифицированные сплавы халькогенидов свинца, которые на Ba(100) растут по двумерному механизму, в то время как на Ba(111) – по трёхмерному.

На основе сравнительного анализа КНИ – структур сделаны выводы, что структуры «кремний на фториде» (КНФ), полученные методом МЛЭ обладают достаточной механической, химической и термической стойкостью, не уступают по электрофизическим параметрам, существующим КНС, SIMOX, Smart Cut и DeleCut структурам, но имеют более низкую стоимость [2] и вписываются в стандартные технологические маршруты. На основе проведённого анализа литературных данных сформулированы основные цели и задачи исследования.

Во второй главе приводится описание технологической установки МЛЭ и методики контроля параметров эпитаксиальных структур, методов исследования электрофизических параметров и морфологии поверхности гетероструктур. Все исследуемые структуры были получены в двухмодульной установке МЛЭ «Ангара». Установка МЛЭ «Ангара» была разработана и изготовлена в ИФП СО РАН и включает в себя модуль эпитаксии полупроводников и диэлектриков, модуль эпитаксии полупроводниковых соединений, аналитический модуль, модуль загрузки-выгрузки и блок форвакуумной откачки. После стандартной обработки подложки Si(100) помещались химической модуль В роста диэлектрических слоев и кремния, где отжигалась при $T_s = 900^{\circ}C$ до получения от подложки кремния сверхструктуры (2×1) на экране дифрактометра, а затем температура подложки снижалась до ростовой T_s, открывалась заслонка молекулярного источника и осаждалась пленка CaF₂. Температура подложки, после предварительной калибровки по плавлению пленок металлов на поверхности кремния, контролировали по величине тока нагревательного Морфология поверхности образцов исследовалась элемента подложки. помощью атомно-силового микроскопа (ACM) Solver P47H (производство фирмы NT-MDT г. Москва) в полуконтактном режиме. При обработке ACM изображений нами использовались в зависимости от ситуации функции «Flatten correction 1D» и «Flatten correction 2D». Для количественной характеристики ACM изображений использовались такие параметры шероховатости изображения как средняя высота микронеровностей и средняя шероховатость поверхности изображения (average roughness). Электрофизические свойства плёнок CaF₂/Si(100) и BaF₂/CaF₂/Si(100) оценивались методом высокочастотных C-V характеристик на частоте 1 МГц при комнатной температуре. Развертка напряжения производилась от обеднения к обогащению. Измерения C-V- характеристик плёнок CaF₂/Si(100) проводились с площадью контакта 7,854·10⁻³ см². Измерения С-V- характеристик плёнок ВаF₂/CaF₂/Si(100) проводились с использованием ртутного зонда с площадью

контакта 3·10⁻⁴ см² и 3,7·10⁻⁴ см². Удельное сопротивление образцов PbSnTe/BaF₂/CaF₂/Si(100) оценивалось методом Ван-дер-Пау, подвижность и концентрация носителей с помощью эффекта Холла.

В третьей главе приведены экспериментальные данные по исследованию: 1) морфологии поверхности структур CaF₂/Si(100) в зависимости от режимов роста, от морфологии нижележащего слоя, 2) влияния ДБЭ на морфологию фторида кальция в процессе роста, электрофизических параметров структур И $Si/CaF_2/Si(100),$ 3) предложены варианты использования $CaF_2/Si(100)$ эпитаксиальных структур CaF₂/Si(100) и Si/CaF₂/Si(100) в качестве основы для ёмкостного переключателя ВЧ сигналов, ёмкостного датчика давления и датчика теплового потока. 4) рассмотрены возможные конструкции данных датчиков и метод повышения быстродействия датчика теплового потока. Были получены эпитаксиальные слои CaF₂ различной толщины на подложках Si(100) в низкотемпературном ($T_s = 500^{\circ} C$) и высокотемпературном режимах ($T_s = 750^{\circ} C$) роста. Технологические режимы роста слоёв CaF₂ образцов серии В приведены в таблице 3.1.

	1 1		
Номер	Температура подложки,	Эффективная толщина	7
образца	Ts°C	плёнки, нм	Z _{CP} , HM
B1	500	~30	~34
B7	500	~60	~10
B2	750	~30	~1,24
B9	750	~60	~1,62

Таблица 3.1 Технологические режимы роста слоёв CaF₂ (серия В)

В разделе 3.1 показано, что при низких температурах роста ($T_s \approx 500^{\circ}$ C) формируются островки фторида кальция, имеющие в основании прямоугольник со сторонами, ориентированными вдоль направлений [110] и [1 $\overline{10}$] длиной ~2 мкм, шириной ~1 мкм высотой порядка 34 нм при эффективной толщине плёнки 30 нм. Показано, что при увеличении толщины плёнки вдвое (до 60 нм) достигается полная коалесценция островков, средняя высота микронеровностей поверхности уменьшается в 3 раза и не превышает 10 нм. В отличие от низкотемпературного режима роста, для эпитаксиальных пленок CaF₂, полученных при T_S=750°C, коалесценция островков наступает уже толщине 30 нм. при полная Прямоугольные (практически квадратные) островки роста высотой до 2 нм, шириной и длиной 100-150 нм, равномерно покрывают подложку Si(100). Стороны островков ориентированы вдоль направлений [110] и [110], средние значения высот микронеровностей поверхности порядка 1 нм, что сравнимо по порядку величины с исходной морфологией нижележащего слоя кремния. Показано, что при увеличении толщины слоя CaF₂ вдвое (до 60 нм) средняя высота микронеровностей Z_{cp} практически не изменяется и имеет значения на порядок меньшие, чем при низкотемпературном режиме роста.

