

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
**«Томский государственный университет систем управления и  
радиоэлектроники»**

**(ТУСУР)**

**Кафедра радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга  
(РЭТЭМ)**

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий каф. РЭТЭМ

\_\_\_\_\_ В.И. Туев

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

**ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ НАНОГЕТЕРОСТРУКТУРЫ**

Методические указания по самостоятельной работе  
работе магистрантов для направления подготовки  
11.04.03– Конструирование и технология электронных средств,

Доцент каф. РЭТЭМ

\_\_\_\_\_ В.С. Солдаткин

Магистрант каф. ЭП

\_\_\_\_\_ В.С. Каменкова

Солдаткин В.С., Каменкова В.С.. Полупроводниковые наногетероструктуры: Методические указания по самостоятельной работе студентов. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2017. – 13с.

Настоящее методическое указание по самостоятельной работе студентов составлены с учетом требований Федерального Государственного образовательного стандарта высшего образования (ФГОС ВО) по направлению подготовки 11.04.03 «Конструирование и технология электронных средств. Методическое указание по самостоятельной работе предназначено для магистрантов, изучающих специальные дисциплины «Полупроводниковые наногетероструктуры» и содержит список тем, отводимых на самостоятельное изучение. В изучении материалов данных методических указаний, магистранты должны расширить свои знания по изучаемым дисциплинам, а также данное методическое указание направлено на формирования у магистрантов следующих знаний, умений и навыков:

**знать** методы изготовления и контроля основных параметров полупроводниковых наногетероструктур мировые достижения в данной области;

**уметь** контролировать и анализировать основные электрические, оптические и механические параметры полупроводниковых наногетероструктур

**владеть** навыками контроля и анализа основных параметров полупроводниковых наногетероструктур, сопоставления параметров с мировым достижениями в данной области и оценку применимости в технологическом процессе изготовления светодиодных кристаллов и светодиодов на их основе.

## Оглавление

1. ПЕРЕЧЕНЬ ТЕМ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КУРСА, ОТВОДИМЫХ НА САМОСТОЯТЕЛЬНУЮ ПРОРАБОТКУ.....	4
1.1 Полупроводниковые материалы .....	4
1.2 Методы изготовления полупроводниковых наногетероструктур..	6
1.3 Контроль параметров полупроводниковых наногетероструктур...	8
2. ПРАВИЛА НАПИСАНИЯ КОНСПЕКТА САМОПОДГОТОВКИ...	10
3. СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	12

# 1. ПЕРЕЧЕНЬ ТЕМ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КУРСА, ОТВОДИМЫХ НА САМОСТОЯТЕЛЬНУЮ ПРОРАБОТКУ

## 1.1 Полупроводниковые материалы

Полупроводниковыми материалами называются вещества с четко проявляющимися свойствами полупроводников в больших интервалах температур, в том числе комнатной ( $\sim 300$  К), являющийся базой для создания полупроводниковых устройств. Удельная электрическая проводимость при 300 К составляет  $10^4$ - $10^{10}$  Ом<sup>-1</sup>·см<sup>-1</sup> и возрастает с увеличением температур. Для полупроводниковых материалов характерна высокая чувствительность электрофизических свойств к внешним воздействиям (нагрев, облучение, деформации и и т.д.), а также к содержанию структурных дефектов и примесей.

Полупроводниковые материалы бывают кристаллическими, твердыми аморфными и жидкими. Максимальное практическое применение получили неорганические кристаллические полупроводниковые материалы, которые по химическому составу делятся на следующие основные группы. Элементарные полупроводники: Ge, Si, углерод (алмаз и графит), В, α-Sn (серое олово), Te, Se. Главные представители данной группы-Ge и Si имеют кристаллическую решетку типа алмаз. Являются непрямозонными полупроводниками, и образуют между собой постоянный ряд твердых растворов, которые также обладают полупроводниковыми свойствами.

Соединения типа A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> компонентов III и V гр. периодической системы, обладают в основном кристаллической структурой типа сфалерит. Взаимосвязь атомов в кристаллической решетке носит непосредственно ковалентный характер с некоторой долей (до 15%) ионной составляющей. Плавятся конгруэнтно (не меняя при этом свой состав). Обладают достаточно узким диапазоном гомогенности, т.е. интервалом составов, в котором в зависимости от состояний (температуры, давления и т.д) преобладают типы

дефектов может меняться, а это приводит к изменению типа проводимости (n, p) а так же зависимости удельной электрической проводимости от состава. Важнейшие представители этой группы: GaAs, InP, InAs, InSb, которые являются прямозонными полупроводниками, и GaP – непрямозонный полупроводник. Многие полупроводниковые материалы типа  $A^{III}B^V$  образуя между собой непрерывный ряд твердых растворов тройных и более сложных ( $Ga_xAl_{1-x}As$ ,  $GaAs_xP_{1-x}$ ,  $Ga_xIn_{1-x}P$ ,  $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$  и т.п.), также являющихся достаточно важными.

