



Кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры

А.С. Шостак, И.И. Горелкин

«Актуальные проблемы современной электроники и наноэлектроники»

Учебное пособие

предназначено для магистров, обучающихся по направлению
"Нанотехнология в электронике".

Томск 2018

Министерство образования и науки Российской Федерации Федеральное
государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

А.С. Шостак, И.И. Горелкин

**«Актуальные проблемы современной
электроники и наноэлектроники»**

Учебное пособие:

предназначено для магистров, обучающихся по направлению
"Нанотехнология в электронике".

Рецензент: профессор кафедры КИПР ТУСУР, д. т. н. Масалов Е.В.

Технический редактор: доцент кафедры КИПР ТУСУР, к. т. н. Кривин Н.Н.

А.С. Шостак, И.И. Горелкин. Учебное пособие по дисциплине «Актуальные проблемы современной электроники и наноэлектроники».

Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2018 – 59 с.

Содержит характеристику основных направлений электроники. Приведено описание современных технологий в электронике и наноэлектронике, а также рассмотрены активные устройства СВЧ

© А.С. Шостак, И.И. Горелкин. 2018

© Кафедра КИПР Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, 2018

СОДЕРЖАНИЕ

1. Основные тенденции развития микроэлектроники обусловлены идеологией больших и сверхбольших интегральных схем	6
2. Физические основы функционирования приборов устройств фотоники и нанофотоники нового поколения	9
2.1 Характеристика основных направлений электроники	9
2.2 Наиболее важные направления квантовой электроники	11
3 Современные технологии в электронике и наноэлектронике	12
3.1 Механизмы эпитаксиального роста структур	12
3.2 Молекулярно-лучевая эпитаксия.....	12
3.3 Газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений	13
3.4 Жидкофазная эпитаксия	15
3.5 Магнетронное распыление.....	17
3.6 Ионно-лучевая кристаллизация	18
4. Устройства нового поколения для электроники и наноэлектроники.....	19
4.1 Инжекционные лазеры	19
4.2 Фотодиоды	22
4.3 Светоизлучающие диоды	24
5. Активные устройства СВЧ.....	29
5.1 Диапазон СВЧ.....	29
5.2 Элементная база СВЧ	29
5.3. Малошумящие транзисторные усилители СВЧ.....	31
5.4. Структурная схема однокаскадного усилителя СВЧ	32
5.5. Принципиальная схема однокаскадного узкополосного малошумящего усилителя.....	35
5.6. Транзисторные преобразователи СВЧ.....	38
5.7 Интегральные приемные СВЧ модули	41
5.8. Регенеративные усилители.....	42
5.9. Негатронные усилители	46

5.10 Выводы	51
5.11 Контрольные вопросы	54
6 Антенные фазированные решетки	55
Список рекомендованной литературы:.....	59

1. Основные тенденции развития микроэлектроники обусловлены идеологией больших и сверхбольших интегральных схем

Развитие интегральных схем идет в направлении освоения субнаносекундных времен срабатывания и субмикронных размеров компонентов сверхвысоких уровней интеграции. Эти достижения реализованы на основе транзисторной схемотехники и системотехники, что соответствует традиционному пути развития микроэлектроники.

Интегральная электроника использует классические методы схемной радиотехники, теорию электрических цепей и основана на принципе технологической интеграции статических неоднородностей - потенциальных барьеров, к которым относятся легированные разными примесями полупроводниковые области активных компонентов интегральных схем (диодов, транзисторов), металлические и диэлектрические участки кристалла.

Функциональными идеями современной микроэлектроники являются микроминиатюризация и интеграция. Обе эти идеи - прежде всего, технологические.

Их пределы ограничены физико-техническими принципами сохранения работоспособности основной транзисторной структуры.

Уменьшение топологических размеров активных областей до величин порядка сотен нанометров приводит к появлению квантоворазмерных эффектов, проявляющихся в электронных системах пониженной размерности.

Достижение таких размеров связывают с началом эры наноэлектроники, как дальнейшего этапа развития микроэлектроники.

Параллельным направлением развития твердотельной электроники, свободной от ограничений интегральной электроники, является функциональная электроника.

Суть функциональной электроники определяется принципами физического моделирования, реализуемого преимущественно на базе физики твердого тела.

Интеграция в функциональной электронике параметрическая, интегрируются

функции преобразования, что исключает схемотехнический принцип их формирования, и следовательно, компонентную и элементную интеграцию.

Основу функциональной электроники составляет физика твердого тела. Физические процессы и явления, происходящие в твердом теле, *моделируют* функции передачи и преобразования, определяемые алгоритмами обработки массивов *информации*.

Другими словами, *функциональная электроника основана* не на схемной радиотехнике с использованием статических неоднородностей (потенциальных барьеров) и технологической интеграции, характеризующих интегральную электронику, а на физических принципах интеграции динамических неоднородностей (электрические и магнитные домены, магнитные вихри, волны деформации, зарядовые пакеты и др.), возникающих в твердом теле в процессе эксплуатации электронной системы.

Статические неоднородности играют в функциональной электронике лишь вспомогательную роль, чаще всего при вводе и выводе информации.

Динамические неоднородности в однородном объеме твердого тела являются непосредственными носителями информации и в отличие от статических неоднородностей создаются не в процессе изготовления электронного устройства, а под действием внешних факторов при функционировании электронного устройства.

Динамические неоднородности, естественно, могут перемещаться по объему тела, возникать и исчезать, взаимодействовать друг с другом, изменять свои характеристики в зависимости от функциональных задач.

Кинетика динамических неоднородностей не вызывает дефектообразования в кристалле, поэтому в принципе устройства функциональной электроники более надежны, чем устройства интегральной электроники. Кроме того, мир физических явлений и процессов в твердом теле столь богат и разнообразен, что практически любая функция передачи может быть реализована методами функциональной электроники.

Таким образом, функциональная электроника — это направление

электроники, основанное на физике твердого тела и принципе физического моделирования при осуществлении приема, переработки, хранения, передачи и отображения информации, при этом принцип физического моделирования реализуется с помощью физической интеграции динамических неоднородностей.

В отличие от хорошо известного метода электро моделирования, в котором физические процессы и явления моделируются процессами в электрической схеме на основе теории цепей, при физическом моделировании, наоборот, само физическое явление моделирует заданную функцию.

Дальнейший прогресс в создании сложных систем приема, передачи и обработки больших массивов информации в значительной степени будет обусловлен развитием и внедрением устройств функциональной электроники.

Функциональная, не схемотехническая, электроника развивается не в качестве альтернативы, исключения интегральной электроники, а параллельно; они взаимно дополняют друг друга.

Более того, создаются функциональные электронные системы, содержащие столь большую долю статических неоднородностей, сформированных традиционной интегральной технологией, что разработчики называют такие системы функционально-интегрированными.

Так, устройства на акустических волнах относятся к функциональной электронике, хотя и содержат частично элементы схемотехнические, в частности, встречно-штыревые электроды.

В устройствах же на основе приборов с зарядовой связью доля статических неоднородностей столь велика, что их целесообразно относить к функционально-интегрированным системам.

2. Физические основы функционирования приборов устройств фотоники и нанофотоники нового поколения

2.1 Характеристика основных направлений электроники

В настоящее время принято различать следующие направления электроники:

- вакуумную электронику;
- твердотельную электронику;
- квантовую электронику.

Каждая область подразделяется на ряд разделов и ряд направлений.

Раздел объединяет комплексы однородных физико-химических явлений и процессов, которые имеют фундаментальное значение для разработки многих классов электронных приборов данной области.

Направление охватывает методы конструирования и расчетов электронных приборов, родственных по принципам действия или по выполняемым ими функциям, а также способы изготовления этих приборов.

Вакуумная электроника содержит следующие разделы:

1. эмиссионная электроника, охватывающая вопросы термоэмиссии, вторичной электронной эмиссии, туннельной эмиссии, исследование катодов и антиэмиссионных покрытий;
2. формирование потоков электронов и потоков ионов, управление этими потоками;
3. формирование электромагнитных полей с помощью резонаторов, систем резонаторов, замедляющих систем,
4. устройств ввода и вывода энергии;
5. электронная люминесценция (катодолюминесценция);
6. физика и техника высокого вакуума (его получение, сохранение и контроль);
7. теплофизические процессы (испарение в вакууме, формоизменение деталей при циклическом нагреве, разрушение поверхности металлов при

импульсном нагреве, отвод тепла от элементов приборов);

8. теплофизические процессы (испарение в вакууме, формоизменение деталей при циклическом нагреве, разрушение поверхности металлов при импульсном нагреве, отвод тепла от элементов приборов);

9. поверхностные явления (образование пленок на электродах и изоляторах, неоднородностей на поверхностях электрода);

10. технология обработки поверхностей, в т. ч. Электронная, ионная и лазерная обработка;

11. газовые среды - раздел, включающий вопросы получения и поддержания оптимального состава и давления газа в газоразрядных приборах.

Твердотельная электроника содержит следующие разделы, связанные в основном с полупроводниковой электроникой:

1. изучение свойств полупроводниковых материалов, влияние примесей на эти свойства;

2. создание в кристалле областей с различной проводимостью методами эпитаксиального выращивания, диффузии, ионного внедрения (имплантации), воздействием радиации на полупроводниковые структуры;

3. нанесение диэлектрических и металлических пленок на полупроводниковые материалы, разработка технологии создания пленок с необходимыми свойствами и конфигурацией

4. исследование физических и химических процессов на поверхности полупроводников;

5. разработка способов и средств получения и измерения элементов приборов микронных и субмикронных размеров (нанотехнология).

Основные направления полупроводниковой электроники связаны с разработкой и изготовлением различных видов полупроводниковых приборов:

1. полупроводниковых диодов (выпрямительных,

2. смесительных, параметрических, стабилитронов); усилительных и генераторных диодов (туннельных, лавинно-пролетных, диодов Ганна); транзисторов (биполярных и униполярных), тиристоров, оптоэлектронных приборов (светоизлучающих диодов,
3. фотодиодов, фототранзисторов, оптронов, светодиодных и фотодиодных матриц), интегральных схем;
4. диэлектрическая электроника, изучающая электронные процессы в диэлектриках (в частности, в тонких диэлектрических пленках) и их использование, например, для создания диэлектрических диодов, конденсаторов;
5. магнитоэлектроника, использующая магнитные свойства вещества для управления потоками электромагнитной энергии с помощью ферритовых вентилях, циркуляторов, фазовращателей и т. д., и для создания запоминающих устройств, в т. ч. на магнитных доменах;
6. акустоэлектроника и пьезоэлектроника, рассматривающие вопросы распространения поверхностных и объемных акустических волн и создаваемых ими переменных электрических полей в кристаллических материалах и взаимодействия этих полей с электронами в приборах с полупроводниково-пьезоэлектрической структурой (кварцевых стабилизаторах частоты, пьезоэлектрических фильтрах,
7. ультразвуковых линиях задержки, акустических усилителях и т. д.);
8. криоэлектроника, исследующая изменения свойств твердого тела при глубоком охлаждении для построения малошумящих усилителей и генераторов СВЧ, сверхбыстродействующих вычислительных и запоминающих устройств;
9. разработка и изготовление резисторов.

2.2 Наиболее важные направления квантовой электроники

Наиболее важными направлениями квантовой электроники является создание лазеров и мазеров.

На основе приборов квантовой электроники строятся устройства для точного измерения расстояний (дальномеры), квантовые стандарты частоты, квантовые гироскопы, системы оптической многоканальной связи, дальней космической связи, радиоастрономии. Энергетическое воздействие лазерного концентрированного излучения на вещество используется в промышленной технологии. Также, лазеры находят различное применение в биологии и медицине.

3 Современные технологии в электронике и нанoeлектронике

3.1 Механизмы эпитаксиального роста структур

При выращивании полупроводниковых гетероструктур эпитаксиальными методами возможны 3 взаимодополняющих режима:

1. Франка-Ван дер Мерве (Frank-Van der Merwe) - 2D морфология, послойный или ступенчатый рост;
2. Фольмера-Вэбера (Volmer-Weber) - 3D морфология, островковый рост;
3. Странского-Крастанова (Stranski-Krastanov) - начальный этап характеризуется 2D морфологией (послойный рост), по достижении критической толщины слоя происходит переход к 3D морфологии (рост островков и квантовых точек).

Эпитаксия – процесс наращивания монокристаллических слоев на монокристаллических подложках.

3.2 Молекулярно-лучевая эпитаксия

Метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) предназначен для выращивания микро- и наноструктур в сверхвысоком вакууме. Этот метод основан на процессе взаимодействия нескольких молекулярных пучков различного состава с нагретой монокристаллической подложкой и последующего выращивания на ней эпитаксиального слоя.

Схема установки молекулярно-лучевой эпитаксии приведена на рисунке 3.1.

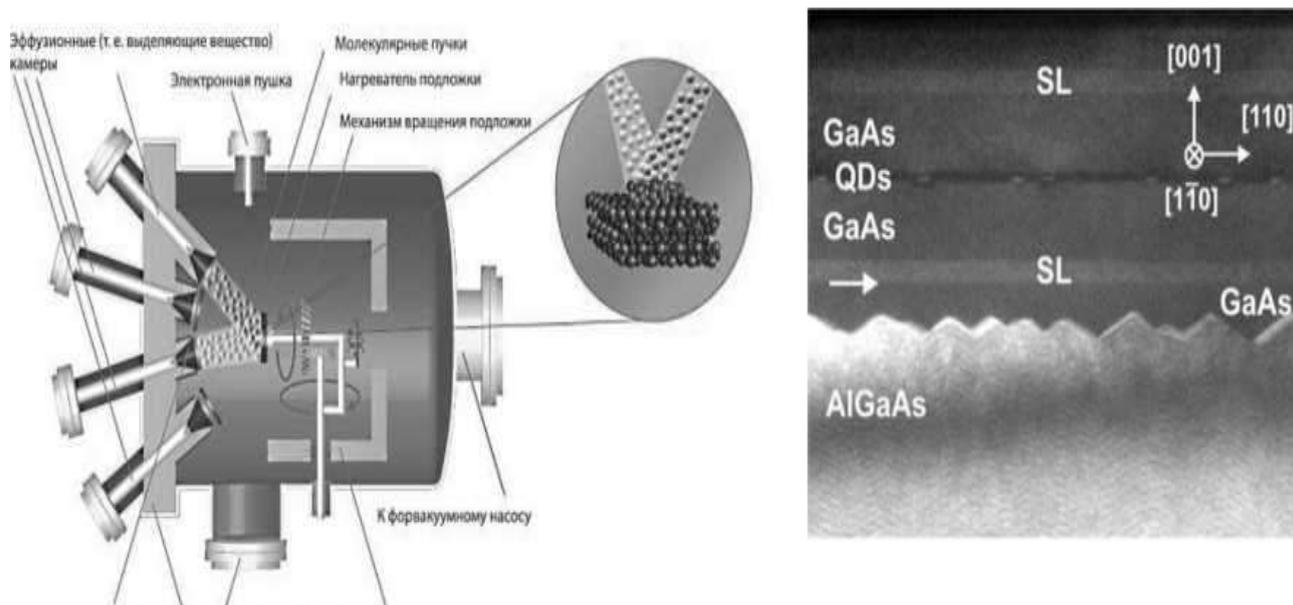


Рисунок 3.1 - Молекулярно-лучевая эпитаксия:

- а) схема процесса,
 б) СЭМ-изображение наногетероструктуры, полученной МЛЭ.