Известно, что в многослойных структурах Si/CaF₂/Si наблюдается тенденция ухудшения морфологии каждого последующего слоя по сравнению с морфологией нижележащего слоя. Снижение высоты микронеровностей поверхности CaF₂/Si(100) от 40 до 5 нм позволит существенно улучшить качество наращиваемого слоя Si, т.к. плохая морфология поверхности CaF₂(100) является

причиной резкого увеличения размеров дефектов поверхности наращиваемого слоя Si и формирования в нём двойников [2]. Поэтому при росте последующего слоя фторида кальция на Si/CaF₂/Si(100) возникают проблемы, связанные с наличием дефектов поверхности эпитаксиального слоя CaF₂. Поскольку вид и свойства этих дефектов поверхности существенно зависят как от условий роста, так и от морфологии нижележащего слоя, то с целью выяснить влияние морфологии поверхности нижележащего слоя Si на морфологию поверхности последующего слоя CaF₂, были выращены без буферного слоя Si слои CaF₂ на подложках Si(100), имеющих среднюю высоту микронеровностей порядка 2,6 нм (образцы серии A). Технологические режимы роста слоёв CaF₂ образцов серии A приведены в таблице 3.2.

ruotinga 5.2 romotionn roomie ponumer poeta ences cur 2 (copini ri)				
Номер образца	Температура подложки, Т _s °C	Эффективная толщина плёнки,	Z _{СР,} нм	
		НМ		
A49	750	~12	~9	
A55	750	~200	~54	
A51	500	~8	~15	
A50	500	~25	~25	
A52	500	~75	~45	

Таблица 3.2 Технологические режимы роста слоёв CaF₂ (серия А)

Эпитаксиальные плёнки CaF₂ различной толщины были получены в низкотемпературном ($T_s=500^{\circ}C$) и высокотемпературном режимах ($T_s=750^{\circ}C$) роста. Обнаружено, что в низкотемпературном ($T_s=500^{\circ}C$) режиме роста среднее значение высоты микронеровностей поверхности Z_{cp} плёнок CaF₂, полученных на подложках серии A, составляет 25 нм (рис.1(б)), что по порядку величины совпадает с Z_{cp} низкотемпературных плёнок аналогичной толщины, полученных на гладкой поверхности Si. В то время как форма островков имеет необычную для роста на Si(100) треугольную форму, одна из сторон треугольников ориентирована вдоль направления [110] (рис.1 а).



Рис.1. а - АСМ изображение морфологии поверхности низкотемпературного образца А 50 CaF₂/Si(100), б- статистическое распределение высот микронеровностей поверхности. Эффективная толщина 25 нм.

Известно, что треугольные островки роста CaF₂ характерны для роста на поверхности кремния ориентации (111). Чтобы определить, не зависит ли

«треугольная» форма островков от толщины образца, были получены плёнки с эффективной толщиной 8 нм (почти в 3 раза меньшей) и 75 нм (в 3 раза большей). Эксперименты показали, что форма островков с изменением толщины плёнки не меняется. При этом с увеличением толщины слоя рост островков CaF₂ происходит преимущественно за счёт нормальной компоненты скорости роста, а степень подложки практически не меняется. Наблюдается зарождение покрытия вторичных островков на поверхности уже имеющихся. При эффективной толщине плёнки порядка 75 нм, полной коалесценции островков ещё не происходит. Обнаружено, что с увеличением толщины эпитаксиального слоя CaF₂ Z_{cp} среднее значение высоты микронеровностей поверхности низкотемпературных плёнок, полученных на подложках серии А, возрастает, в отличие от Z_{cp} низкотемпературных плёнок, полученных на подложках серии В. Шероховатость поверхности ΔZ также возрастает с увеличением толщины плёнки.

Известно, что в низкотемпературном режиме роста взаимодействие слоя CaF₂ и Si осуществляется, в основном, через связь F – Si, и можно было бы ожидать, что треугольные островки имеют кристаллографическую ориентацию (111). Для выяснения причин появления островков треугольной формы были проведены электронографические исследования их кристаллической структуры в ИΦП Исследования показали, CO PAH. что островки являются монокристаллическими и ориентированы по (100) в двойниковой позиции по отношению к подложке (100). Показано, что Z_{cp} возрастает с увеличением эпитаксиального слоя CaF_2 практически одинаково, толщины как низкотемпературном, так и в высокотемпературном режимах роста. Но в отличие от низкотемпературной эпитаксии на подложках серии А, при высоких температурах роста (T_s ≈ 750°C) формируются островки фторида кальция, имеющие в основании прямоугольник со сторонами, ориентированными вдоль направлений [110] и [110] высотой 8-10 нм и латеральными размерами порядка 200-300 нм при эффективной толщине плёнки ~12 нм. При толщинах более 100 нм значения Z_{ср} достигают 50-60 нм для любых температурных режимов. Это означает, что получение многослойных наноструктур CaF₂-Si толщиной 10-15 нм при данных методах роста невозможно. Поэтому необходимо было найти такие методы получения монокристаллических многослойных структур, при которых значения Z_{ср} каждого последующего слоя не превышают 5-6 нм.