Важнейшая область применения полупроводниковых материалов – микроэлектроника. Полупроводниковые материалы составляют основу современных больших и сверхбольших интегральных схем, которые делают главным образом на основе Si. Дальнейший прогресс в повышении быстродействия и в снижении потребляемой мощности связан с созданием интегральных схем на основе GaAs, InP и их твердых растворов с другими соединениями типа  $A^{III} B^V$ . В больших масштабах используют полупроводниковые материалы для изготовления "силовых" электронных приборов (вентили, тиристоры, мощные транзисторы). Здесь также основным материалом является Si, а дальнейшее продвижение в область более высоких рабочих температур связано с применением GaAs, SiC и др. широкозонных полупроводниковых материалов. С каждым годом расширяется применение полупроводниковых материалов в солнечной энергетике. Основными полупроводниковыми материалами для изготовления солнечных батарей являются Si, GaAs, гетероструктуры  $Ga_xAl_{1-x}As/GaAs$ ,  $Cu_2S/CdS$ , a-Si:H, гетероструктуры a-Si:H/a-Si<sub>x</sub>C<sub>1-x</sub>:H. С применением в солнечных батареях некристаллич. гидрированных полупроводниковых материалов связаны перспективы резкого снижения стоимости солнечных батарей. Полупроводниковые материалы используют для создания полупроводниковых лазеров и светодиодов. Лазеры делают на основе ряда прямозонных соединений типа  $A^{III}B^V$ ,  $A^{II}B^{IV}$ ,  $A^{IV}B^{VI}$  и др. Важнейшими материалами для изготовления лазеров являются гетероструктуры:

$Ga_xAl_{1-x}As/GaAs$ ,  $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}/InP$ ,  $Ga_xIn_{1-x}As/InP$ ,  $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}/Ga_xAs_{1-x}P_x$ . Для изготовления светодиодов широко используют: GaA, GaP,  $GaAs_{1-x}P_x$ ,  $Ga_xIn_{1-x}As$ ,  $Ga_xAl_{1-x}As$  и др. Полупроводниковые материалы составляют основу современных приемников оптического излучения (фотоприемников) для широкого спектрального диапазона. Их изготавливают на основе Ge, Si, GaAs, GaP, InSb, InAs,  $Ga_xAl_{1-x}As$ ,  $Ga_xIn_{1-x}As$ ,  $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$ ,  $Cd_xHg_{1-x}Te$ ,  $Pb_xSn_{1-x}Te$  и ряда др. полупроводниковых материалов. Полупроводниковые лазеры и фотоприемники - важнейшие составляющие элементной базы волоконно-оптических линий связи. Полупроводниковые материалы используются для создания различных СВЧ приборов (биполярных и полевых транзисторов, транзисторов на "горячих" элект-ронах, лавинопролетных диодов и др.). Важные области применения полупроводниковых материалов: детекторы ядерных излучений (используют особо чистые Ge, Si, GaAs, CdTe и др.), изготовление термохолодильников, тензодатчиков, высокочувствит. термометров, датчиков магнитных полей и подобных. приборов.

## 1.2 Методы изготовления полупроводниковых наногетероструктур

Эпитаксией называется ключевое представление в технологии ИМС (интегральные микросхемы). Специалисты часто применяют в своей работе такие термины, как эпитаксиальный слой, гетероэпитаксиальная структура, жидкофазная либо газофазная эпитаксия и т.д.

Эпитаксия является ориентированным наращиванием кристаллических слоев на монокристаллической подложке. Выращенный эпитаксиальный слой дублирует структуру и ориентацию подложки. Если на подложке наращивается эпитаксиальный слой того же состава, что и подложка, то такой вид эпитаксии называется гомоэпитаксией; если иного состава, то гетероэпитаксией. При изготовлении ИМС на кремнии используют гомоэпитаксию (кремний на кремнии). Для получения оптоэлектронных структур (светодиодов, лазеров и т.д.) в видимой области излучения

используется гетероэпитаксия. Например, на подложке GaAs наращивают эпитаксиальный слой твердого раствора  $Al_xGa_{1-x}As$  ( $x \approx 0,3$ ).