3.3 Газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений

Метод газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (ГФЭ МОС), заключается в ориентированном выращивании кристаллической пленки на подложке из компонент, доставляемых к подложке в виде металлоорганических соединений в газовой фазе. Особенность метода ГФЭ МОС состоит в том, что в реакторе создается высокотемпературная зона, в которую поступает газовая смесь, содержащая разлагаемое соединение. В этой зоне протекает реакция и происходит выделение и осаждение вещества на подложке, а газообразные продукты реакции уносятся потоком газаносителя. Для получения соединений А В в качестве источника элемента III группы используют металлоорганические соединения (например, триметилгаллий (ТМГ) для синтеза GaAs и триметилиндий (ТМИ) для InP или InGaP).

В качестве источников элементов V группы служат газы арсин и фосфин. Упрощенная схема установки для ГФЭ МОС приведена на рисунке 3.2.

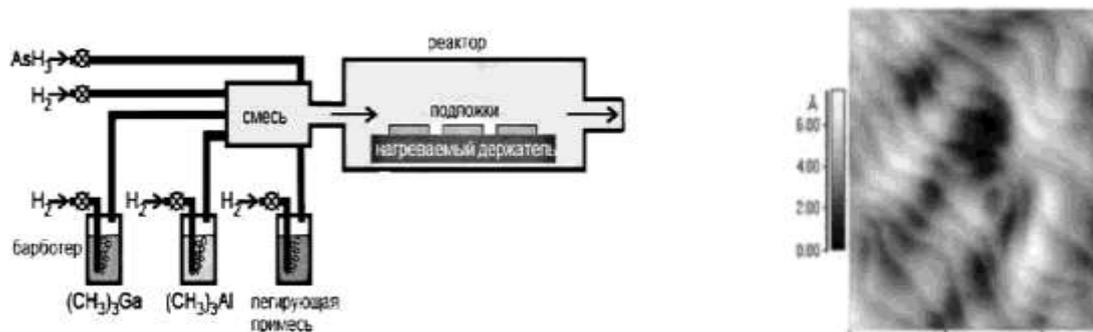


Рисунок 3.2 - Газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений: а) схема процесса, б) АСМ-изображение наногетероструктуры GaInAsSb/GaSb полученных ГФЭ МОС

Реактор представляет собой кварцевую горизонтально расположенную трубу. Нагрев подложки, размещенной внутри реактора на графитовом наклонном пьедестале, осуществляется резистивным нагревателем.

Достоинствами МОС ГФЭ являются необратимость химических реакций, лежащих в его основе, и отсутствие в парогазовой смеси химически активных с растущим слоем компонент. Это позволяет проводить процесс эпитаксии при сравнительно низких температурах роста и осуществлять прецизионную подачу исходных веществ, что позволяет обеспечить контролируемое легирование слоев и получение структур в широком диапазоне составов твердых растворов с резкими концентрационными переходами.

К недостаткам МОС-гидридного метода можно отнести высокую токсичность используемых исходных соединений, в первую очередь арсина, а также сложность химических процессов, приводящих к образованию слоя GaAs, что затрудняет моделирование условий образования эпитаксиальных слоев с нужными свойствами.

К недостаткам также относится загрязнение растущего слоя углеродом, источником которого являются металлоорганические соединения. Тем не менее, качество получаемых слоёв сравнимо с качеством слоев, получаемых при использовании других видов ростовой технологии.

3.4 Жидкофазная эпитаксия

Метод жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) наряду с методом газофазной эпитаксии (ГФЭ) нашел в прошлом широкое применение для получения различных структур, в первую очередь, гетероструктур. Этим методом был получен ряд твердых растворов, которые не могли быть получены другим методом. Методу ЖФЭ стало уделяться меньше внимания в связи с широким применением молекулярно-лучевой эпитаксии, особенно для получения квантоворазмерных структур, на основе которых были получены, например, высокоэффективные излучательные структуры. Однако метод жидкофазной эпитаксии вследствие своей простоты не потерял актуальности и в настоящее время, в частности, в решении проблемы получения квантоворазмерных структур также.

Имеются сообщения в литературных источниках о возможности получения квантоворазмерных структур методом жидкофазной эпитаксии с применением «сверхбыстрого охлаждения». Применение систем со связанными наноразмерными структурами из различных материалов в матрице GaAs дает дальнейшую перспективу повышения эффективности солнечных элементов с наноразмерными структурами.

В связи с этим представляет интерес анализ различных вариантов проведения технологических процессов методом жидкофазной эпитаксии с целью их систематизации на основе рассмотрения модели диффузии, компонент раствора-расплава, распределения их концентрации по толщине раствора-расплава и твердого слоя, а также поиска новых способов получения многослойных структур), перспективных для применения в приборах (в частности фоточувствительных).

Основные методы получения полупроводниковых слоев (структур) жидкофазной эпитаксией по модели диффузии (распределения концентрации) компонент в растворе-расплаве можно разделить на две группы:

получение слоев из неограниченных объемов растворов- расплавов

(«бесконечный источник»); основным критерием неограниченных объемов - является сохранение в процессе роста эпитаксиальных слоев постоянными концентрации растворенных компонентов в основной области раствора-расплава (практически это имеет место при достаточно больших объемах-толщинах раствора-расплава);

получение слоев из ограниченных объемов растворов-расплавов («конечный источник»); основным критерием ограниченных - «тонких» объемов является изменение в процессе роста эпитаксиальных слоев концентрации растворенных компонентов во всей области раствора-расплава, но при этом остается однородным

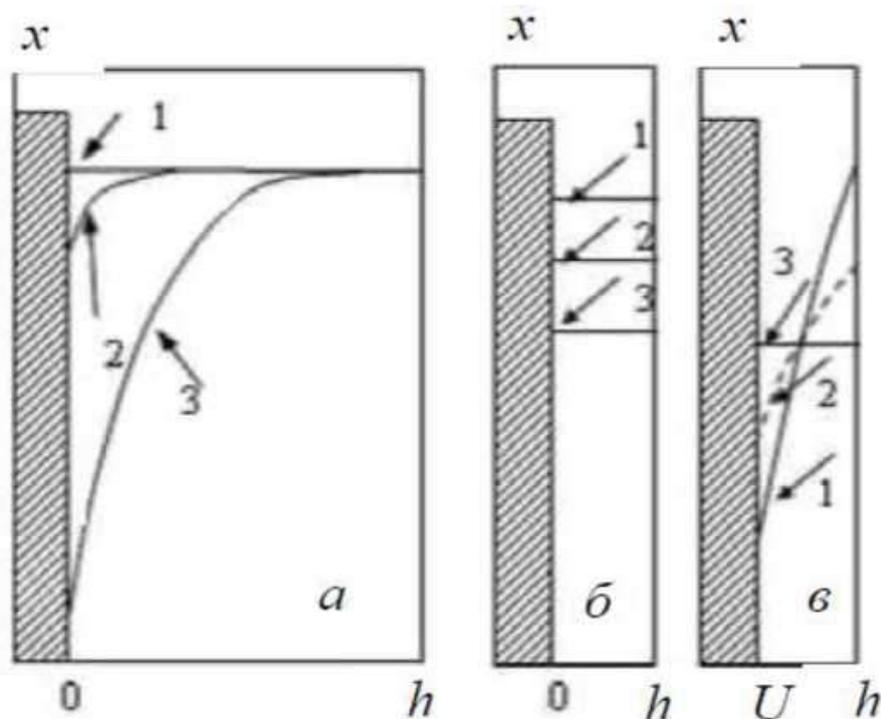


Рисунок 3.3- Изменение во времени распределения концентрации вещества в процессе ЖФЭ.

При получении слоев из неограниченных («бесконечный источник») объемов растворов-расплавов концентрация кристаллизующегося компонента изменяется в области жидкой фазы, приграничной к поверхности кристаллизующегося слоя, а вдали от нее остается постоянной (или меняется незначительно). Рис. 3.3, (а) качественно иллюстрирует распределение концентрации кристаллизующегося компонента в жидкой фазе в процессе роста

эпитаксиального слоя. Как видно из рисунка, при росте эпитаксиальных слоев в приграничной области появляется градиент концентрации компонент, который постепенно увеличивается в процессе роста слоя, однако из-за достаточно большой толщины раствора-расплава имеет место только в приграничной области расплава.

При получении слоев из ограниченных объемов растворов- расплавов («конечный источник») можно считать с определенной степенью идеализации, что концентрация кристаллизующегося компонента изменяется практически равномерно по всему объему жидкой фазы (если скорость диффузии превосходит скорость роста и исходный расплав однороден по составу).

Таким образом, при достаточно малых скоростях роста (меньших, чем скорость диффузии кристаллизующегося компонента от верхней границы расплава к фронту кристаллизации) концентрация кристаллизующегося компонента по толщине жидкой фазы будет практически однородной.

3.5 Магнетронное распыление

Метод относится к методам распыления материалов ионной бомбардировкой. Основными элементами являются плоский катод, изготовленный из напыляемого материала, анод, устанавливаемый по периметру катода, магнитная система, обычно на основе постоянных магнитов, и система водоохлаждения.

Силовые линии магнитного поля, замыкаясь между полюсами, пересекаются с линиями электрического поля. Принцип действия установки основан на торможении электронов в скрещенных электрических и магнитных полях.

Схема магнетронной распылительной системы приведена на рисунке 3.4.

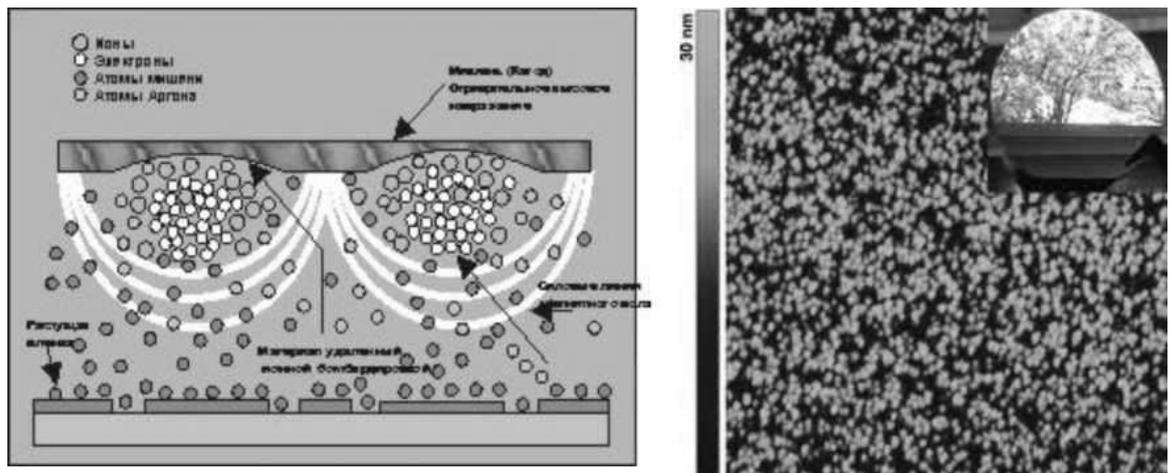


Рисунок 3.4 - Магнетронное распыление:

а) схема процесса, б) АСМ-изображение КТ InAs/GaAs полученных магнетронным распылением

Магнетронные устройства относятся к низковольтным системам ионного распыления. Напряжение источника питания постоянного тока не превышает 1000-1500 В. При подаче отрицательного потенциала на катод, между электродами возбуждается аномальный тлеющий разряд в среде аргона.

Наличие магнитной ловушки обеспечивает при одних и тех же давлениях газа возникновение разряда при более низких напряжениях по сравнению с диодными системами. Напряжение разряда составляет 300-700 В. Магнетрон может работать в диапазонах давления рабочего газа от $5 \cdot 10^{-1}$ до 10 Па и выше. Давление газа и индукция магнитного поля оказывают значительные влияния на характеристики разряда.

Преимуществами этого метода являются: высокая скорость распыления при низких рабочих напряжениях (600-800 В) и при небольших давлениях рабочего газа ($5 \cdot 10^{-1}$ - 10 Па), отсутствие перегрева подложки, малая степень загрязнения, возможность получения микро- и наноструктур на большой площади подложек.

3.6 Ионно-лучевая кристаллизация

Ионно-лучевая кристаллизация (ИЛК) - метод распыления материала мишени пучком ионов инертного газа, массопереноса этого материала к

подложке и последующей его кристаллизации на ее поверхности.

Основными достоинствами этого метода являются: низкая себестоимость, универсальность, позволяющая, используя одну унифицированную установку, распылять металлы, диэлектрики, полупроводники, сплавы и соединения; лучшая за счет большей кинетической энергии распыленных атомов и молекул по сравнению с вакуумным осаждением; возможность формирования различного состава пленок (в том числе пленок такого состава, который нельзя получить другими методами);

хорошая контролируемость и управляемость процесса.

К недостаткам этого метода следует отнести присутствие в камере ионов распыляющего газа (обычно аргона), которые могут внедряться в подложку или структуру, а также перемешивать материал подложки и структуры

4. Устройства нового поколения для электроники и нанoeлектроники

4.1 Инжекционные лазеры

Наиболее распространенным типом полупроводниковых лазеров являются инжекционные лазеры (их также называют лазерными диодами), в которых лазерная активная среда возникает в результате инжекции свободных носителей заряда в область p-n перехода.

Под действием напряжения прямого смещения уменьшается высота потенциального барьера p-n переход, и в область перехода инжектируются основные носители.

При небольших токах инжекции излучение определяется исключительно спонтанными переходами из зоны проводимости в валентную зону.

Такое некогерентное излучение называется люминесценцией. Некоторая часть фотонов движется вдоль p-n перехода и может вызвать акты индуцированного излучения. При больших токах инжекции доля индуцированного излучения возрастает и наблюдается эффект

суперлюминесценции. Он проявляется в увеличении интенсивности излучения в плоскости p-n перехода. Спектр излучения по-прежнему широк, однако он становится неравномерным, с большим числом максимумов и минимумов.