Для этого разработана технология «многоступенчатой» твердофазной эпитаксии, которая позволила почти в 10 раз снизить высоту микронеровностей поверхности, снизить требования к морфологии поверхности нижележащего слоя (в том числе к подложке) и получить возможность формировать многослойные наноструктуры. Последовательное осаждение при комнатной температуре тонких (порядка 10-25 нм) слоёв CaF₂ с последующим быстрым отжигом при T \approx 900°C позволило получить монокристаллические плёнки толщиной в десятки нм (65 нм) с Z_{ср} не превышающим 6 нм (рис.2).

Одним ИЗ основных методов контроля технологического процесса в технологии МЛЭ является дифракция быстрых электронов (ДБЭ) на отражение. В отличие от комнатных, при ростовых температурах 500 - 750°С обнаружено сильное влияние пучка электронов морфологию дифрактометра на поверхности CaF₂, что сильно модифицирует поверхность и затрудняет интерпретацию дифракционных картин.



Рис.3 Средняя высота микронеровностей в зависимости от положения исследуемых точек; 1 – для 1 го типа неоднородностей 2 - для 2 го типа неоднородностей



Рис.2.Статистическое распределение высот микронеровностей поверхности образца А56 (ТФЭ) Толщина плёнки 65 нм.

Показано, что в области воздействия электронного луча размеры и форма островков претерпевают значительные изменения. Происходит трансформация формы островков от преимущественно «треугольников», плоских на которых поверхности имеются отдельные трехмерные образования, до высоких куполообразных объемных «торосов» с длиной основания 1-2 мкм и высотой ДО 100-200 HM. Ha рис.3 показана зависимость размеров морфологических дефектов ОТ интенсивности воздействия

электронного луча поперёк полосы электронного сканирования.

Предложена качественная модель взаимодействия электронного пучка ДБЭ с поверхностью фторида кальция, приведены оценки, характеризующие воздействие электронного пучка на поверхность образца. Показано, что изменение формы и увеличение средней высоты островков объясняется не только явлением радиолиза, но и массопереносом молекул CaF₂ под действием пучка. Значительное отличие морфологии экспонированной электронного электронами поверхности от не экспонированной приводит к выводу о неадекватности наблюдаемых в этом случае картин ДБЭ невозмущенной структуре поверхности фторида кальция.

Электрофизические параметры структур CaF₂/Si(100) (величина заряда в диэлектрике и плотность поверхностных состояний) оценивались методом C-V-C-V характеристик. Измерения высокочастотных высокочастотных характеристик проводились на частоте 1 МГц с площадью контакта 7,854·10⁻³ см⁻² при комнатной температуре. Предложенный метод многостадийной твердофазной эпитаксии, по сравнению с другими режимами эпитаксии CaF₂, обеспечивает значения плотности поверхностных состояний, которые минимальные не

 10^{11} cm⁻². $Q_{SS} = 0.43$ Структуры $CaF_2/Si(100)$ удовлетворяют превышают требованиям, предъявляемым к диэлектрикам в современном производстве, вписываются в стандартные промышленные технологические маршруты и имеют промышленными КНИ структурами электрофизические сопоставимые С параметры. Были получены методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) в структуры Si/CaF₂/Si(100) замкнутом тестовые (КНФ). цикле Толшина диэлектрика в КНФ структуре составляла 0,3 мкм, толщина эпитаксиального слоя кремния -0,1 мкм. Для оценки подвижности носителей в эпитаксиальном слое кремния на подложке CaF₂/Si(100) имплантацией ионов бора были сформированы тестовые резисторы. Энергия ионов составляла 30 кэВ, усреднённая по толщине проводящего слоя концентрация легирующей примеси в эпитаксиальном слое была порядка 1×10¹⁸ см⁻³. Интегральная удельная проводимость резистивного кремниевого слоя составила 32,93 (Ом · см)⁻¹. Используя усреднённые по толщине проводящего слоя значения проводимости и концентрации была сделана оценка подвижности дырок в слое кремния, которая при комнатной температуре составила 205,83 см²/(В с). КНФ структуры отличаются более низкой стоимостью и являются очень перспективными с точки зрения доступности исходного материала, резкого снижения числа технологических процессов в сочетании с максимальным использованием существующего стандартного технологического оборудования и техпроцессов.

Это позволило разработать конструкции и методы изготовления приборов на основе Si/CaF₂/Si(100) структур. Были разработаны следующие конструкции: 1) ёмкостный датчик давления и 2) датчик теплового потока. Преимуществом слоя CaF₂, который снижает этих конструкций является использование гладкую теплопроводность подложки, обеспечивает более поверхность эпитаксиального слоя монокристаллического кремния, является стоп-слоем при травлении и обеспечивает большую чувствительность датчика. Быстродействие теплового датчика обеспечивается способом, использующим прогиб мембраны электрического поля, что позволяет добиться быстрого под действием выравнивания температуры горячего и холодного спаев термопар. Ёмкостный датчик давления на структуре Si/CaF₂/Si также использует прогиб мембраны и изменение емкости под действием давления. Рассмотрена возможность создания ёмкостного переключателя для радиочастотных сигналов, в котором в качестве диэлектрика предлагается использовать CaF₂. Проведён анализ функционирования переключателя для ВЧ сигналов и получены выражения, необходимые проектирования МЭМ переключателей для с заданными характеристиками.