При любом способе эпитаксии ростовая ячейка должна содержать источник, содержащий ингредиенты растущего кристалла, среду, с помощью которой осуществляется транспортировка атомов в зону роста, и подложки, на которой происходит кристаллизация. в случае когда средой переноса является вакуум, то это вакуумная эпитаксия. В вакууме атомы могут перемещаться на подложку в виде молекулярных пучков. Поэтому такой вид эпитаксии называется молекулярно-лучевой (МЛЭ) или молекулярно-пучковой (МПЭ). Если средой переноса служит газ или пар, то эпитаксия называется газофазной или парофазной (ГФЭ). Наконец, если атомы ростового вещества поступают на подложку из жидкой фазы, то это – жидко-фазная эпитаксия (ЖФЭ).

В связи с необходимостью создания тонких слоев и многослойных структур с точно заданными геометрическими размерами, электрическими и оптическими свойствами, а также необходимостью создания структур с гетеропереходами, в которых границы между областями были бы свободны от примесей, дефектов и напряжений, связанных с различием параметров двух кристаллических решеток, были разработаны многочисленные технологические приемы.

Для нормальной работы приборов на основе этих структур необходимы резкие атомарно гладкие границы между слоями, а толщина слоев во многих случаях должна выдерживаться с атомарной точностью. Очевидно, что слоевые наноструктуры можно получить только эпитаксиальным наращиванием. Однако, не все эпитаксиальные технологии могут дать границы наноструктур с необходимыми свойствами. Например, эпитаксия из газовой фазы по традиционной технологии проводится при высоких температурах  $(850 - 1000)^{\circ}C$ , что приводит к заметной диффузии атомов в твердой фазе и к размытию границ слоев. Жидкофазная эпитаксия по традиционной схеме не позволяет сформировать сверхтонкие ( $\sim 100$  нм) слои достаточно однородные по толщине.

В настоящее время широко используются в основном две технологии: газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений (*ГФЭМОС*) и молекулярно-лучевая эпитаксия (*МЛЭ*). Ниже мы кратко рассмотрим аппаратурно-методическое оформление этих процессов, их преимущества и недостатки, а также перспективы применения в современной электронике.

### Газофазная эпитаксия. Газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений

Газофазная эпитаксия – это ориентированное выращивание кристаллической пленки на подложке из компонентов, доставляемых к подложке в виде органических или неорганических соединений в газовой фазе. Кристаллизация газовой смеси осуществляется на нагретой подложке в специальном реакторе.

#### **1.3 Контроль параметров полупроводниковых наногетероструктур**

Для солнечных батарей космических аппаратов конструктора задают целевые удельные энергетические и энергомассовые характеристики, исходя из минимизации веса коммутирующей системы и максимизации площади фотогенерирующей части СБ, то есть СБ для таких СБ необходимы тонкие СЭ большей площади. Это обстоятельство накладывает особые условия на разработку технологии изготовления СЭ космического назначения, состоящие в повышении требований к однородности полупроводниковой гетероструктуры на всей площади солнечного элемента, это требование не столь критично для других приборов на гетероструктурах (транзисторов, фотодиодов, лазеров, СЭ для концентраторов и др.) в силу их малых размеров.

Однородность полупроводниковой гетероструктуры по всей площади солнечного элемента достигается на стадии эпитаксиального роста. И сам процесс эпитаксиального роста монокристалла, и подготовка газовой смеси для роста по составу, температуре, давлению, и регулировка подачи газовой смеси в реактор, а также реакторные параметры – давление, температура и скорость вращения подложконосителя – непрерывно фиксируются,

контролируются и при необходимости корректируются в процессе роста. Однако, системы управления процессами, созданные разработчиками МОСГФЭ-реакторов, хотя и постоянно совершенствуются, но пока еще не могут обеспечить требуемой однородности эпитаксиального роста, необходимой для изготовления планарных СЭ максимальной площади. А ведь именно такие СЭ применяются при проектировании и изготовлении солнечных батарей космических аппаратов.

Для того, чтобы обеспечить управление процессами роста с требуемыми характеристиками однородности необходимо создать более развитую систему контроля, включающую системы контроля, созданные разработчиками МОСГФЭ-реакторов, а также систему дополнительного мониторинга совершенства кристаллической решетки, зонных характеристик полупроводниковой гетероструктуры 17 и однородности легирования по площади растущей гетероструктуры. Её необходимо иметь и использовать как на стадии разработки отдельных слоев гетероструктуры, так и на стадии «сборки» гетероструктуры из отдельных слоев или блоков. Это касается и генерирующих слоев с р-п-переходом и служебных слоев, таких как туннельный диод, слои зарождения, буферные слои, барьерные широкозонные слои и т.д. Также такой контроль необходим непосредственно при эксплуатации установки МОСГФЭ во время проведения технологического процесса для осуществления регулярной периодической проверки параметров и определения путей их корректировки. Наличие такого контроля обусловлено постепенным изменением условий роста от процесса к процессу из-за осаждения продуктов реакции на стенках камеры реактора, подводящих и отводящих газовых магистралях и на подложконосителе. Эти факторы приводят к изменению теплопроводности подложконосителя, изменению реальных газовых потоков, регламентированных в исходном технологическом рецепте, а также к возникновению дополнительных турбулентных потоков в камере реактора.