Поместив активную среду в резонатор, можно увеличить плотность мощности излучения и получить когерентное излучение.

При рекомбинации электронов и дырок выделяется энергия, равная разности энергетических состояний носителей. Выделяемая энергия может быть излучена в виде фотона или безызлучательно передана кристаллической решетке. Излучательная рекомбинация может осуществляться различными способами: при переходах электронов из зоны проводимости в валентную зону или на примесный акцепторный уровень, при переходах с донорного уровня в валентную зону или на акцепторный уровень.

На выбор материала для инжекционного лазера существенно влияют микроструктура поля кристаллической решетки и определяемая ею структура границ энергетических зон. При квантовых переходах, помимо закона сохранения энергии, выполняется также закон сохранения импульса. Импульс фотона по сравнению с импульсом электрона имеет ничтожно малую величину.

Поэтому, если импульсы электрона в начальном и конечном состояниях одинаковы, то кристаллическая решетка не участвует во взаимодействии. Квантовые переходы, при которых импульс частиц не меняется, называются прямыми.

При непрямых переходах электроны изменяют свой импульс, и тогда во взаимодействии участвует кристаллическая решетка, обеспечивающая выполнение закона сохранения импульса. Вероятность непрямых переходов существенно меньше, чем прямых, поскольку при рекомбинации электрона и дырки кристаллическая решетка должна одновременно получить или передать импульс.

Инжекционные лазеры существенно отличаются от других типов лазеров (твердотельных или газовых):

- квантовые переходы в инжекционных лазерах обусловлены зонной

структурой материала, поэтому в них достигается большое внутренне усиление;

- инжекционные лазеры имеют малые размеры (до 100 мкм в длину, порядка нескольких микрометров в ширину, и доли микрометра толщиной), поэтому они имеют широкую диаграмму излучения;

- лазерное излучение возникает непосредственно под действием тока, протекающего через прямо смещенный диод, что позволяет проводить модуляцию мощности излучения лазерного диода за счет модуляции тока накачки;

- наличие встроенного оптического резонатора, образованного либо гранями кристалла (лазерный диод с резонатором Фабри-Перо, рис. 3.2), либо с помощью нанесения дифракционной решетки на поверхности кристалла (лазерный диод с распределенной обратной связью, рис. 4.3) либо с помощью нанесения дифракционной решетки на поверхности кристалла (лазерный диод с распределенной обратной связью, рис. 4.1).

Современные инжекционные лазеры изготавливаются на основе многослойной структуры из полупроводников с различной шириной запрещенной зоны, образующих р-п переход. В центре располагают слой с более узкой шириной запрещенной зоны и с более высоким показателем преломления по сравнению с наружными слоями, что приводит к ограничению носителей заряда с помощью потенциальных барьеров на гетерограницах (рис. 4.2) и ограничению фотонов с помощью эффекта полного отражения излучения в центре лазера.

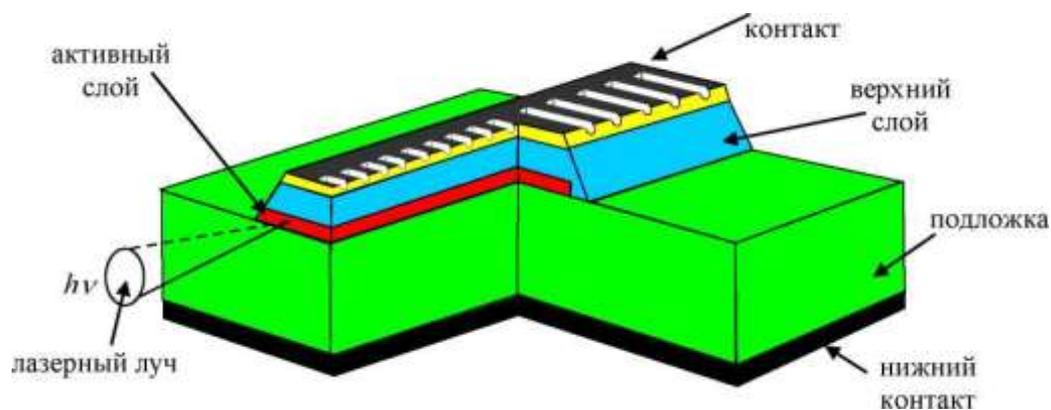


Рис. 4.1 - Инжекционный лазер с распределенной обратной связью

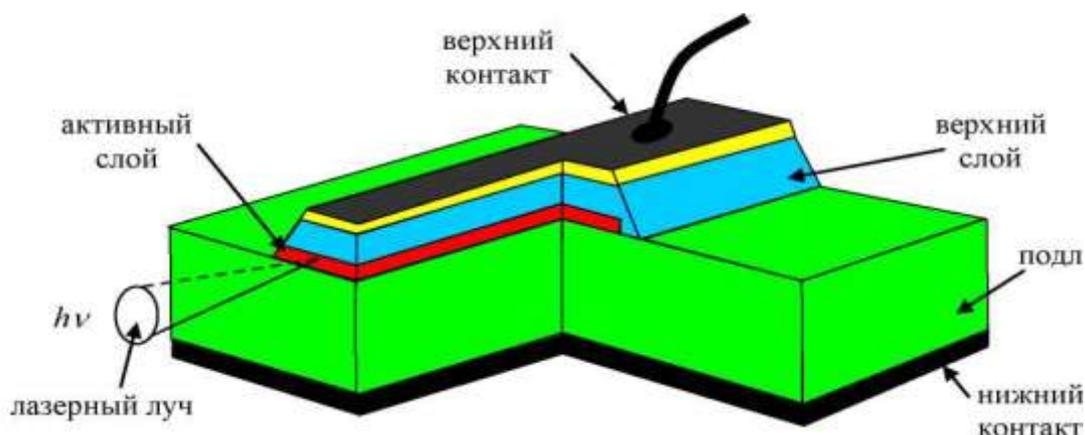


Рисунок 4.2 - Инжекционный лазер с резонатором Фабри-Перо.

Следует отметить, что квантоворазмерные гетероструктуры, в которых толщина слоев порядка нескольких нанометров, обладают наибольшим усилением благодаря лучшему ограничению носителей заряда и фотонов. Набор квантовых ям используется для умножения усиления, что приводит к снижению порогового тока квантоворазмерного инжекционного лазера.

4.2 Фотодиоды

Благодаря высокой квантовой эффективности и надежности, планарной технологии изготовления и относительно низкой цене р-і-п фотодиоды на основе кремния, германия и соединений АШВУ являются наиболее распространенными фотодетекторами. Работа р-і-п фотодиода основана на преобразовании оптического сигнала в электрический сигнал при поглощении фотонов в результате внутреннего фотоэффекта в полупроводниках. Под действием излучения, энергия кванта которого превышает ширину запрещенной зоны, в полупроводнике образуется пара свободных носителей заряда: электрон в зоне проводимости и дырка в валентной зоне. Под действием электрического поля, сформированного потенциальным барьером р-п перехода или напряжением обратного смещения, происходит разделение генерированных оптическим излучением носителей заряда (фотоносителей), в

результате чего через p-i-n фотодиод протекает фототок.

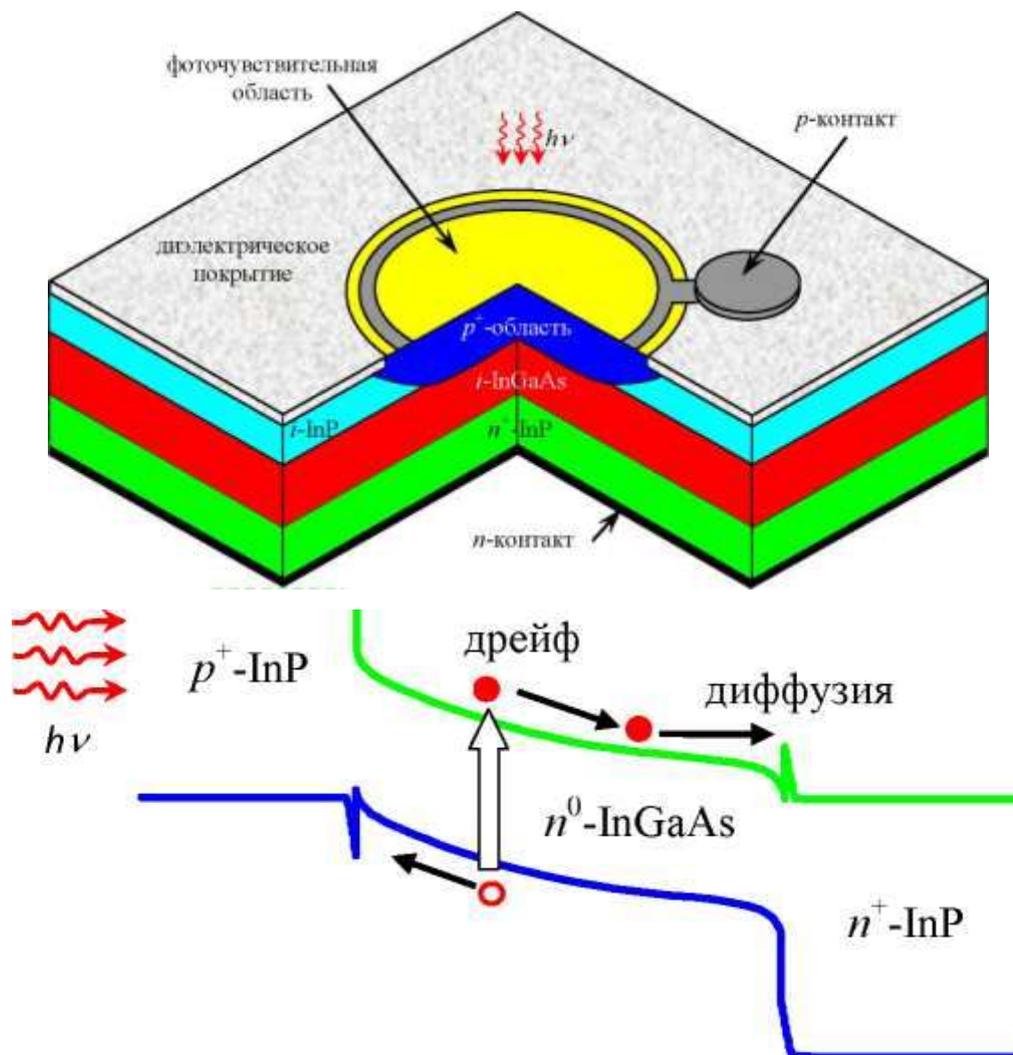


Рисунок 4.3 - Структура InGaAs/InP *p-i-n* фотодиода и его зонная диаграмма

Современный волоконно-оптический фотодиодный модуль, который представляет собой кристалл планарного InGaAs/InP *p-i-n* фотодиода с диаметром фоточувствительной области 40 мкм, соединенный с одномодовым оптическим волокном и помещенный в герметичный металлический корпус (рис. 4.4).



Рисунок 4.4 - Внешний вид волоконно-оптического фотодиодного модуля

Волоконно-оптический фотодиодный модуль работает в спектральном диапазоне от 800 до 1700 нм, длина волны максимума спектральной чувствительности составляет 1550 нм (рис. 4.5).

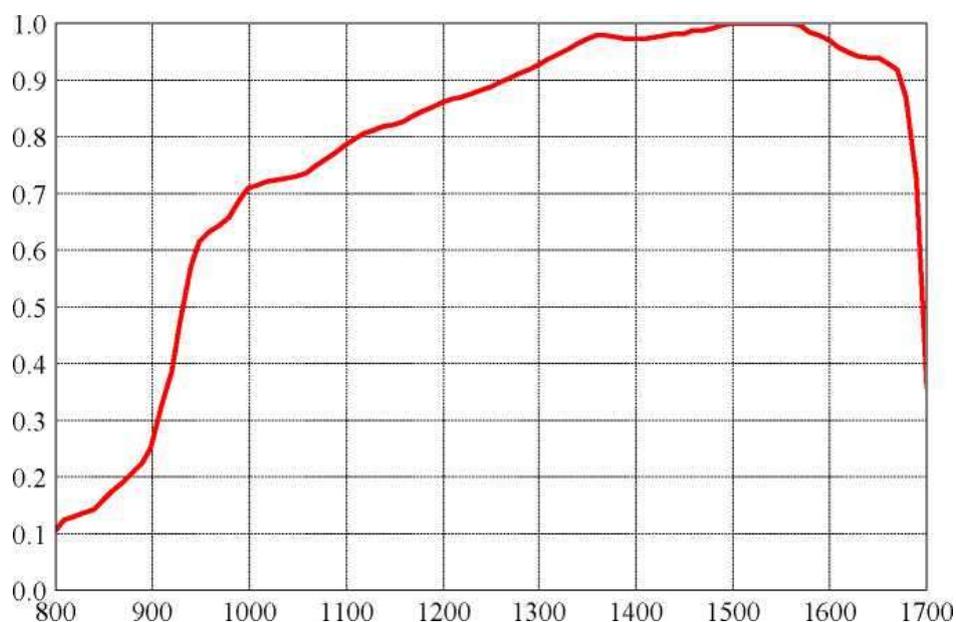


Рисунок 4.5 - Относительная спектральная характеристика InGaAs/ InP *p-i-n* фотодиода

Величина темного тока составляет 3.7 пА при напряжении смещения -2.0 В и 5.4 пА при напряжении смещения -20 В (рис. 4.5). Пробивное напряжение волоконно-оптического фотодиодного модуля равняется 40 В.

4.3 Светоизлучающие диоды

Принцип действия светодиодов основан на явлении электролюминесценции при протекании тока в структурах с прямо смещенным $p-n$ переходом. Под действием напряжения прямого смещения уменьшается высота потенциального барьера $p-n$ перехода, и в область перехода инжектируются основные носители заряда, где они рекомбинируют, испуская фотоны. Цвет свечения, возникающего при инжекционной электролюминесценции, зависит от ширины запрещенной зоны полупроводникового материала и природы примесей, которые легированы в данный полупроводниковый материал.

В настоящее время достигнут существенный прогресс в области физики и технологии изготовления эпитаксиальных светодиодных квантоворазмерных гетероструктур на основе твердых растворов AlGaInN и AlGaAsP , что позволило получить рекордные эффективности преобразования электрической энергии в световую (до 100 люмен/Ватт) для светодиодов в зеленом, синем и фиолетовом диапазонах спектра.