В четвёртой главе изложены результаты исследования морфологии поверхности структур BaF₂/CaF₂/Si(100) в зависимости от условий роста, а также результаты исследования влияния морфологии поверхности нижележащего слоя кремния на морфологию поверхности BaF₂. Приведены экспериментальные данные электрофизических свойств структур BaF₂/CaF₂/Si(100). Предложена конструкция МФПУ ИК диапазона на основе эпитаксиальных структур PbSnTe/BaF₂/CaF₂/Si(100), приведены основные результаты исследования

13

морфологии поверхности И электрофизических параметров структур PbSnTe/BaF₂/CaF₂/Si(100) в зависимости от условий роста. В разделе 4.1 изложены результаты исследования морфологии поверхности плёнок BaF₂, выращенных на поверхности слоёв CaF₂/Si(100), осаждённых в низкотемпературном (T_s=500°C) и высокотемпературном (T_s=750°C) режимах роста. В образцах B8, B10, B11 плёнки ВаF₂ выращивались на буферных слоях CaF₂, осаждённых на Si(100) при одинаковых условиях ($T_s = 500^{\circ}$ C), и имеющих толщину порядка 15 нм. Режимы роста слоёв BaF₂ на подложках CaF2/Si(100) варьировались с целью получения обеспечивающих гладкую режимов морфологию оптимальных роста, поверхности и хорошие электрофизические параметры. Технологические режимы роста слоёв ВаF₂ образцов В8, В10, В11 приведены в таблице 4.1.

Номер	Температура подложки	Эффективная толщина	Z _{cp} ,
образца	(BaF ₂), $T_S^{o}C$	плёнки, нм	HM
B8	$T_{S1} = 500^{\circ}C$	~50	
	Т _{отж} =850 ⁰ С		
	$T_{S2} = 750^{0}C$	~50	~8
	Общая толщина плёнки	100	
B10	$T_{S1} = 750^{0}C$	~25	
	$T_{S2} = 500^{\circ}C$	~50	
	Т _{ОТЖ} =850 ⁰ С		~3
	$T_{S3} = 750^{0}C$	~150	
	Общая толщина плёнки	225	
B11	$T_{S1} = 500^{0}C$	~75	
	Т _{ОТЖ} =850 ⁰ С		
	$T_{S2}=650^{0}C$	~150	~140
	Общая толщина плёнки	225	

Таблица 4.1 Технологические режимы роста слоёв BaF₂.

Во всех случаях отжиг проводился при прерванном росте при температуре 850° С в течение 10 минут. Показано что, не смотря на низкотемпературный режим осаждения CaF₂, использование отжигов и высокотемпературного режима (T_s = 750°C) на завершающей стадии роста BaF₂ приводит к получению гладкой поверхности с Z_{cp}=8 нм (B8) и Z_{cp}=3 нм (B10)(рис.4).



Рис.4. Образец BaF₂/ CaF₂/Si(100) B10.a- 3D ACM изображение морфологии поверхности, б - статистическое распределение высот микронеровностей

В то же время рост BaF_2 на завершающей стадии роста при $T_s=650^{\circ}C$ приводит к незарастающей грубой морфологии поверхности с $Z_{cp}=140$ нм и проколами практически до подложки.

В образцах В4, В5 и В6 плёнки BaF_2 выращивались на поверхности слоёв $CaF_2/Si(100)$, осаждённых в высокотемпературном режиме при $T_s=750^{\circ}C$, и имеющих толщину порядка 15 нм. Режимы роста слоёв BaF_2 образцов В4, В5, В6 приведены в таблице 4.2.

	1	1	
Номер	Температура подложки	Эффективная	Z _{cp} ,
образца	(BaF ₂), $T_S^{o}C$	толщина плёнки, нм	HM
B4	$T_{S1} = 750^{\circ}C$	~50	7
	Общая толщина плёнки	50	
	$T_{S1} = 600^{\circ}C$	~25	
B5	Т _{ОТЖ} =750 ⁰ С		0
	$T_{S2} = 750^{\circ}C$	~25	~9
	Общая толщина плёнки	~50	
	$T_{S1} = 600^{\circ}C$	~100	
B6	Общая толщина плёнки	~100	~62

Таблица 4.2 Технологические режимы роста слоёв ВаF₂

Обнаружено, что высокотемпературный рост CaF_2 ($T_s=750^{\circ}C$) и последующий высокотемпературный рост BaF_2 ($T_s=750^{\circ}C$) (независимо от наличия отжигов) приводят к получению гладких плёнок (B4) с $Z_{cp}=7$ нм, а рост BaF_2 при $T_s=600^{\circ}C$ приводит к появлению большого количества микроотверстий, именуемых в литературе pin-hole (рис.5). Сделан вывод, что завершающая стадия роста BaF_2 независимо от температуры роста $T_s CaF_2$ всегда должна быть не ниже $T_s=750^{\circ}C$.