## 2. ПРАВИЛА НАПИСАНИЯ КОНСПЕКТА САМОПОДГОТОВКИ

*Во введении* даётся краткая характеристика и текущее состояние рассматриваемых вопросов. Указываются цель и задачи работы, объект исследования, выполненные разработки и элементы новизны, привнесенные в процессе написания работы. Обосновывается актуальность выбранной темы.

*Основная часть* работы должна содержать вопросы по тематике. Вначале описываются теоретические положения, раскрывающие сущность рассматриваемой проблемы, анализируются собранные материалы, характеризующие практический аспект объекта исследования. Этот раздел работы следует сопровождать таблицами, схемами (диаграммами), рисунками, проспектами и другими материалами. В расчетной части допускаются формулы, нормативные и статистические материалы, необходимые для обоснования отдельных положений. При использовании материалов из других источников следует делать ссылки с указанием автора, названия и год издания книги или других материалов.

*Заключение* должно состоять из выводов и предложений, которые получены в результате работы. Их следует формулировать четко и по пунктам.

Список литературы содержит список учебной, научной литературы, научных статей, законодательных и нормативных актов и проч., (но не менее 10 источников литературы, из них не менее 5 на статьи в научных журналах, индексируемых РИНЦ, Scopus или Web of Science) использованных источников при выполнении конспекта самоподготовки.

Конспект самоподготовки должен включать в себя титульный лист, содержание, список используемой литературы и приложения. Объем работы должен составлять 15 страниц компьютерного текста, шрифт № 14 через 1,5 интервала, выровненный по ширине и в соответствии с ОС ТУСУР 01-2013 «Работы студенческие по направлениям подготовки и специальностям технического профиля».

Пример обозначения заголовков в реферате:

**ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

**Анализ литературы**

*Методы и средства измерений*

### 3. СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Светодиоды : Пер. с англ. / А. И. Берг, П. Дин; Ред. и предисл. А. Э. Юнович. - М. : Мир, 1973. - 98[2] с. (наличие в библиотеке ТУСУР - 4 экз.)
2. Физика полупроводниковых приборов : пер. с англ.: В 2 кн. / С. М. Зи; Пер. В. А. Гергель, Пер. Н. В. Зыков, Пер. Р. З. Хафизов, Ред. Пер. Р. А. Сурис. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Мир, 1984 - Кн. 2. - М. : Мир, 1984. - 456 с. (наличие в библиотеке ТУСУР - 15 экз.)
3. Технология сборки и монтажа мощных светоизлучающих изделий: Учебное пособие / Туев В. И., Солдаткин В. С., Вилисов А. А., Старосек Д. . - 2016. 48 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/6600>, свободный.
4. Физические основы оптоэлектроники: Учебное пособие имеет гриф СибРУМЦ «Для межвузовского использования» / Давыдов В. Н. - 2016. 139 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://edu.tusur.ru/publications/5963>, свободный.
5. Полупроводниковая светотехника: Учебное пособие для студентов, обучающихся по направлению подготовки 211000.62 – Конструирование и технология электронных средств / Туев В. И., Солдаткин В. С., Вилисов А. А. - 2015. 46 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://edu.tusur.ru/publications/5458>, свободный.
6. Нанотехнологии в полупроводниковой электронике: Коллективная монография / Российская Академия наук, Сибирское отделение, Институт физики полупроводников; ред. А.Л. Асеев. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2004. – 367 (наличие в библиотеке ТУСУР - 10 экз.)
7. Интегральные устройства радиоэлектроники. Часть 1. Основные структуры полупроводниковых интегральных схем: Учебное пособие / Романовский М. Н. - 2012. 123 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/1304>, свободный.

8. Технология сборки и монтажа мощных светоизлучающих изделий, технологии корпусирования светодиодов белого цвета: Методические указания по практической и самостоятельной работе / Солдаткин В. С., Туев В. И., Вилисов А. А., Каменкова В. С. - 2016. 19 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/6616>, свободный.

9. Технология сборки и монтажа мощных светоизлучающих изделий: Учебно- методические указания для выполнения лабораторных работ для магистрантов / Солдаткин В. С., Вилисов А. А., Туев В. И. - 2016. 16 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/6584>, свободный.