На рисунке 4.6 показана конструкция светодиода

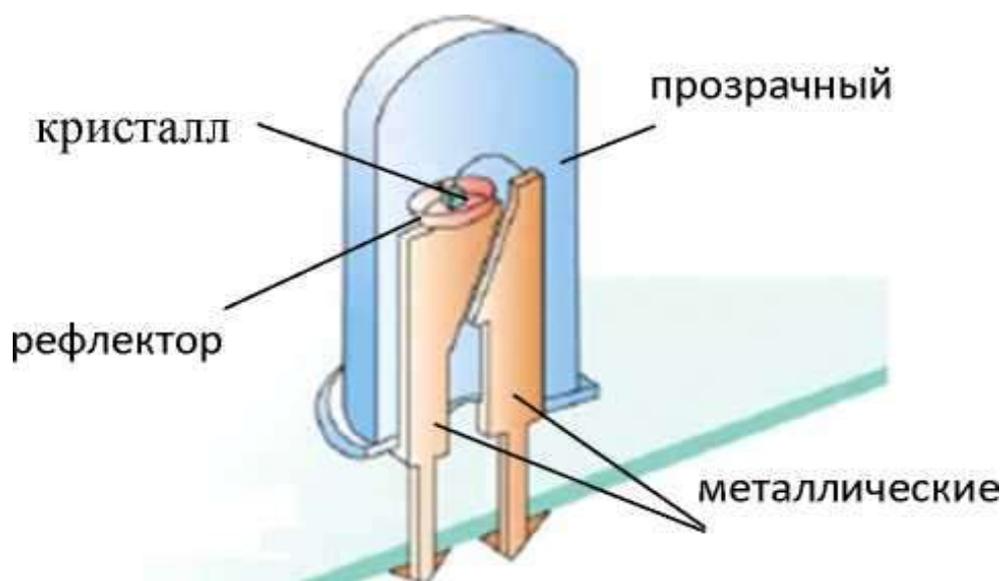


Рисунок 4.6 - Поперечное сечение светодиода

Свет, излучаемый полупроводниковым кристаллом светодиода, попадает в миниатюрную оптическую систему, образованную сферическим рефлектором и самим прозрачным корпусом диода, имеющим форму линзы. Изменяя конфигурацию рефлектора и линзы, добиваются необходимой направленности излучения.

Характерная для светодиода диаграмма направленности имеет максимум светового потока вдоль оси излучения, интенсивность которого спадает по мере отклонения от оси.

Внешний вид современного квантоворазмерного GaAlAs суперяркого красного светодиода в 5 мм корпусе, приведен на рис. 4.7.

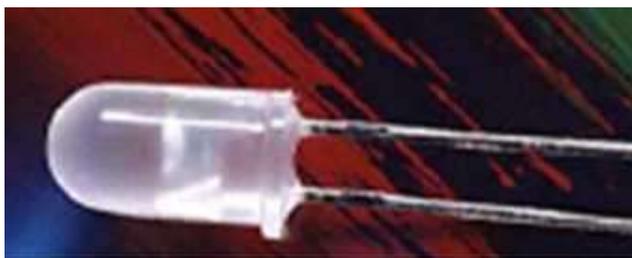


Рис. 4.7 - Внешний вид 5 мм светодиода.

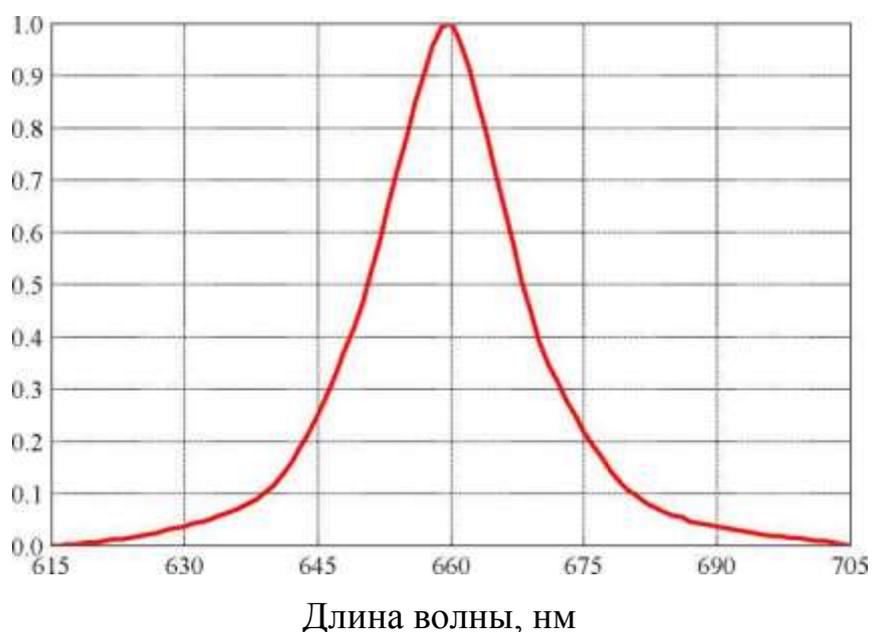


Рисунок 4.8 - Относительная спектральная характеристика квантоворазмерного GaAlAs суперяркого красного светодиода. Светодиод излучает в спектральном диапазоне от 615 до 705 нм (рис. 4.8).

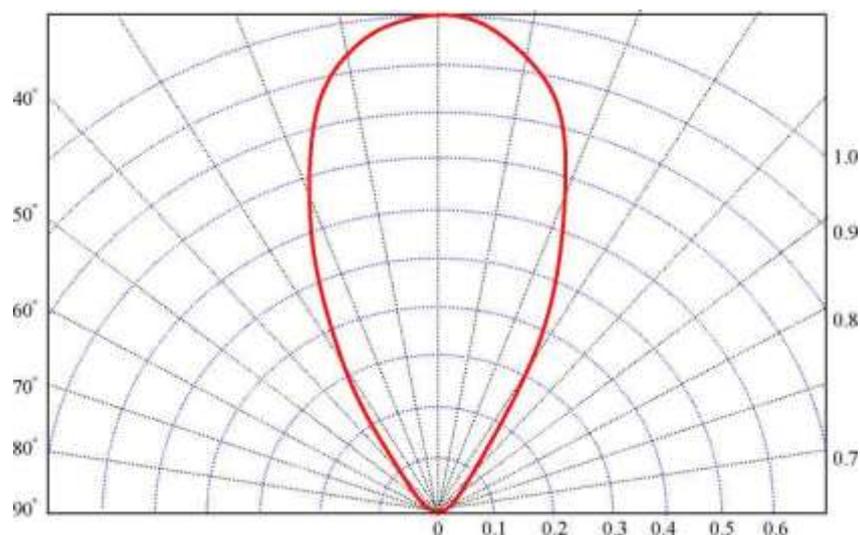


Рис.4.9 – Диаграмма направленности излучения светодиода

Центральная длина волны излучения светодиода равна 660 нм, доминирующая длина волны равна 640 нм, а ширина спектра излучения 20 нм. Угол излучения составляет 22° (рис. 4.9).

Рассмотрим основные характеристики светодиодов.

Спектральная характеристика отражает зависимость спектральной плотности мощности излучения светодиода от длины волны (рис. 4.10).

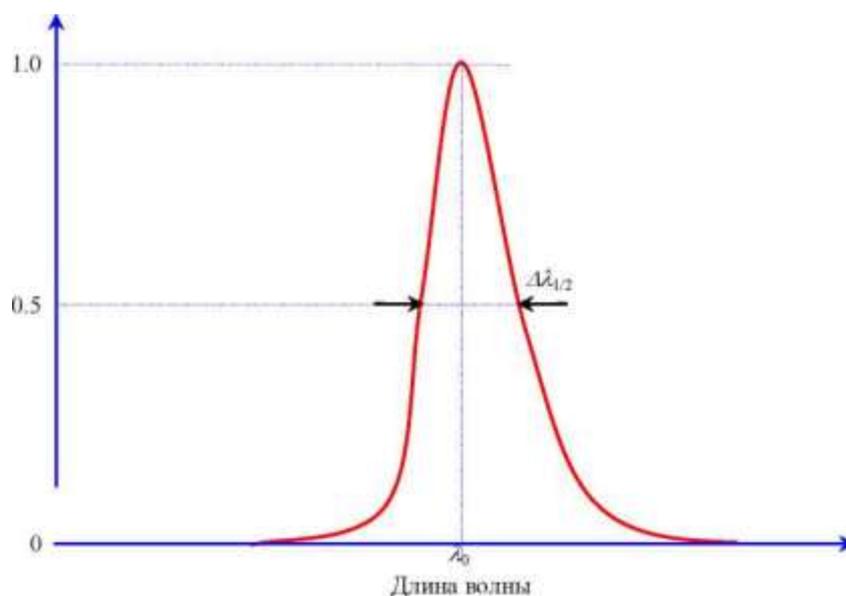


Рисунок 4.10 - Относительная спектральная характеристика светодиода

Центральная длина волны излучения λ_0 - длина волны, соответствующая максимальной спектральной плотности мощности излучения светодиода.

Современные светодиоды перекрывают спектральный диапазон длин волн от

0.26 мкм до 4.5 мкм.

Современные $p-i-n$ фотодиоды на основе кремния, германия или гетероструктур АШВУ перекрывают спектральный диапазон длин волн от 0.3 мкм до 3.0 мкм.

На рис. 4.11 показана эквивалентная электрическая схема высокоскоростного InGaAs/InP $p-i-n$ фотодиода, которая состоит из источника фототока I_{ph} , дифференциального сопротивления R_{pn} и емкости C_{pn} $p-n$ перехода фотодиода, паразитной емкости C_s , последовательного сопротивления контактов R_s , емкости корпуса C_p и индуктивности корпуса.

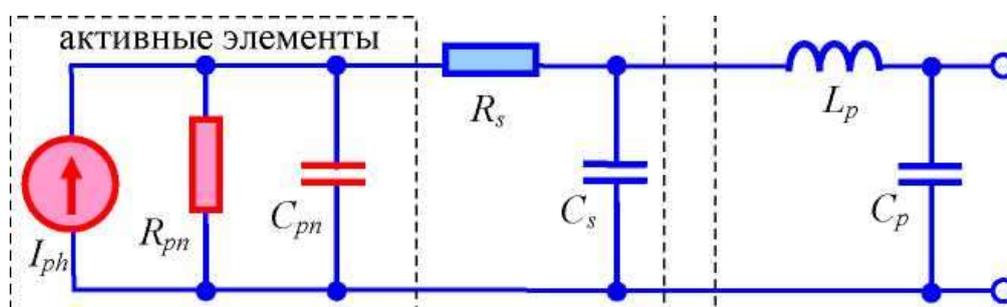


Рисунок 4.11 - Эквивалентная электрическая схема $p-i-n$ фотодиода.

Элементы I_{ph} , R_{pn} и C_{pn} электрической цепи фотодиода являются активными и зависят от частоты, напряжения смещения и мощности падающего на фотодиод оптического излучения.

Элементы цепи R_s , C_s , L_p и C_p являются пассивными элементами и определяются только конструкцией $p-i-n$ фотодиода. Паразитная емкость C_s является емкостью МДП-структуры кристалла фотодиода, которая состоит из металла контакта к p^+ - области, пассивирующего диэлектрика и полупроводниковой структуры фотодиода.

Индуктивность корпуса складывается из индуктивности проволоки, соединяющей кристалл фотодиода с ножками корпуса и индуктивности ножек корпуса L_p . Емкость корпуса определяется как непосредственно геометрическими размерами корпуса и расположением ножек, так и расположением кристалла в корпусе.

Для достижения максимальной предельной частоты при разработке $p-i-n$ фотодиода необходимо минимизировать значения элементов R_s , C_s , L_p и C_p .

5. Активные устройства СВЧ

5.1 Диапазон СВЧ

Развитие систем связи идет в направлении внедрения сложных и цифровых сигналов, повышения скорости передачи цифровых потоков, что в свою очередь приводит к расширению спектра передаваемых частот и необходимости использования диапазона *сверхвысоких частот* (до 100 ГГц).

По международным стандартам к диапазону СВЧ относят сантиметровый диапазон волн (3 ... 30 ГГц), но в обиходе к этому диапазону причисляют области метровых (ОВЧ), дециметровых (УВЧ) сантиметровых (СВЧ) и миллиметровых (КВЧ) волн.

Нижняя граница СВЧ диапазона определяется невозможностью использования колебательных систем с сосредоточенными постоянными.

На частотах выше 300 МГц катушка индуктивности колебательного контура вырождается в один неполный виток, а требуемая емкость контура становится соизмеримой с входной емкостью транзистора совместно с емкостью монтажа.

Контур превращается в отрезок линии. В диапазоне СВЧ используются пассивные элементы с распределенными параметрами, передача энергии с помощью полых труб (волноводов), конструкция активных устройств (усилителей, генераторов) с непосредственным энергетическим обменом между электронным потоком и электромагнитным полем колебательной системы.

Верхняя граница СВЧ диапазона определяется близостью к тепловому излучению (длинным инфракрасным волнам) где требуются иные подходы к генерированию, усилению и передаче электромагнитной энергии.

5.2 Элементная база СВЧ

В приемниках СВЧ приходится применять совершенно другую элементную базу и материалы для основных узлов.

В качестве *резонансных систем* применяются отрезки коаксиальных или микрополосковых линий и объемные резонаторы.

Общим свойством всех этих элементов является *многоволновость* - способность резонировать на большом количестве собственных частот.

Для создания широкодиапазонных фильтров в диапазонах сантиметровых и миллиметровых волн в настоящее время применяют высокочастотные монокристаллические *ферритовые резонаторы* (добротность 5000 ... 10 000), которые допускают механическую перестройку в широком диапазоне частот.

Большое распространение получили *резонаторы на монокристаллах железомитриевого граната* (ЖИГ-сферы), имеющие диаметр 0,3 ... 1 мм. На ЖИГ резонаторах разработаны фильтры для диапазона частот от 2 до 40 ГГц.

Усиление СВЧ колебаний обычным усилительным каскадом, включающим в себя отдельную резонансную систему и усилительный прибор возможно на частотах метрового и дециметрового диапазонов.

На частотах сантиметрового диапазона часто используются усилительные элементы, работающие на новых принципах усиления. Обычные лампы и транзисторы не обеспечивают устойчивую работу в диапазоне СВЧ.

В качестве *элементной базы* могут использоваться СВЧ транзисторы, диоды Ганна, лавинопролетные и туннельные диоды, варакторные диоды полупроводниковых параметрических усилителей, лампы бегущей волны, клистроны и некоторые другие.

Основным источником помех в СВЧ диапазоне являются собственные шумы приемника. Поэтому к усилителям СВЧ предъявляются жесткие требования с точки зрения обеспечения малых собственных шумов. Наименьший уровень шумов имеют *квантовые парамагнитные усилители*.

В схемах *гетеродинов* сантиметрового диапазона волн используются отражательные клистроны, малогабаритные и маломощные магнетроны, лампы обратной волны и другие электронные приборы.

В *смесителях* приемников применяются СВЧ транзисторы и полупроводниковые диоды.