В разделе 4.2 изложены результаты исследования влияния морфологии поверхности нижележащего слоя кремния на морфологию поверхности BaF_2 , изложены экспериментальные данные электрофизических свойств структур $BaF_2/CaF_2/Si(100)$. С целью выяснения влияния морфологии нижележащего слоя Si на морфологию последующих слоёв BaF_2 на $CaF_2/Si(100)$ осаждение фторидов производилось последовательно на поверхность Si(100), имеющего микронеровности поверхности до 3 нм, при $T_s=500^{\circ}C$ (образец A42).



Рис. 5. Структура BaF₂/ CaF₂/Si(100) B6, а – 3D ACM изображение морфологии поверхности; б - статистическое распределение высот микронеровностей.

Осаждение CaF₂ при T_S =500°C и последующие осаждение BaF₂ (T_S =500°C) (на CaF₂/Si(100)) привело к сглаживанию поверхности. В тоже время ACM показало резкое ухудшение морфологии и наличие треугольных островков, которые представляют собой практически «сросшееся плато». Экспериментально обнаружено, что в низкотемпературном режиме роста BaF₂/CaF₂/Si(100) на подложках с микронеровностями исходной поверхности кремния до 3 нм, форма зародышей BaF₂ определяется на стадии роста фторида кальция, что приводит к появлению островков треугольной формы.

Необходимость получить гладкую поверхность BaF₂ независимо от морфологии поверхности исходной подложки Si, или морфологии поверхности нижележащих слоёв диэлектриков в многослойных структурах, привела к выбору ТФЭ в качестве основного метода роста. Именно поэтому при отработке процессов ТФЭ использовались подложки Si(100) без буферного слоя с $Z_{cp}=3$ нм, на которых обычные методы дают самые низкие результаты. В образцах серии A41 CaF₂ и BaF₂ последовательно осаждались при комнатной температуре с последующими отжигами после каждого осаждения в течение 30 с при T_S ~ 900°С. Показано, что поверхность однородно покрыта микронеровностями в виде островков с латеральными размерами порядка 50-58 нм и средней высотой до 3 (рис.б), что по порядку величины сравнимо со средней высотой HM микронеровностей исходной подложки кремния. Сделан вывод о преимуществе многостадийного процесса ТФЭ для получения морфологически гладких плёнок $BaF_2/CaF_2/Si(100)$.

С целью доказательства преимуществ процесса ТФЭ были проведены исследования С-V характеристик на структурах серии А41 и А42, полученных на подложках с грубой морфологией поверхности кремния.



Рис.6 Образец BaF₂/CaF₂/Si(100) A41 а - АСМ изображение морфологии поверхности; б - статистическое распределение высот микронеровностей на поверхности образца A41.

Данные экспериментов приведены в таблице 4.3. Показано, что образцы, в которых оба диэлектрика получены методом ТФЭ (A41) имеют более высокие электрофизические параметры, чем образцы, в которых оба диэлектрика получены в низкотемпературном режиме (серии A42).

Наличие в диэлектрическом слое дополнительной границы раздела в структурах BaF₂/CaF₂/Si (100), полученных методом ТФЭ, не приводит к увеличению встроенного заряда.

ruomingu 1.5 Snekripownish teekne napamerpis oopusidob rriti n rri2 nph rhetepeshee					
№ образца	Тип структуры	Толщины	Q _F	Qss	ΔU_{FB}
		слоев	CM ⁻²	см ⁻²	(B)
		(нм)			
A41	$BaF_2/CaF_2/Si(100)$	17,5	$(0,4-3)\cdot 10^{11}$	$\sim 1,3.10^{11}$	1,75
A42	$BaF_2/CaF_2/Si(100)$	130	$(2,2-6,7)\cdot 10^{11}$	$3,2\cdot10^{11}$	8,89

Таблица 4.3 Электрофизические параметры образцов А41 и А42 при гистерезисе

Величина плотности поверхностных состояний и фиксированного заряда в диэлектрике в структурах, полученных методом ТФЭ, не превышает аналогичные параметры получаемые в таких промышленных структурах как Dele Cut, Smart Cut и SIMOX.

Как указывалось, наиболее перспективным является направление создания интегральных ФПУ на одном кристалле вместе со схемой обработки на Si. Для разработана конструкция интегрального этого была многоэлементного монолитного фотоприёмного устройства инфракрасного диапазона содержащего элементы, выполненные фоточувствительные эпитаксиальном В слое фоточувствительного полупроводника расположенного на диэлектрической подложке BaF₂/CaF₂/Si, и схему обработки, выполненную в эпитаксиальном слое

Si, расположенном на диэлектрическом CaF₂ слое расположенного на той же подложке (рис.7).При ЭТОМ фоточувствительные элементы И мультиплексоры сформированы В едином технологическом цикле на одной (планарной) стороне Si подложки.

МонокристаллическийBaF2хорошоподходитдляэпитаксииPbSnTeвследствиеотносительномалого



Рис.7.Конструкция интегрального многоэлемент-ного фотоприёмного устройство инфракрасного диапазона:

рассогласования параметров кристаллических решеток пленки и подложки (+4,2% между PbTe и BaF₂) и практически одинаковых значений коэффициентов термического расширения (КТР).

Для реализации разработанной конструкции ФПУ были получены тестовые гетероструктуры Pb_{0.7}Sn_{0.3}Te/BaF₂/CaF₂/Si(100). Гетероструктуры были выращены в замкнутом технологическом цикле в двухмодульной установке молекулярнолучевой эпитаксии (МЛЭ) «Ангара», описанной в главе 2. Рост производился путем сублимации шихтового материала нужного состава при температурах подложки в диапазоне ~300-400°C при величине молекулярного потока PbSnTe, соответствующей скорости роста ~1 мкм/час в низкотемпературном диапазоне. Температура источника теллура 300-350°C. Сразу же после начала роста PbSnTe дифрактограмма трансформировалась в систему точечных рефлексов, которые при увеличении толщины слоя PbSnTe вытягивались в тяжи.



Рис. 8 Образец PbSnTe/BaF₂/CaF₂/Si(100) A34 а - ACM изображение морфологии поверхности; б - статистическое распределение высот микронеровностей на поверхности образца A34.Толщина 2,7 мкм.

Анализ АСМ изображений морфологии поверхности плёнок PbSnTe на показал, морфологических $BaF_{2}/CaF_{2}/Si(100)$ что средняя высота микронеровностей поверхности уменьшается с увеличением толщины плёнки (рис.8). Эксперименты также показали, что скорость роста PbSnTe сильно зависит от температуры подложки (рис.9). Скорость роста остается практически постоянной вплоть до температуры 350°С, а при дальнейшем увеличении температуры подложки резко падает. Уменьшение скорости роста связано с процесса реиспарения (ресублимации) СОТ, что началом соответствует литературным данным. Из литературы также известно, что при этом возможно обеднение поверхности теллуром. Расхождение экспериментальных данных с расчетными в диапазоне температур порядка 400 С, может быть связано с неконтролируемыми процессами реиспарения.

В структурах PbSnTe/BaF₂/CaF₂/Si(100), полученных при температуре подложки $T_{s} = 350^{\circ}C$, при нанесении контактов наблюдалось часто отслаивание эпитаксиального слоя PbSnTe, также в наблюдалось этих структурах отслаивание контактов вместе с плёнкой температуре при жидкого азота. В структурах $PbSnTe/BaF_2/CaF_2/Si(100),$ полученных при температуре подложки T_S= 400⁰C, отслаивания эпитаксиального слоя нанесении при контактов не наблюдалось, также и при температуре жидкого азота в данных структурах не



Рис. 9. Зависимость нормированной скорости роста от температуры подложки. Линия – теоретический расчет.

наблюдалось отслаивание плёнки PbSnTe. В разделе 3.3 главы III было рассмотрено влияние электронного пучка дифрактометра ДБЭ на морфологию поверхности структур CaF₂/Si(100) и было показано, что под действием

электронного пучка поверхность фторида кальция, может необратимо деградировать. Аналогичное явление было обнаружено под воздействием электронного пучка на поверхность PbSnTe/BaF₂/CaF₂/Si(100), приводящее к наличию характерных следов на поверхности PbSnTe, хорошо различимых визуально. Обнаружено, что под действием электронного пучка примерно в 3 раза возрастает высота морфологических микронеровностей поверхности СОТ относительно необлученной поверхности, меняется не только размер, но и форма морфологических микронеровностей. Оценки, характеризующие воздействие электронного пучка на поверхность образца, показывают, что энергии одного электрона 0,15 эВ может оказаться достаточно для отрыва одной молекулы, но недостаточно для её диссоциации. Показано, что в каждом отдельном случае нужно учитывать возможность полной десорбции эпитаксиальной плёнки под действием луча дифрактометра в зависимости от дозы луча и энергий связи, сублимации и диссоциации молекул поверхности.

Удельное сопротивление образцов оценивалось методом Ван-дер-Пау. Анализ полученных данных показал, что удельное сопротивление образцов зависит от температуры подложки. С увеличением температуры подложки Ts удельное сопротивление эпитаксиальных плёнок PbSnTe возрастает. По нашему мнению, это связано с возникновением структурных и стехиометрических Действительно, данные высокоразрешающей дефектов слоях PbSnTe. В просвечивающей электронной микроскопии (ВРЭМ) свидетельствуют, что пленки PbSnTe монокристаллические, но содержат много структурных дефектов. Подвижность при комнатной температуре в образцах толщиной 1,5 мкм не превышает значения 400 см²/В·с при концентрации носителей $n = 2 \cdot 10^{18}$ см⁻³, что свидетельствует о наличии структурных дефектов. С увеличением толщины эпитаксиальной плёнки наблюдается уменьшение удельного сопротивления и увеличение подвижности, что связано с улучшением кристаллической структуры пленки по мере удаления от интерфейса. Это согласуется с литературными данными о том, что с увеличением количества осаждённого на подложку материала концентрация прорастающих дислокаций в слоях халькогенидов свинца быстро уменьшается вследствие эффективного механизма аннигиляции деформаций.

Основные результаты и выводы работы.