Кроме общих требований к элементной базе и устройствам СВЧ аппаратуры предъявляется ряд специфических требований:

- высокая точность изготовления элементов, обусловленная зависимостью электрических параметров устройств от их геометрических размеров;
- применение металлов с высокой проводимостью и высокое качество обработки токонесущих поверхностей с целью получения минимальных активных потерь;
- отсутствие на токонесущих поверхностях окислов и загрязнений, приводящих к росту диэлектрических потерь;

Элементная база приемников СВЧ интенсивно развивается. Большие достижения в разработке маломощных СВЧ транзисторов привели к возможности их широкого использования в сигнальном тракте приемника.

5.3. Малошумящие транзисторные усилители СВЧ

К малошумящим усилителям СВЧ предъявляется комплекс достаточно жестких и в известной мере противоречивых *требований*. Они должны обладать:

- очень малым коэффициентом шума;
- высоким коэффициентом усиления;
- широким динамическим диапазоном;
- равномерной АЧХ и линейной ФЧХ в широкой полосе частот.

Полоса усиливаемых частот делается достаточно широкой, чтобы исключить необходимость перестройки усилителя.

В настоящее время применительно к системам радиосвязи, радиовещания и телевидения в наибольшей мере этим требованиям удовлетворяют транзисторные малошумящие усилители. Используются:

- биполярные транзисторы СВЧ на частотах до 7 ГГц;
- полевые транзисторы с затвором Шоттки до миллиметрового диапазона включительно.

Свойства усилителя диапазона СВЧ описываются параметрами, отличающимися от параметров усилителей умеренно высоких частот, что связано с особенностью измерений на СВЧ.

Рассматриваются:

- входные и выходные коэффициенты отражения Γ_1 и Γ_2 ;
- функции усиления и отражения мощности K_p и $K_{от}$.

Важную роль играют шумовые параметры (коэффициент шума, шумовое число, мера шума).

5.4. Структурная схема однокаскадного усилителя СВЧ

На рис. 5.1 показана простейшая структурная схема однокаскадного усилителя СВЧ. Усилительный прибор представлен в виде четырехполюсника, описываемого *волновыми параметрами матрицы рассеяния* (системой S - параметров).

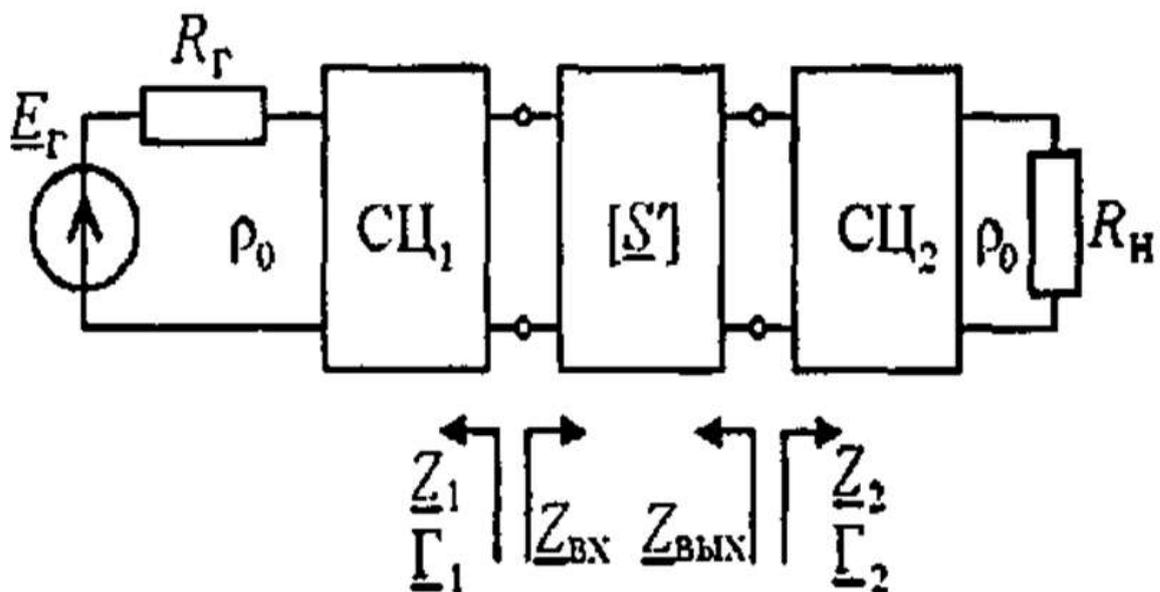


Рис.5.1 – Структурная схема однокаскадного усилителя

Эти параметры могут быть определены методом измерения падающих и отраженных волн или рассчитаны по известным классическим F-параметрам усилительного прибора.

Волновые уравнения относительно комплексных амплитуд падающих и отраженных волн позволяют определить характеристики усилителя радиосигналов диапазона СВЧ при различных параметрах источника сигнала и нагрузки.

Усилитель согласуется по входу и выходу с источником сигнала и с нагрузкой ($R_r = p_0$, $R_n = p_0$).

Реальные входной и выходной СВЧ тракты имеют в режиме согласования с источником сигнала и с нагрузкой волновые сопротивления порядка 50 Ом, которые отличаются от значений, необходимых для нормальной работы транзистора.

Поэтому усилитель должен включать в себя согласующие цепи СЦ1 и СЦ2, трансформирующие значения сопротивлений.

Важнейшим условием нормальной работы транзисторного усилителя СВЧ является его *устойчивость*.

Всегда существующие в усилителе внутренние и внешние паразитные обратные связи приводят к тому, что на столь высоких частотах транзистор в значительной степени утрачивает свойства невзаимности, и при определенных соотношениях нагрузочных сопротивлений Z_1 и Z_2 усилитель может самовозбудиться.

Самовозбуждение возможно в случае, когда S-параметры таковы, что активная составляющая входного или выходного сопротивления транзистора становится отрицательной, причем входное сопротивление зависит от его нагрузки, а выходное — от сопротивления источника сигнала, пересчитанного к его входным зажимам.

Отрицательному активному сопротивлению соответствует коэффициент отражения, модуль которого больше единицы.

Усилитель считается *безусловно (абсолютно) устойчивым* в заданном диапазоне частот, если он не возбуждается в этом диапазоне при подключении к транзистору любых комплексных сопротивлений Z_1 и Z_2 с положительными

активными составляющими.

Если существуют значения сопротивлений Z_1 и Z_2 , при которых усилитель способен самовозбудиться, он

является *потенциально устойчивым* (условно устойчивым, потенциально неустойчивым).

Для потенциально устойчивого усилителя важно определить области допустимых сопротивлений источника сигнала и нагрузки Z_1 и Z_2 на зажимах транзистора, при которых усилитель будет работать устойчиво.

Если эти сопротивления выбраны правильно, то активные составляющие соответственно выходного и входного сопротивлений транзистора положительны, и модули коэффициентов отражения от его выхода и входа меньше единицы.

При разработке усилителей СВЧ стремятся использовать транзисторы, находящиеся в области безусловной устойчивости. Если транзистор не удовлетворяет условиям абсолютной устойчивости, его переводят в эту область последовательным или параллельным включением *стабилизирующего резистора* в выходную цепь. Стабилизирующий резистор компенсирует отрицательную действительную часть выходного сопротивления во всем частотном диапазоне, вследствие чего эквивалентный активный элемент становится абсолютно устойчивым.

Соответствующим выбором параметров согласующих цепей СЦ1 и СЦ2 можно обеспечить различные режимы работы усилителя.

Наиболее часто используются режимы экстремального усиления и минимального шума. Реализуемый номинальный коэффициент усиления мощности определяется отношением мощности в нагрузке к номинальной мощности источника сигнала, т.е. к максимальной мощности, которую этот источник может отдать в комплексно-сопряженную нагрузку.

Коэффициент усиления имеет экстремальное значение в условиях одновременного комплексно-сопряженного согласования транзистора по входу и выходу, при котором коэффициенты отражения на его входе и выходе равны

нулю.

Важнейшим показателем транзисторных усилителей СВЧ является *коэффициент шума*, уменьшение которого часто составляет основную задачу проектирования. Коэффициент шума усилителя зависит от сопротивления источника сигнала, приведенного к зажимам транзистора, и может быть минимизирован выбором этого сопротивления. Обеспечение возможно меньшего коэффициента шума называют оптимальным рассогласованием по входу.

В усилителях на биполярных транзисторах используется преимущественно схема включения с общим эмиттером, при которой обеспечивается безусловная устойчивость в широком диапазоне частот. В широкополосных усилителях применяют включение с ОЭ, в узкополосных - с ОЭ и ОБ. Усилители на полевых транзисторах с затвором Шоттки строятся по схеме с общим истоком

Поскольку в узкополосных усилителях важнейшим параметром является коэффициент шума, согласующие цепи СЦ таких усилителей должны иметь *минимум активных потерь*, поэтому их строят на реактивных элементах, как правило, с распределенными параметрами.

Обычно узкополосные согласующие цепи выполняются в виде Г-образных звеньев или других комбинаций из отрезков микрополосковых линий, причем широко используются короткозамкнутые и разомкнутые шлейфы и четвертьволновые трансформаторы полных сопротивлений.

В качестве примера вспомним, что четвертьволновая короткозамкнутая линия без потерь имеет бесконечно большое входное сопротивление, а такая же разомкнутая на конце линия - бесконечно малое.

5.5. Принципиальная схема однокаскадного узкополосного малошумящего усилителя

Типичная схема однокаскадного узкополосного малошумящего усилителя на полевом транзисторе с затвором Шоттки показана на рис. 5.2.

Транзистор включен по схеме с общим истоком. Цепь согласования СЦ1 образована отрезками микрополосковых линий длиной l_1 , l_2 , согласующая цепь СЦ2 - отрезками 13, 14. В общем случае волновые сопротивления линий не одинаковы, отрезки 11, 13 образуют короткозамкнутые шлейфы.

Стабилизирующее сопротивление $R_{ст}$ по высокой частоте подключено параллельно выходным зажимам транзистора.

Для формирования АЧХ узкополосных малошумящих усилителей можно использовать *фильтры сосредоточенной избирательности* на входе или на выходе. Применяются также *цепи отрицательной обратной связи* из реактивных элементов.

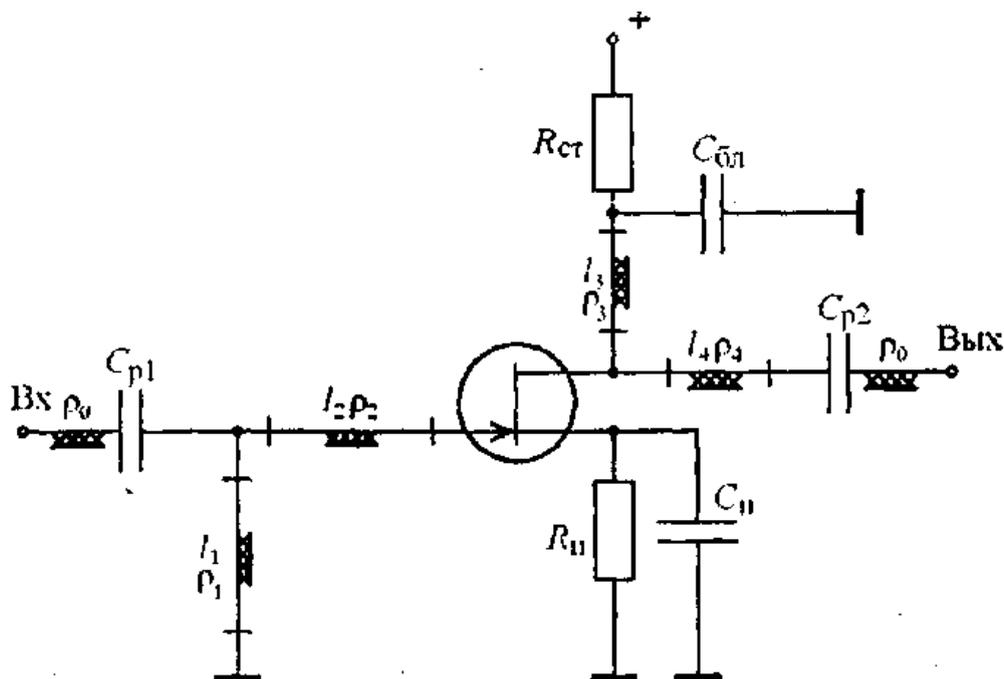


Рис. 5.2. Схема однокаскадного узкополосного малошумящего усилителя СВЧ

Поскольку коэффициент усиления транзистора уменьшается с ростом частоты, вопросы согласования в широкополосных усилителях решают на верхней частоте рабочего диапазона.

Возникающее при этом избыточное усиление на нижних частотах устраняется реактивными или диссипативными (поглощающими) выравнивающими цепями.

Балансная схема усилителя СВЧ

Противоречие между согласованием по мощности и рассогласованием по шумам в одном каскаде в значительной мере преодолевается в балансной схеме (рис. 5.3), которая в простейшем случае содержит два квадратурных направленных ответвителя:

- H_{O1} делит пополам мощность входного сигнала и подает ее на входы двух одиночных транзисторных каскадов,
- в H_{O2} усиленные мощности суммируются в общей нагрузке.

В рассматриваемой схеме в качестве делителя и сумматора мощности применены часто используемые двухшлейфовые направленные ответвители, образованные из четвертьволновых отрезков микрополосковых линий.

В плечах 3, 4 H_{O1} сигналы сдвинуты по фазе на 90° , в плечах 2 обоих H_{O} , куда мощность теоретически поступать не должна, включены согласованные балластные сопротивления. Поступающие на входы 3 и 4 H_{O2} усиленные сигналы со сдвигом фаз 90° суммируются в плече 1.

Коэффициент усиления балансного усилителя равен коэффициенту усиления одиночного, его динамический диапазон почти вдвое шире, чем у одиночного.

Анализ показывает, что даже если одиночные усилители по отдельности согласованы плохо, балансный усилитель оказывается практически идеально согласованным по входу и выходу, что облегчает создание многокаскадных усилителей.

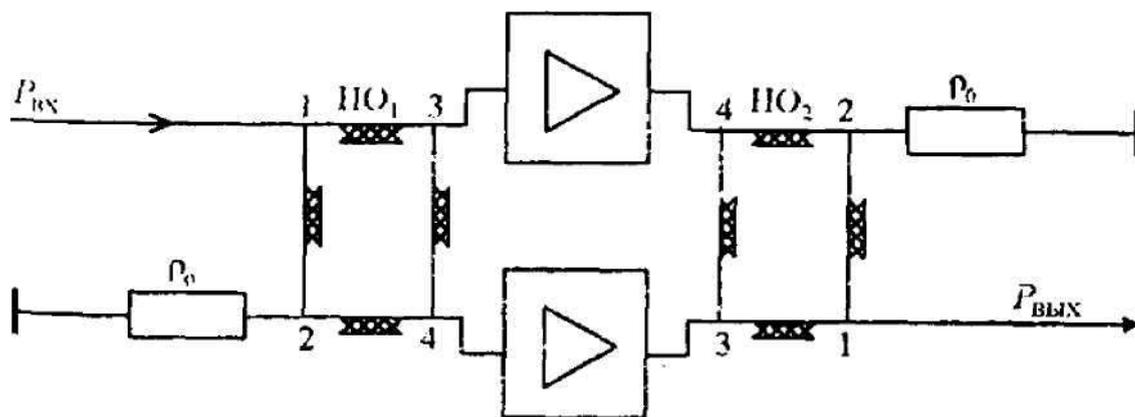


Рис. 5.3. Усилитель СВЧ по балансной схеме

В настоящее время транзисторные маломощные усилители СВЧ изготавливаются преимущественно в виде гибридных интегральных микросхем с

навесными корпусными и бескорпусными активными элементами.

Усилители в виде *полупроводниковых интегральных микросхем* уступают гибридным по шумовым показателям и повторяемости параметров.

Полосы усиления составляют 4...80 %, коэффициенты усиления на каскад 4...15 дБ (типичные значения 5...8 дБ), коэффициенты шума 2...6 дБ (шумовая температура 170...870 К), динамический диапазон 80...90 дБ.

Значительное улучшение шумовых показателей обеспечивается *охлаждением усилителей* до температуры жидкого азота (77 К), водорода (20 К) или гелия (4,2 К).

Так, усилители на полевых транзисторах с затвором Шоттки, охлаждаемые до температуры жидкого водорода, имеют шумовую температуру 30...50 К (коэффициент шума 0,4...0,7 дБ). Однако применение криогенной системы значительно ухудшает массогабаритные показатели приемников, ведет к повышению стоимости и потребления энергии, снижению надежности.

5.6. Транзисторные преобразователи СВЧ

В диапазоне СВЧ биполярные транзисторы используются как *смесители преобразователей частоты* до частот 4...6 ГГц, на более высоких частотах лучшие показатели имеют преобразователи на полевых транзисторах с затвором Шоттки (ПТШ).

На рис. 5.4 приведена схема смесителя СВЧ на биполярном транзисторе. Транзистор включен по схеме с общей базой. Колебания сигнала и гетеродина поданы на эмиттер через направленный ответвитель НО, который служит для развязки цепей сигнала и гетеродина.

Контур L_1C_2 в цепи эмиттера настроен на промежуточную частоту и устраняет обратную связь по току этой частоты. Контур L_2C_4 в выходной цепи также настроен на промежуточную частоту и выделяет ее из всего набора частот в выходном токе транзистора.

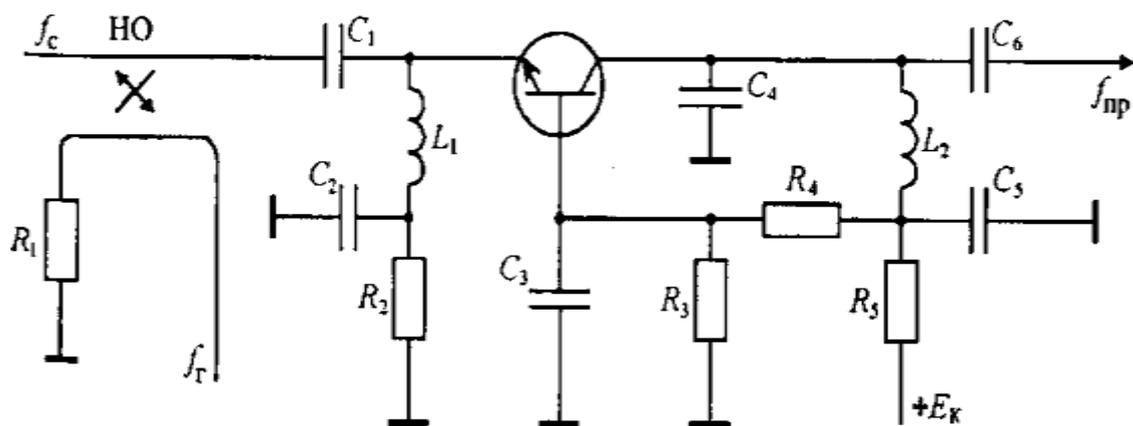


Рис. 5.4. Схема смесителя СВЧ на биполярном транзисторе

Исходное смещение на базу подано через делитель R_3R_4 . Конденсаторы C_1 и C_6 разделительные, а C_1 одновременно согласующий.

Схема смесителя СВЧ на полевом транзисторе с затвором Шоттки при подаче колебаний гетеродина и сигнала на затвор через направленный ответвитель приведена на рис. 5.5. В качестве фильтра сигнала и одновременно согласующей цепи используются отрезок микрополосковой линии длиной $l_2 = X_c / 4$ и короткозамкнутый шлейф $l_1 = X_c / 4$. Через шлейф подается напряжение смещения на затвор (E_3). В выходной стоковой цепи транзистора помимо фильтра промежуточной частоты (ФПЧ) используется ФВЧ, функции которого выполняет разомкнутый отрезок линии длиной $l_3 = X_c / 4$, обеспечивающий короткое замыкание тока коллектора на частоте гетеродина и частично ослабляющий колебания других комбинационных частот во избежание перегрузки УПЧ напряжением гетеродина.

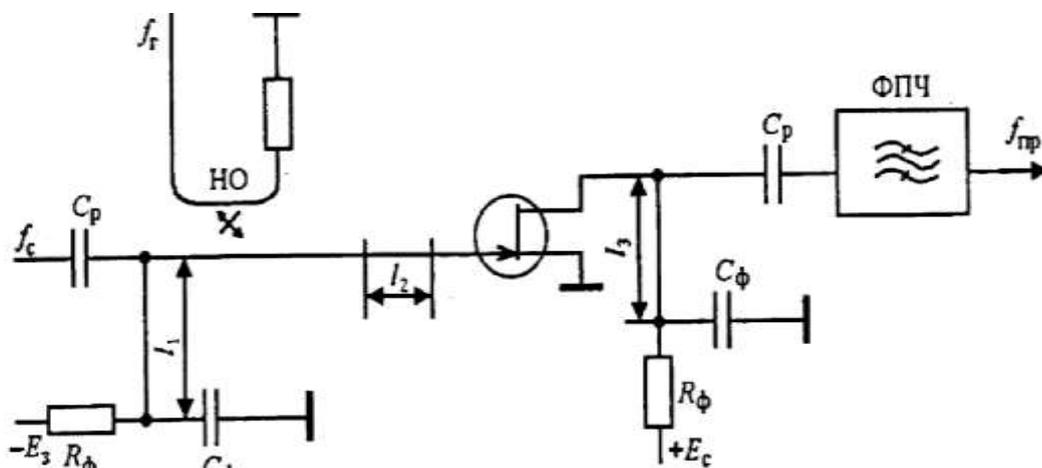


Рис. 5.5. Схема смесителя СВЧ на ПТШ

На схеме C_p — разделительные конденсаторы, C_ϕ и R_ϕ — конденсаторы и резисторы фильтров в цепи питания.

Недостатком схем, приведенных на рис. 5.4 и 5.5, является необходимость большой мощности гетеродина из-за ослабления ее в направленном ответвителе. Этому недостатка лишена схема на двухзатворном полевом транзисторе, представленная на рис. 5.6.

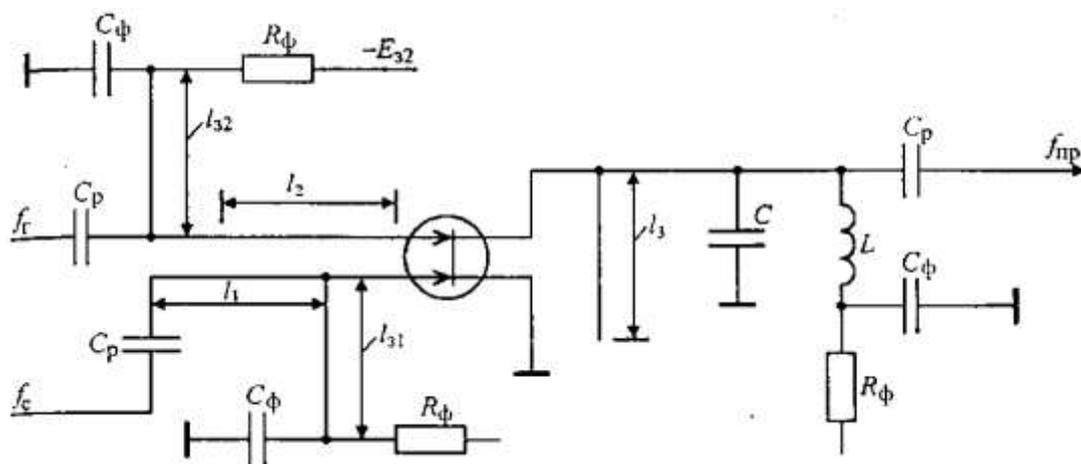


Рис. 5.6 Схема смесителя на двухзатворном полевом транзисторе

Колебания сигнала подводятся к первому затвору через отрезок микрополосковой линии длиной $l_1 = X_c / 4$, а колебания гетеродина через отрезок линии длиной $l_2 = X_2 / 4$ — ко второму затвору. Этим обеспечивается хорошая развязка цепей сигнала и гетеродина без громоздких мостов или направленных ответвителей. Отрезки микрополосковых линий длиной l_1 и l_2 являются согласующими цепями между источниками сигналов и гетеродина и входами транзистора. Исходные смещения на затворы подаются через короткозамкнутые шлейфы длиной $l_{31} = X_c / 4$ и $l_{32} = X_2 / 4$. Разомкнутый шлейф длиной $l_3 = X_r / 4$ обеспечивает короткое замыкание стока для колебаний гетеродина.

5.7 Интегральные приемные СВЧ модули

Приемным модулем называется конструктивно и функционально законченный блок, выполняющий функции усиления, преобразования частоты, фильтрации и обработки сигналов.

Интегральные модули объединяют несколько интегральных функциональных узлов: усилитель, фильтр, смеситель. Они не содержат разъемных соединений, малогабаритны и надежны. На рис. 5.7 показана структурная схема СВЧ модуля многоцелевого назначения.



Рис. 5.7. Структурная схема СВЧ модуля многоцелевого назначения.

Этот модуль выполняет функции линейной части приемного тракта. Он может использоваться в станциях радиосвязи, на радиорелейных линиях связи и т. д. В радиолокационных станциях используются приемопередающие модули, объединяющие передатчик и приемно-усилительную часть радиоприемника (рис. 5.8).

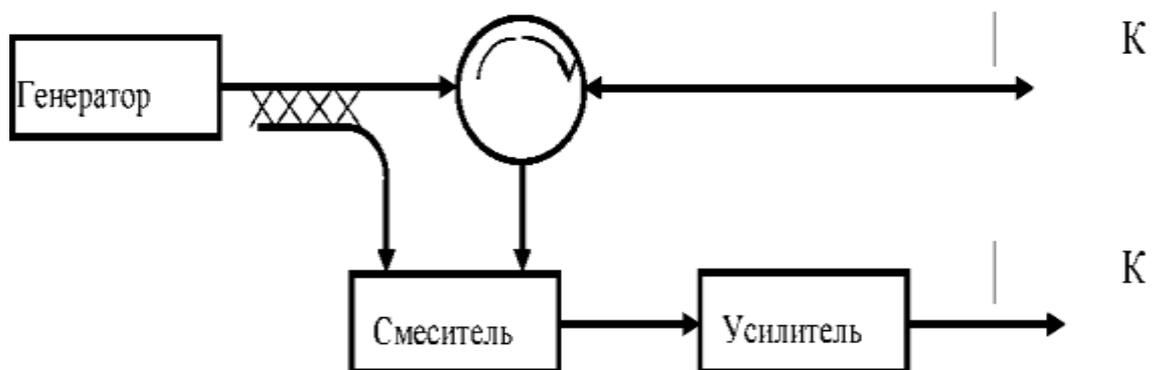


Рис. 5.8. Приемо-передающий модуль СВЧ

Сигнал генератора поступает на циркулятор, развязывающий передающую и

приемную часть модуля. Далее он поступает в антенну и излучается в пространство.

Принятый той же антенной отраженный сигнал с циркулятора поступает на смеситель, на второй вход которого подается часть мощности от генератора. Разностная частота сигнала на выходе смесителя равна доплеровскому сдвигу частоты, возникающему за счет движения цели.

Модуль используется в доплеровских РЛС, позволяющих измерять радиальную скорость объекта.

СВЧ модули реализуются в основном по гибридно-интегральной технологии. Модуль состоит из нескольких кристаллов, расположенных на общей диэлектрической подложке и соединенных между собой отрезками микрополосковых линий.

5.8. Регенеративные усилители

Регенеративное усиление

Регенеративным усилителем называют устройство, обеспечивающее усиление радиосигналов за счет внесения в электрическую цепь отрицательного сопротивления. Внесение отрицательного сопротивления соответствует внесению в эту цепь дополнительной энергии от источника постоянного тока или от генератора высокочастотной накачки.

В диапазоне СВЧ используются :

- негатронные усилители;
- параметрические усилители;
- квантовые парамагнитные усилители.

Принцип регенеративного усиления можно усвоить, ориентируясь на эквивалентную схему усилителя (рис. 1.9).

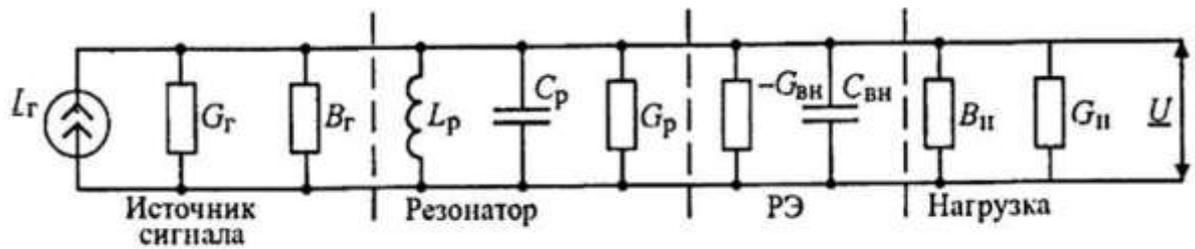


Рис.5.9. Эквивалентная схема регенеративного усилителя

Колебания от источника сигнала I_g , с выходной активной проводимостью G_r , и реактивной проводимостью B_r поступают в резонатор с параметрами L_p , C_p , G_p . За счет регенерации в резонатор вносятся отрицательная проводимость $-GM$, которая обычно сопровождается вносимой емкостью $C_{вн}$. За счет частичной компенсации потерь резонатора колебания усиливаются и поступают в нагрузку $G_{н1}$, $B_{н1}$, представляющую собой входную проводимость следующего каскада.