1. Экспериментально ЧТО показано, при низкотемпературной эпитаксии (T_s=500С) на поверхности Si(100), имеющих среднюю высоту микронеровностей Zcp порядка 0,6 нм, с увеличением толщины эпитаксиального слоя вдвое средняя высота микронеровностей поверхности CaF₂ уменьшается в 3.5 раза (от 35 нм до 10 высокотемпературной нм), эпитаксии $(T_{s}=750^{\circ}C)$ а при высота микронеровностей Zcp практически не изменяется с толщиной слоя и имеет значения на порядок меньшие, чем в низкотемпературном режиме роста.

2. Экспериментально обнаружено, что увеличение средней высоты микронеровностей исходной поверхности кремния от 0,6 до 2,6 нм приводит, в низкотемпературном режиме роста, к зарождению двойников CaF₂ треугольной

19

формы. С ростом толщины слоя CaF₂, полученного на поверхности кремния с высотой микронеровностей до 3 нм, средняя высота микронеровностей Zcp возрастает практически одинаково как в высокотемпературном, так и в низкотемпературном режимах роста, от 10 до 50 нм.

3. Экспериментально показано, что трёхстадийный процесс роста слоев BaF_2 на $CaF_2/Si(100)$ при температуре подложки не ниже 750°C на начальной и завершающей стадиях роста и промежуточной стадией осаждения при T_s =500 C с отжигом обеспечивает получение сплошных слоёв с Zcp не более 3 нм.

установлено, 4. Экспериментально что воздействие электронного пучка дифрактометра на ростовую поверхность CaF₂ и PbSnTe в процессе МЛЭ приводит к одинаковому эффекту: резкому (от 30 до 150 нм) возрастанию высоты островков в зоне действия луча, которое невозможно объяснить только процессами радиолиза. Предложена качественная модель взаимолействия электронного пучка ДБЭ с поверхностью CaF_2 PbSnTe И на основе стимулированного электронным пучком процесса массопереноса.

5. Предложена технология многостадийной твердофазной эпитаксии, позволяющая получать на поверхности Si(100) с высотой микронеровностей Zcp порядка 2,6 нм, монокристаллические пленки CaF₂ и BaF₂ с высотой микронеровностей в 10 раз меньшей, чем у пленок, полученных на аналогичных подложках при других режимах эпитаксии.

6. Разработаны и оптимизированы технологические процессы получения гетероструктур CaF₂ и BaF₂/CaF₂ на Si (100), которые имеют сопоставимые с промышленными (КНС и SIMOX) КНИ структурами электрофизические параметры. Экспериментально показано, что наличие в диэлектрическом слое дополнительной границы раздела в структурах BaF₂/CaF₂/Si (100), полученных методом многостадийной твердофазной эпитаксии, не приводит к увеличению встроенного заряда.

7. Разработан технологический процесс получения гетероструктуры PbSnTe/BaF₂/CaF₂ Si (100)на замкнутом технологическом цикле. В показано, повышение температуры Экспериментально что эпитаксии ДО реиспарения PbSnTe исключает отслаивание эпитаксиального слоя как при создании контактов, так и при температуре жидкого азота, а понижение температуры эпитаксии до 300-350 С обеспечивают требуемую морфологию и более высокие электрофизические параметры полученных слоев СОТ. На основе этого предлагается двухстадийный процесс получения полупроводниковых слоёв PbSnTe на BaF₂/CaF₂/Si (100) с повышением температуры эпитаксии (до реиспарения) на начальной стадии роста PbSnTe с последующим её понижением (до 300-350 С) на завершающей стадии роста.

изучения 8. Ha основе параметров выращенных тестовых структур Si/CaF₂/Si(100) разработаны конструкции: ёмкостного переключателя для радиочастотных сигналов, емкостного датчика давления, высокочувствительного датчика теплового потока, а также предложен способ увеличения его быстродействия. Проведён анализ функционирования предложенного переключателя для ВЧ сигналов и получены выражения, необходимые для

20

переключателей проектирования МЭМ характеристиками. С заданными Разработана конструкция интегрального фотоприёмного многоэлементного устройства многослойной на основе гетероэпитаксиальной структуры PbSnTe/BaF₂/CaF₂/Si (100).

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Величко А.А., Илюшин В.А, Филимонова Н.И. Влияние температурных режимов роста на морфологию поверхности плёнок CaF₂/Si(100) полученных МЛЭ//Научный вестник НГТУ. –2007.- №3(28) Физика и математика. - С. 197-202. 2. Величко А.А., Илюшин В.А., Филимонова Н.И. Влияние микронеровностей поверхности подложки Si(100) на морфологию поверхности эпитаксиальных слоёв CaF₂ в низкотемпературном режиме роста// Научный вестник НГТУ. - 2010. - № 3(40) -С.111-118.

3. Величко А.А., Илюшин В.А, Остертак Д.И., Пейсахович Ю.Г., Филимонова Н.И. Влияние электронного пучка дифрактометра быстрых электронов на морфологию поверхности гетероструктур CaF₂/Si(100)//Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2007.- №8-С.1-9.

4. Патент РФ на изобретение № 2242728. МПК7 G01К 7/02. Датчик теплового потока/Величко А.А., Илюшин В.А, Филимонова Н.И. Заявлено 08.01.2003, Опубл.20.12.2004, Бюл.№35.