В рассматриваемой схеме нет развязки между входом и выходом усилителя.

Поэтому коэффициент усиления по мощности определяется как отношение мощности в нагрузке к номинальной мощности. Номинальная мощность

$$K_{P0} = P_{\text{вых}} / P_{\text{г ном}}$$

где $P_{\text{г ном}} = I_g^2 / 4G_T$ определяется в режиме согласования генератора с нагрузкой в отсутствие регенерации.

В нагрузке выделяется мощность

$$K_{P0} = 4 G_r G_{н1} / (G_3 - G_{вн})^2 = 4 G_r G_{н1} / G_3^2 (1 - \alpha)^2,$$

$$P_{\text{вых}} = U^2 G_{н1} = (I_g / G_{\Sigma})^2 G_{н1} = I_g^2 G_{н1} / (G_3 - G_{вн})^2,$$

где $G_3 = G_r + G_p + G_{н1}$ - эквивалентная проводимость нагруженного резонатора без учета действия регенерации. После подстановки, получаем значение коэффициента усиления мощности

где $\alpha = G_m / G_3$ - коэффициент регенерации. При $\alpha \rightarrow 1$ коэффициент усиления стремится к бесконечности, но на практике усиление приходится ограничивать величиной примерно 20 дБ, так как усилитель теряет устойчивость.

Полоса пропускания регенеративного усилителя уменьшается с увеличением коэффициента регенерации.

$$П_{0,7} = f_0 \delta_3 (1 - \alpha),$$

где δ_3 - затухание резонатора без регенерации. Уменьшение полосы пропускания при регенерации определяется компенсацией части потерь в резонаторе.

Таким образом, увеличение усиления сопровождается сужением полосы пропускания. В большинстве случаев удается совместить достаточное усиление и требуемую полосу пропускания.

Развязка входа и выхода регенеративного усилителя

В схеме, показанной на рис. 5.9, отсутствуют элементы развязки между входом и выходом усилителя. На самом деле развязка необходима по следующим причинам:

- необходимо исключить излучение усиленного сигнала антенной;
- необходимо исключить усиление шумов нагрузки усилителем.

Развязка выполняется с помощью невзаимных ферритовых устройств СВЧ: вентилях и циркуляторов.

Вентилем называют устройство СВЧ, обеспечивающее прохождение сигнала в прямом направлении с малым затуханием, а в обратном - с большим. Идеальный вентиль пропускает сигнал только в одном направлении. Схема регенеративного усилителя с вентилями показана на рис. 5.10. Первый ферритовый вентиль $\Phi В_1$ препятствует проникновению усиленного сигнала к источнику (в антенну), второй ферритовый вентиль $\Phi В_2$ препятствует проникновению шумов нагрузки в резонатор с элементом регенерации (усилитель).

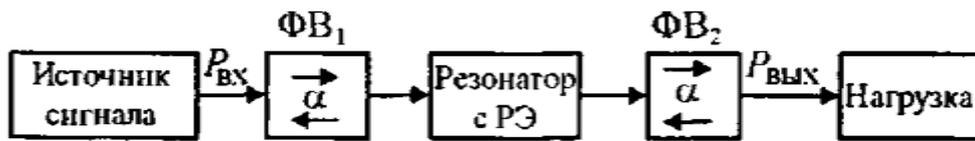


Рис.5.10 Использование вентиляей для развязки входа и выхода регенеративного усилителя

Циркулятор представляет собой невзаимное ферритовое устройство СВЧ с несколькими входами, в котором энергия передается направленно от первого входа ко второму, от второго к третьему и т. д. Используют трех и четырехплечные циркуляторы, имеющие, соответственно, три или четыре входа. На рис. 5.11 приведена схема регенеративного усилителя с циркулятором.

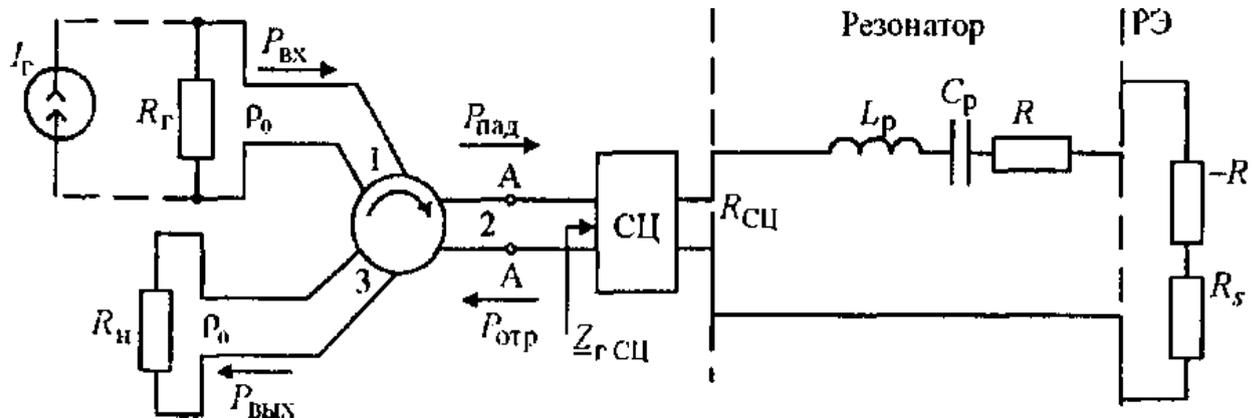


Рис. 5.11. схема регенеративного усилителя с циркулятором.

Входной сигнал от генератора через линию с волновым сопротивлением ρ_0 поступает на первый вход циркулятора и проходит на его второй вход. Далее через согласующую цепь он поступает в резонатор, где усиливается за счет регенерации.

Усиленный сигнал возвращается в циркулятор по той же линии и вновь попадает на вход 2.

Таким образом, в линии, которая связывает циркулятор с резонатором, существуют одновременно падающая (усиливаемая) и отраженная (усиленная) волна.

Усиленный сигнал передается по циркулятору на его третий вход и далее - в нагрузку. В случае согласования с нагрузкой, в третьей линии отсутствует

отраженная волна, благодаря чему усиленный сигнал не поступает на первый вход циркулятора, что обеспечивает развязку входа и выхода усилителя.

Усилители с вентилями называют *усилителями проходного типа*, а усилители с циркуляторами - *усилителями отражательного типа*. Отражательные усилители обеспечивают большую площадь усиления (произведение коэффициента усиления на полосу пропускания) по сравнению с проходными. Это объясняется тем, что в проходном усилителе резонатор шунтируется входными сопротивлениями двух линий (входной и выходной), а в отражательном - только одной.

Методы получения отрицательного сопротивления

В регенеративных усилителях современных радиоприемных устройств систем радиосвязи, радиовещания и телевидения отрицательные сопротивления могут реализовываться одним из трех способов:

- изменением реактивного параметра (чаще всего нелинейной емкости варикапа) под действием колебаний генератора накачки. На этом принципе строятся полупроводниковые параметрические усилители;
- на основе различных физических эффектов в таких полупроводниковых приборах-негатронах, как туннельные диоды (ТД), диоды Ганна (ДГ), лавинно-пролетные диоды (ЛПД) и др.;
- созданием внешней положительной обратной связи в цепях с трехэлектродными усилительными элементами и усилительными приборами, обычно транзисторами или интегральными микросхемами.

В отдельную группу можно выделить квантовые парамагнитные усилители, в которых регенеративное усиление обеспечивается за счет преобразования внутренней энергии возбуждения частиц вещества в электромагнитную энергию воздействующего на него поля сигнала.

5.9. Негатронные усилители

В современных радиоприемных устройствах СВЧ в принципе возможно

применение усилителей на туннельных диодах и диодах Ганна.

На основе *туннельных диодов* могут создаваться достаточно эффективные малошумящие усилители в диапазоне частот 0,3...20 ГГц. Эквивалентная схема туннельного диода представлена на рис. 5.12, а его вольтамперная характеристика - на рис. 5.13.

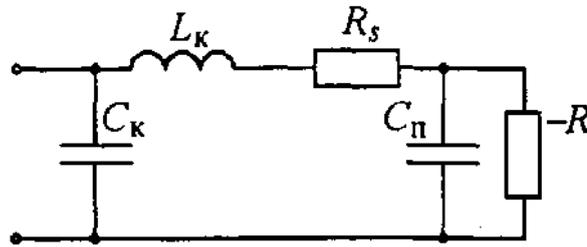


Рис. 5.12 – Эквивалентная схема туннельного диода

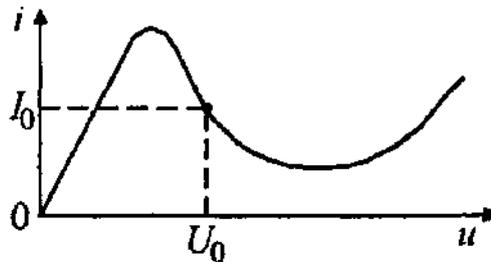


Рис.5.13 – Вольтамперная характеристика туннельного диода

С помощью низковольтного источника постоянного напряжения с малым внутренним сопротивлением рабочая точка (U_0) устанавливается вблизи перегиба падающего участка вольтамперной характеристики. В этом случае значение отрицательного дифференциального сопротивления

туннельного диода определяется наклоном вольтамперной характеристики в этой точке и для реальных приборов составляет несколько десятков Ом; R_s — сопротивление потерь диода; C_n — емкость открытого p-n перехода; C_k — емкость корпуса; L_k — индуктивность корпуса и выводов.

Туннельный диод обычно включают по отражательной схеме, резонатор

образуется внешней индуктивностью элементов настройки и емкостями диода.

Если пренебречь, как это часто делается, емкостью корпуса C_k , а L_k включить в индуктивность резонатора L_p , то эквивалентную схему сигнального контура можно представить в виде, приведенном на рис. 5.14, где СЦ - согласующая цепь.

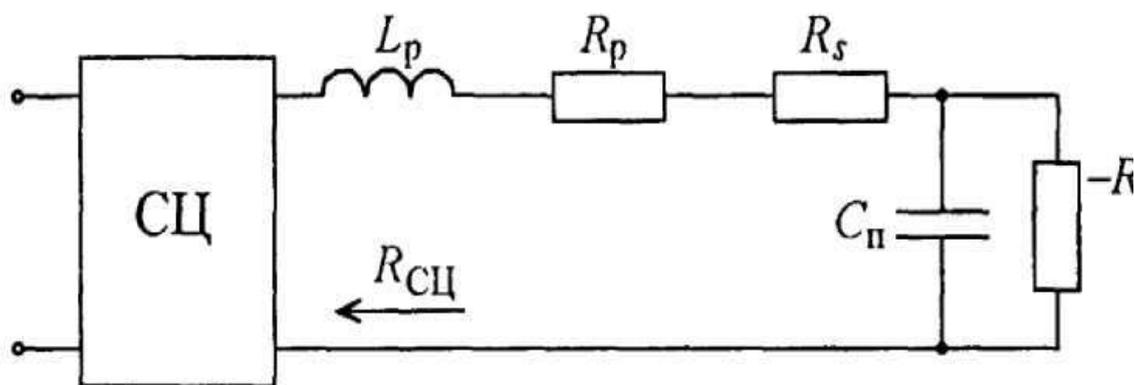


Рис. 5.14. Эквивалентная схема сигнального контура

Учитывая параметры современных туннельных диодов, можно считать, что сигнальный контур обеспечивает простой последовательный резонансной частотой

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_p C_{\Pi}}}$$

Туннельный диод обладает отрицательным сопротивлением в весьма широком диапазоне частот, от постоянного тока до предельной частоты, выше которой его сопротивление становится положительным.

В диапазоне частот, лежащем ниже предельной частоты, необходимо принимать меры для предотвращения самовозбуждения релаксационных колебаний, не контролируемых резонансным контуром.

Для исключения паразитных колебаний параллельно ТД включают стабилизирующую цепь, состоящую из резистора $R_{ст}$ и дополнительного контура, уменьшающего влияние $R_{ст}$ на рабочей частоте.

Для получения устойчивого режима приходится ограничиваться получением устойчивого усиления $K_{p0} = 16... 18$ дБ.

Обычно усилители на ТД имеют *относительную полосу усиливаемых*

частот порядка 6. ..7 % от рабочей частоты, а для расширения полосы пропускания применяют специальные корректирующие цепи.

Основными источниками шумов в усилителях на ТД являются *дробовые шумы* открытого *p-n* перехода и *тепловые шумы* сопротивления потерь диода. Интенсивность тепловых шумов определяется на основе формулы Найквиста, а средний квадрат тока дробовых шумов открытого *p-n* перехода следует из формулы Шотки:

$$\overline{I_{ш\ dr}^2} = 2qI\Pi_{ш} .$$

Основной вклад вносят дробовые шумы; потери, вносимые ферритовым циркулятором, увеличивают коэффициент шума усилителя на 0,5 ...1 дБ, а потери в стабилизирующей цепи - еще на 0,5 дБ.

Конструкция усилителя на ТД определяется диапазоном рабочих частот. В дециметровом диапазоне применяются полосковые конструкции, в сантиметровом — полосковые и волноводные.

Усилители на ТД обладают хорошими массогабаритными показателями, экономичностью, возможностью микроминиатюризации. На частотах выше 3 ГГц шумовые параметры таких усилителей не превосходят показателей смесителей на диодах с барьером Шотки и неохлаждаемых усилителей на полевых транзисторах. Современные усилители на туннельных диодах работают на частотах до 20 ГГц, обеспечивая усиление 13...20 дБ на каскад при коэффициенте шума 5 ..6 дБ в полосе 10...15 %. Их недостатками являются малая мощность насыщения и низкая устойчивость к перегрузкам мощностью СВЧ. Поэтому в настоящее время эти усилителя практически вытеснены транзисторными и если применяются, то лишь в простых приемниках прямого усиления и некоторых других.

В радиоприемниках СВЧ возможно использование и регенеративных усилителей на *диодах Ганна*. Этот прибор представляет собой однородно легированный кристалл многодолинного полупроводника, чаще всего арсенида галлия электронной электропроводности или фосфида индия, с нанесенными на него с обеих сторон омическими контактами. Отрицательная

дифференциальная проводимость диода Ганна является следствием эффекта междолинного переноса электронов, характерного для полупроводников, имеющих в зоне проводимости несколько областей.

Диоды Ганна используются в основном для создания генераторов небольшой мощности в диапазоне частот 4...60 ГГц, однако могут работать и в усилительных режимах. Тот или иной режим определяется сочетанием внешней цепи и параметров диода.