5. Патент РФ на изобретение № 2251087. МПК7 G01L 9/12. Ёмкостный датчик давления/Величко А.А., Илюшин В.А, Филимонова Н.И. Заявлено 09.06.2003, Опубл. 27.04.2005, Бюл.№12.

6. Патент РФ на изобретение № 2274839. МПК G01К 17/00, H01L 35/00. Способ измерения малых переменных тепловых потоков/Величко А.А., Илюшин В.А, Драгунов В.П., Филимонова Н.И. Заявлено 13.04.2004, Опубл.20.04.2006, Бюл.№11.

7. Патент РФ на изобретение № 2278446. Н01L 27/14. Интегральное многоэлементное фотоприёмное устройство инфракрасного диапазона/ Величко А.А., Илюшин В.А, Филимонова Н.И., Шумский В.Н., Климов А.Э., Супрун С.П. Заявлено 16.11.2004, Опубл.20.06.2006, Бюл.№17.

8. Драгунов В.П., Филимонова Н.И. МЭМ переключатель для ВЧ сигналов//Научный вестник НГТУ. – 2006.-№2(23) Физика и математика. - С.159-166.

9. Величко А.А., Илюшин В.А, Филимонова Н.И., Остертак Д.И. Влияние температурных режимов роста на морфологию поверхности многослойных структур PbSnTe/BaF₂/CaF₂/Si(100), полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии//Научный вестник НГТУ. -2006.-№4(25) Физика и математика. - С. 131-138.

10. Борыняк Л.А. Величко А.А., Илюшин В.А, Остертак Д.И., Пейсахович Ю.Г., Филимонова Н.И. Влияние электронного пучка на морфологию поверхности пленок свинец-олово-теллур в процессе МЛЭ//Микроэлектроника – 2008.- т.37, №3, - С. 1-12.

11. Величко А.А., Илюшин В.А, Филимонова Н.И., Антонова И.В. Влияние режимов молекулярно-лучевой эпитаксии на морфологию поверхности и электрофизические параметры структур BaF₂/CaF₂/Si(100)//Сборник научных трудов НГТУ. - 2005.- № 4(42), - С.77-82.

12. Величко А.А., Илюшин В.А, Остертак Д.И., Филимонова Н.И. Морфологическая перестройка поверхности плёнки CaF₂(100) под действием электронного пучка дифрактометра//Сборник научных статей «Современные проблемы геодезии и оптика».- Новосибирск: СГГА, 2006 - С.50-53.

13. Величко А.А., Илюшин В.А, Филимонова Н.И., Шиллер О.В. Тензодатчики на КНИ структурах Si/CaF₂/Si(100)//Сборник научных статей «Современные проблемы геодезии и оптика» - Новосибирск: СГГА, - 2006 - С.105-108.

14. Остертак Д.И., Величко А.А., Илюшин В.А., Филимонова Н.И Влияние дифракции быстрых электронов на морфологию поверхности структур CaF₂/Si(100)//Конф. аспирантов и молодых ученых: Труды Х конф. по физике полупроводниковых, диэлектрических и магнитных материалов. – Владивосток: Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, 2006. – С.340.

15. Величко А.А., Илюшин В.А., Резников И.Н., Филимонова Н.И. Быстродействующий датчик теплового потока // Информатика и проблемы коммуникаций. Материалы международной научно-технической конференции - Новосибирск 26 апреля 2002,-Новосибирск:2002.- С.156-157.

16. Величко А.А., Илюшин В.А, Филимонова Н.И., Неизвестный И.Г., Климов А.Э., Супрун С.П., Шумский В.Н. Исследование свойств плёнок PbSnTe, выращенных на кремнии через буферные слои BaF₂/CaF₂/II Всеросс. н-т дистанционная конференция «Электроника» Москва 17 ноября-11 декабря 2003 www.mocnit.miee.ru/conf/

17. Величко А.А., Борыняк Л.А., Илюшин В.А, Филимонова Н.И., Остертак Д.И. Создание матричного интегрального фотоприёмного устройства на основе PbSnTe/BaF₂/CaF₂/Si(100)/III международная научно-практическая конференция «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». Сборник трудов. - Санкт-Петербург, 14-17.03. 2007.- Санкт-Петербург: Изд-во Политехнического университета, 2007 - T.8 – С.57-60.

Список цитируемой литературы:

1. L.Pasquali, S.M. Suturin, V.P. Ulin, N.S. Sokolov, G.Selvaggi, A. Giglia, N. Mahne, M. Pedio, S. Nannarone Calcium fluoride on Si(001): Adsorption mechanisms and epitaxial growth modes //Phys.Rev. B - 2005.-v.72, -P.045448-1-15.

2. Величко А.А. Разработка технологии оптоэлектронных ИС на гетероструктурах полупроводник - (Ca,Sr,Ba)F₂ – полупроводник: Диссертация на соискание ученой степени доктора наук – Новосибирск, - 1999.-372 с.

Отпечатано в типографии Новосибирского Государственного технического университета 630092, г.Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Тел./факс (383) 346-08-57 Формат 60 х 84/16. Объем 1,5 п.л. Тираж 110 экз. Заказ 302. Подписано в печать 06.05.2011 г.