Вследствие более высокого, чем у ТД, уровня шумов ($Ш = 8 \dots 22$ дБ) диоды Ганна не применяются для построения малошумящих усилителей, но могут использоваться в усилителях радиочастоты простых приемников СВЧ, особенно в трансиверах, а также в гетеродинных трактах супергетеродинов.

Поскольку усилители на *лавинно-пролетных диодах* обладают еще большими шумами ($Ш = 25 \dots 40$ дБ), в радиоприемной технике они практически не применяются.

5.10 Выводы

1. По международным стандартам к диапазону СВЧ относят сантиметровый диапазон волн (3 ... 30 ГГц), но в обиходе к этому диапазону причисляют области метровых (ОВЧ), дециметровых (УВЧ) сантиметровых (СВЧ) и миллиметровых (КВЧ) волн.

2. В приемниках СВЧ приходится применять совершенно другую элементную базу и материалы для основных узлов. В качестве резонансных систем применяются отрезки коаксиальных или микрополосковых линий и объемные резонаторы.

3. В схемах гетеродиновсантиметрового диапазона волн используются отражательные клистроны, малогабаритные и маломощные магнетроны, лампы обратной волны и другие электронные приборы.

4. В смесителях приемников применяются СВЧ транзисторы и полупроводниковые диоды

5. К малошумящим усилителям СВЧ предъявляется комплекс достаточно жестких и в известной мере противоречивых требований. Они должны обладать:

- очень малым коэффициентом шума;
- высоким коэффициентом усиления;
- широким динамическим диапазоном;
- равномерной АЧХ и линейной ФЧХ в широкой полосе частот.

6. Значительное улучшение шумовых показателей обеспечивается охлаждением усилителей до температуры жидкого азота (77 К), водорода (20 К) или гелия (4,2 К). Так, усилители на полевых транзисторах с затвором Шоттки, охлаждаемые до температуры жидкого водорода, имеют шумовую температуру 30...50 К (коэффициент шума 0,4...0,7 дБ). Однако применение криогенной системы значительно ухудшает массогабаритные показатели приемников, ведет к повышению стоимости и потребления энергии, снижению надежности.

7. В диапазоне СВЧ биполярные транзисторы используются как смесители

преобразователей частоты до частот 4...6 ГГц, на более высоких частотах лучшие показатели имеют преобразователи на полевых транзисторах с затвором Шоттки (ПТШ).

8. Приемным модулем называется конструктивно и функционально законченный блок, выполняющий функции усиления, преобразования частоты, фильтрации и обработки сигналов. Интегральные модули объединяют несколько интегральных функциональных узлов: усилитель, фильтр, смеситель. Они не содержат разъемных соединений, малогабаритны и надежны.

9. Регенеративным усилителем называют устройство, обеспечивающее усиление радиосигналов за счет внесения в электрическую цепь отрицательного сопротивления. Внесение отрицательного сопротивления соответствует внесению в эту цепь дополнительной энергии от источника постоянного тока или от генератора высокочастотной накачки.

10. С увеличением вносимого в контур отрицательного сопротивления добротность контура и усиление усилителя возрастают, однако при этом его полоса пропускания сужается.

11. В современных радиоприемных устройствах СВЧ в принципе возможно применение усилителей на туннельных диодах и диодах Ганна.

12. Современные усилители на туннельных диодах работают на частотах до 20 ГГц, обеспечивая усиление 13...20 дБ на каскад при коэффициенте шума 5...6 дБ в полосе 10...15 %. Их недостатками являются малая мощность насыщения и низкая устойчивость к перегрузкам мощностью СВЧ.

13. Режим работы по постоянному току туннельного диода в усилителе выбирают таким, чтобы рабочая точка помещалась на середине падающего участка ВАХ диода. Устойчивое положение рабочей точки обеспечивается подбором сопротивлений резисторов делителя, при которых нагрузочная прямая по постоянному току пересекает ВАХ диода только в одной точке. Критическая частота туннельного диода должна в 3 - 4 раза превышать максимальную рабочую частоту сигнала.

14. Усиление сигнала в параметрическом усилителе основано на

преобразовании энергии высокочастотных колебаний вспомогательного генератора, называемого генератором накачки, в энергию принимаемого сигнала с помощью параметрических реактивных приборов (емкости или индуктивности). Обычно активным элементом параметрического усилителя является нелинейная емкость перехода параметрического диода. Источником энергии параметрического усилителя является генератор накачки (гетеродин), а не батарея постоянного тока, как в транзисторных усилителях.

15. Усиленный в регенеративном параметрическом усилителе сигнал обычно снимают с входного контура, а не с выходного, как в транзисторном усилителе. Усиление обеспечивается за счет внесения во входной контур отрицательного сопротивления (регенеративное усиление).

16. Усиленный сигнал может выделяться на контуре промежуточной частоты, которая превышает частоту сигнала; при этом усиление по мощности зависит от отношения частот (нерегенеративное усиление).

17. В параметрическом усилителе обычно не удается реализовать очень высокий коэффициент усиления, так как при большом КРО усилитель из-за дестабилизирующих факторов может самовозбудиться, а его полоса пропускания становится очень узкой.

18. Для уменьшения шумовой температуры $T_{ш}$ применяют циркулятор, осуществляют охлаждение усилителя жидким азотом или жидким гелием, уменьшают потери в контурах, используют оптимальную промежуточную частоту.

19. Квантовые парамагнитные усилители (КПУ) являются наилучшим типом усилителей с точки зрения минимального уровня собственного шума. При глубоком охлаждении может быть достигнута шумовая температура усилителя порядка 4 ... 6 К. Это обеспечивает наивысшую достижимую чувствительность приемника диапазона СВЧ.

20. В квантовых усилителях за счет действия поля накачки создается инверсия населенностей энергетических уровней на частоте усиливаемого сигнала. Электромагнитное поле сигнала вызывает переход микрочастиц с

верхнего уровня на более низкий, при этом излучаемые кванты складываются с энергией сигнала, в результате чего происходит усиление сигнала.

21. Мазеры являются самыми малошумящими усилителями, однако мазер — громоздкое и дорогостоящее устройство.

5.11 Контрольные вопросы

1. Какие частоты относят к диапазону СВЧ?
2. Какая элементная база используется в диапазоне СВЧ?
3. Нарисуйте схему усилителя СВЧ на транзисторе.
4. Расскажите о принципе работы регенеративного усилителя.
5. Нарисуйте схему транзисторного преобразователя СВЧ с НО.
6. Какие меры принимают при построении преобразователей СВЧ для предотвращения вредного воздействия последствий многократного взаимодействия колебаний комбинационных частот?
7. Нарисуйте схемы балансных и комбинационных транзисторных смесителей СВЧ.
8. Нарисуйте схему диодного преобразователя частоты, простого и балансного.
9. Как происходит преобразование частоты в диодном ПЧ?
10. Как происходит параметрическое усиление колебаний в диодном ПЧ?
11. Что значит инвертирующий преобразователь?
12. Почему ППУ имеют малые собственные шумы?
13. Поясните принцип действия квантовых парамагнитных усилителей.

6 Антенные фазированные решетки

В целом структура современного радиолокатора мало отличается от систем, разработанных на заре становления радиолокации, — антенная система, приемник, передатчик, система обработки информации.

Развитие техники в этой области двигалось в направлении усовершенствования каждой составной части параллельно.

Однако именно развитию антенных систем и постепенному интегрированию антенны как таковой с трактами приемника и передатчика уделялось особое внимание.

В совокупности с совершенствованием элементной базы и переходом к использованию в радиолокационных целях все более высоких частот, в широкое применение вошли антенные системы типа фазированная решетка.

Фазированная антенная решетка — антенна, состоящая из группы излучателей, фазой сигнала в которых можно управлять независимо, формируя эффективное излучение антенны в целом на одном, желаемом направлении, отличном от направления эффективного излучения отдельного элемента.

Таким образом, появилась возможность эффективно управлять лучом антенны электронным способом

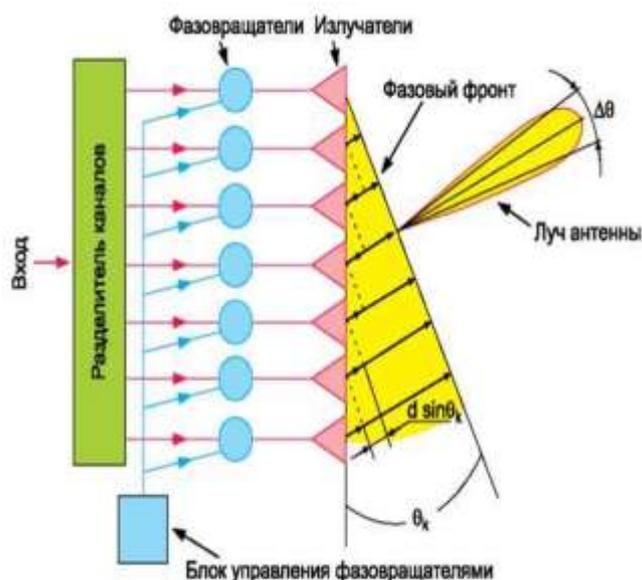


Рис. 6.1 Обеспечение наклона луча фазированной антенной решеткой

На рис. 6.1 схематично показан принцип формирования фазового фронта и направление суммарного луча антенной решетки перпендикулярно этой плоскости равных фаз.

Также на рис. 6.1 можем увидеть обобщенный принцип построения систем с использованием фазированных антенных решеток.

Входной сигнал делится на множество каналов, соответствующих количеству элементов решетки, сигнал в каждом канале получает фазовое смещение, необходимое для определенного положения луча (лучей) решетки в пространстве.

Следует разделять два основных вида систем на фазированных антенных решетках — пассивные антенные решетки и активные.

Основное различие таково: в пассивных антенных решетках имеется один мощный приемопередатчик, чей сигнал делится на все каналы.

В активных фазированных решетках (АФАР) канал каждого элемента решетки имеет свой собственный приемопередатчик.

Каждая из концепций имеет свои плюсы и минусы.

Пассивные решетки значительно дешевле, но требуют применения очень мощных источников сигнала, которым, в свою очередь, необходима сложная схема питания, охлаждения.

Активные решетки имеют огромный запас по надежности — выход из строя одного приемопередатчика не приводит к поломке всей системы, но количество используемых компонентов и сложность управления, синхронизации, в конце концов,

стоимость устройства превышает стоимость пассивной решетки на порядки.

Однако развитие современной базы электронных компонентов, миниатюризация и вывод в массовое производство еще совсем недавно штучных технологий позволяют системам на АФАР вытеснять пассивные решетки

не только с уже давно занятых позиций в авиационной и военной технике, но и в сугубо гражданских применениях — подповерхностном зондировании,

радиолокаторах систем организации воздушного движения, космических программах и т. д.

Их основным элементом является приемопередающий модуль (ППМ), в современных системах зачастую антенна отдельного элемента решетки является частью конструктива ППМ.

Пример внешнего вида современного ППМ показан на рис. 6.2.



Рис. 6.2. Внешний вид ППМ АФАР от компании Cassidian

По идеологии и схемотехнике приемопередающие модули могут реализовываться различными способами, но есть возможность обобщенного представления, составные части такой схемы, так или иначе, присутствуют во всех из них.

Поэтому остановимся только на этих элементах и постараемся очертить круг компонентов, которые позволят решить задачу конструирования АФАР в самых популярных диапазонах частот:

- L — 1-2 ГГц;
- S — 2-4 ГГц;
- X — 8-12 ГГц.

Структурная схема ППМ, которую предлагается принять за исходную, приведена на рис. 6.3.

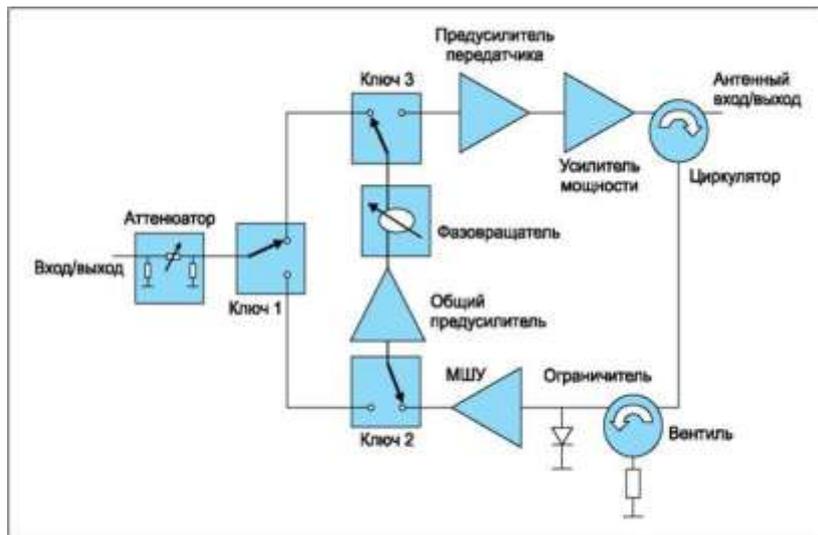


Рис.6.3 – Обобщенная структурная схема Р.П.

Список рекомендованной литературы:

1. Колосовский Е. А. Устройства приема и обработки сигналов. Учебное пособие для вузов. - М : Горячая линия-Телеком, 2007. - 456 с.: ил.
2. Радиоприемные устройства: Учебник для вузов / Н. Н. Фомин, Н. Н. Буга, О. В. Головин и др.; Под редакцией Н. Н. Фомина. - 3-е издание, стереотип. - М. : Горячая линия - Телеком, 2007. - 520 с.: ил.
3. Микроэлектронные устройства СВЧ / Г.И. Веселое, Е.Н. Егоров, Ю.Н. Алехин и др.; Под ред. Г.И. Веселова. - М.: Высшая школа, 1988.- 280 с.
4. Твердотельные устройства СВЧ в технике связи / Л.Г. Гассанов, А.А. Липатов, В.В. Марков, Н.А. Могильченко. - М.: Радио и связь, 1988. - 288 с.
5. Полупроводниковые параметрические усилители и преобразователи СВЧ / В.С.Эткин, А.С. Берлин, П.П. Бобров и др.; Под ред. В.С. Эткина. - М.: Радио и связь, 1983.-304 с.
6. Микроэлектронные устройства СВЧ / Н.Т. Бова, Ю.Г. Ефремов, В.В. Конин и др. - Киев: Техжка, 1984.- 184 с.
7. Модули СВЧ / Л.М. Арутюнов, И.П. Блудов, В.Д. Давыдов и др. - М.: Радио и связь, 1984.-72с.
8. Давыдова Н.С., Данюшевский Ю.З. Диодные генераторы и усилители СВЧ. - М.: Радио и связь. 1986. - 184 с.